



UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

## ***Inundaciones urbanas : criterios de peligrosidad y evaluación del riesgo para peatones y vehiculo***

**Eduardo Martínez Gomariz**  
**(ORCID: 0000-0002-0189-0725)**

**ADVERTIMENT** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del repositori institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) i el repositori cooperatiu TDX (<http://www.tdx.cat/>) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual **únicament per a usos privats** emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei UPCommons o TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a UPCommons (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

**ADVERTENCIA** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del repositorio institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) y el repositorio cooperativo TDR (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=es>) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual **únicamente para usos privados enmarcados** en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio UPCommons. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a UPCommons (*framing*). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

**WARNING** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the institutional repository UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) and the cooperative repository TDX (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=en>) has been authorized by the titular of the intellectual property rights **only for private uses** placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor availability from a site foreign to the UPCommons service. Introducing its content in a window or frame foreign to the UPCommons service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

# INUNDACIONES URBANAS: CRITERIOS DE PELIGROSIDAD Y EVALUACIÓN DEL RIESGO PARA PEATONES Y VEHÍCULOS

**EDUARDO MARTÍNEZ GOMARIZ**  
(Identificador ORCID: 0000-0002-0189-0725)



TESIS PRESENTADA PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA CIVIL  
**SEPTIEMBRE 2016**

DIRECTOR:  
*MANUEL GÓMEZ VALENTÍN*  
CODIRECTOR:  
*BENIAMINO RUSSO*



flumen



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, ESPAÑA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
INSTITUT FLUMEN  
PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL  
ESPECIALIDAD: HIDROLOGÍA URBANA

E.T.S. d'Enginyers de Camins, Jordi Girona 1-3, D1, 08034 Barcelona — Tel. +34/93 401 70 70 — [www.flumen.upc.edu](http://www.flumen.upc.edu)









## **RESUMEN**

En este trabajo de investigación se ha analizado en primer lugar la peligrosidad a la que se ven expuestas las personas durante eventos de inundación en zona urbana, estudiando los límites de estabilidad de éstas, cuando cruzan a través de una corriente de agua, a partir de ensayos experimentales con personas de ciertas características escogidas previamente. Éste estudio se ha complementado con encuestas realizadas a las personas ensayadas, de forma que se pueda evaluar la idoneidad de los ensayos y sobretodo la sensación de estabilidad que presentaba cada sujeto ensayado para las diferentes condiciones hidráulicas (calados y velocidades) a las que se veían sometidos.

Los vehículos son componentes esenciales en las afectaciones producidas en una ciudad ante importantes inundaciones ya que pueden producir daños directos tangibles (viéndose afectados los propios vehículos o colisionando sobre otros elementos urbanos), daños indirectos tangibles (derivados de la interrupción del tráfico) y daños indirectos intangibles (afectaciones a personas). Éstos, al perder la estabilidad, terminan siendo grandes escombros arrastrados por el agua, con lo cual resulta imprescindible disponer de herramientas para evaluar su estabilidad ante diferentes condiciones hidráulicas (calados y velocidades) y para diferentes tipologías de vehículos (formas y pesos). En este documento se ofrecen herramientas para evaluar la estabilidad de los vehículos, habiéndose llevado a cabo ensayos experimentales con vehículos de diferentes características a escalas que permitían ser ensayados en un canal de 0.6 m de ancho.

En combinación con los estudios experimentales, se llevan a cabo simulaciones numéricas tridimensionales con las que se obtienen resultados (fuerzas actuantes) difícilmente medibles en laboratorio. Es posible estimar el coeficiente de rozamiento que produjo una inestabilidad de un sujeto ensayado en laboratorio, así como validar numéricamente el umbral de estabilidad de un vehículo ensayado. Se abre un amplio campo de investigación basado en herramientas numéricas para el análisis de la estabilidad de personas y vehículos.

Por último se presenta un caso de estudio en el que aplican criterios de peligrosidad y riesgo basados en los estudios experimentales de estabilidad para peatones y vehículos. Se propone y se aplica una metodología para estimar los daños ocasionados a vehículos, derivados de una cierta inundación.

En definitiva, en este trabajo de investigación se presentan resultados fundamentados experimentalmente, complementados con simulaciones numéricas y aplicados conjuntamente a un caso real, que aportan información de gran valor para el objetivo final, la gestión del riesgo de inundaciones en zonas urbanas.

---

Palabras clave: inundación, peligrosidad, vulnerabilidad, daños, peatones, vehículos.



## ***ABSTRACT***

In this research work, an analysis is first undertaken on the hazard regarding people exposed to floods in urban areas. Several experiments with people were carried out in order to determine the stability limit to pedestrians, with physical characteristics previously established, crossing through a water flow. This study was complemented by including surveys on the tested people regarding their feelings during the tests. The aim was to evaluate the adequacy of the tests and more especially to figure out the stability feelings of every person under different hydraulic conditions (water depths and velocities).

Vehicles are essential components related to impacts in cities when important floods occurs, considering that direct tangible damages (impacts either on the vehicles themselves or on other urban structures), indirect tangible damages (traffic interruption) and indirect intangible damages (impacts on pedestrians) may be caused by important flash flood events. After losing the stability vehicles are swept away by the water flow as if they were huge debris. Therefore, it is essential to have suitable tools to evaluate the stability of different types of vehicles (shapes and weights) under different hydraulic conditions (water depths and velocities). Herein, tools to evaluate the stability of vehicles exposed to floods are provided, which have been developed carrying out experimental tests using a sample of vehicles with different scales.

Together with the conducted experimental studies, several three-dimensional simulations were carried out. Hardly-measurable variables were obtained due to those simulations which allowed analysing the phenomenon in more depth. The critical friction coefficient was estimated for a tested subject, based on the forces obtained through the conducted simulations. A numerical validation of the proposed experimental threshold was performed for one of the tested vehicles. It opens a wide research field in the pedestrians and vehicles stability studies based on the employment of numerical tools.

Lastly, a case study is presented where hazard and risk criteria based on the conducted stability experiments are applied. A new methodology for the economic damages estimation for vehicles when those are exposed to flooding is presented and applied as well within the case study.

In summary, experimental results are presented here, complemented with numerical simulations, and are applied together into a real case, thereby providing valued information according to the final target, flood risk management in urban areas.

---

Keywords: flash flood, hazard, vulnerability, damages, pedestrians, vehicles.





## AGRADECIMIENTOS

A mi madre Isabel, a mi padre Ginés, a mi hermano David y a mi novia Débora, gracias por estar ahí. A mis tutores, Manuel y Beniamino, y a todos mis compañeros, gracias por vuestra ayuda y compañía estos últimos años. Todos vosotros habéis contribuido a que esta tesis haya tomado forma.





## NOTACIÓN

$a_0$	Constante de la curva límite de estabilidad ( $v \cdot y$ )
$A$	Área proyectada normal a la dirección del flujo
$A'$	Sección hidráulica real en la plataforma de ensayos
$A$	Fracción de área en una celda de malla
$A_i$	Fracción de área de flujo en la dirección $i$
$A_{i,j}$	Área del dominio o celda $i,j$
$A_r$	Constante aditiva
$A_s$ y $A_b$	Vector $A$ en el sistema de coordenadas espacial y de un objeto móvil respectivamente
$A_w$	Área mojada
$B$	Ancho del canal de pendiente variable
$b$	Ancho de la pierna de una persona
$b$	Fuerza por unidad de masa o fuerza másica
$b'$	Ancho de la plataforma de ensayos
$b_c$	Ancho del vehículo
$b_i$	Término que solo entra en juego cuando existen cuerpos porosos
$CON$	Factor de seguridad para mejorar la estabilidad en problemas de dos y tres dimensiones y para anticipar posibles incrementos de velocidad
$C_d$	Coefficiente de arrastre
$C_l$	Coefficiente de ascensión
$C_s$	Coefficiente asociado a la estabilidad por deslizamiento
$C_t$	Coefficiente asociado a la estabilidad por vuelco
$d$	Longitud del pie de una persona (brazo de palanca)
$d$	Tensor de velocidades de deformación
$D$	Disipación de energía
$DF$	Factor de escombros (Debris Factor)
$e$	Coefficiente energético de restitución de Stronge
$E_x$	Exposición
$f_e$	Frecuencia de onda emitida
$f_{hzmub}$	Variable usada por Flow-3D para definir la fuerza en dirección $z$ sobre un

	objeto
$f_i$ :	Componente de las fuerzas viscosas en la dirección $i$
$f_r$	Frecuencia de onda recibida
$F_b$	Fuerza de flotación
$F_D$	Fuerza de arrastre o dinámica del agua
$F_G$	Fuerza de peso efectivo resultado de la diferencia $F_g - F_b$
$F_H$	Fuerza en la dirección horizontal
$F_L$	Fuerza de ascensión
$F_N$	Fuerza de reacción normal a la superficie de apoyo
$F_r$	Número de Froude
$F_R$	Fuerza de rozamiento
$F_{SOR}$	Relación de tiempo de cambio de fracción de volumen del fluido número 1 asociado a la a la fuente de masa para el fluido número 1
$F_V$	Fuerza en la dirección vertical
$g$	Aceleración de la gravedad
$g_z$	Variable de Flow-3D para definir la componente de la aceleración de la gravedad en la dirección $z$
$G$	Centro de gravedad de un objeto
$G_i$ :	Componente de la aceleración de la gravedad en dirección $i$
$h$	Carga hidráulica sobre vertedero
$h_b$	Calado de flotación
$h_c$	Altura del vehículo
$h_E$	Energía específica
$H$	Altura de una persona
$HR$	Porcentaje de peligrosidad por inundación
$i$	Pendiente local
$i_x, i_y, i_z$	Pendiente en la dirección $x, y, z$ respectivamente
$I$	Pendiente motriz
$I$	Energía interna
$[J]$	Tensor de momento de inercia en el sistema de coordenadas de un objeto móvil

$J_{kl}^{-1}$ y $J'_{kl}{}^{-1}$	Elementos de la inversa del tensor de inercia sobre el centro de masas por los dos cuerpos en el sistema de colisión, respectivamente
$J_{11}, J_{22}$ y $J_{33}$	Momentos de inercia
$k$	Rugosidad absoluta superficial
$K$	Constante de Von Kármán
$k_s$	Altura de rugosidad. Corresponde al diámetro medio de los granos de arena utilizados por Nikuradse
$K_1, K_2, K_3, K_4$	Variables instrumentales para el método numérico Runge-Kutta de 4º orden
$l_c$	Longitud del vehículo
$l_m$	Longitud en el modelo
$l_p$	Longitud en el prototipo
$m$	Masa de un cuerpo rígido
massm vb	Variable de Flow-3D para definir la masa de un cuerpo
$M_{norm}$	Momento normalizado. Ratio entre el momento desestabilizador y el estabilizador
$M_0$	Momento volcador desde 0
$M_{W0V}$	Variable hidráulica (calado o velocidad) sin el vehículo en el agua
$M_{WV}$	Variable hidráulica (calado o velocidad) con el vehículo en el agua
$M'_c$	Peso adicional añadido al vehículo
$M_c$	Peso de un vehículo
$M_e$	Momento estabilizador
$M_z$	Peso de un zapato
$n$	Coefficiente de rugosidad de Manning
$\mathbf{n}$	Vector unitario normal de un objeto móvil en la celda de malla
$n_1, n_2, n_3$	Componentes del vector unitario $\mathbf{n}$
$p$	Porcentaje de volumen vacío
$\vec{p}$	Vector de presión
$\vec{p} = (p_1, p_2, p_3)$	Impulso de la fuerza de contacto en un cuerpo
$p_r$	Probabilidad de ocurrencia
$P$	Peso de una persona
$P'$	Peso de una persona con carga añadida

$PA$	Área en planta
$P_{i,j}$	Punto de medida en la celda $i,j$
$P_m$	Peso del monolito
$p(x, t)$	Campo de presiones
$q$	Caudal unitario
$p_c$	Impulso normal cuando la colisión alcanza su máxima compresión
$p_f$	Impulso total de la colisión
$q$	Cantidad turbulenta de energía
$Q$	Caudal total
$Q_T$	Caudal total para un periodo de retorno T
$Q_{i,j}$	Caudal de paso por el dominio o celda $i,j$
$r_i$ y $r'_i$	Componentes de los vectores de distancia desde el centro de masa hasta el punto de colisión de ambos cuerpos, respectivamente
$r_{P/G}$	Vector distancia entre los puntos G y P
$R$	Coefficiente que se utiliza para cambio de coordenadas cartesianas a cilíndricas
$[R]$	Tensor ortogonal de transformación de coordenadas
$R_f$	Relación $h_c \rho_c / h_b \rho_w$
$R_h$	Rádío hidráulico
$R_{SOR}$	Fuente de masa
$s$	Velocidad de deslizamiento
$SC$	Coefficiente de estabilidad
$SC_{mod}$	Coefficiente de estabilidad modificado
$S_f$	Factor de seguridad
$S_m$	Término de fuente de masa física de fluido
$S_{obj}$	Área superficial de un objeto móvil en la celda de malla
$t$	Tiempo
$t_m$	Tiempo para el modelo
$t_p$	Tiempo para el prototipo
$T$	Periodo de retorno

$T_G$	Esfuerzo de torsión sobre G
$u$	Velocidad puntual o instantánea
$\bar{u}$	Velocidad media en un instante
$u'$	Fluctuación de la velocidad puntual o instantánea alrededor del valor medio $\bar{u}$
$u^*$	Velocidad de corte
$u_r$	Velocidad relativa entre el fluido y la pared (usualmente la pared es inmóvil y por tanto $u_r$ termina siendo la velocidad del fluido $u$ )
$u_w, v_w, w_w$	Componentes de velocidades relativas relacionadas con la fuente de masa
$U_c$	Velocidad de arrastre
$v$	Velocidad
$\bar{v}$	Velocidad media real
$\bar{v}_c$	Velocidad media calculada
$v_{i,j}$	Velocidad asociada al dominio o celda $i,j$
$v_m$	Velocidad en el modelo
$v_{max}$	Velocidad máxima
$v_p$	Velocidad en el prototipo
$v_{perfil}$	Velocidad promediada en tiempo y en altura en un perfil de velocidades
$v_x, v_y, v_z$	Velocidad en las direcciones x, y, z del espacio respectivamente
$\bar{v}_I, \bar{v}_{II}, \bar{v}_{III}, \bar{v}_{IV}, \bar{v}_V$	Velocidad media en la posición del perfil de velocidades I, II, III, IV y V respectivamente
$\bar{\mathbf{v}}$	Vector de velocidades
$\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$	Campo de velocidades
$v(y)$	Velocidad a una profundidad $y$
$V$	Volumen parcialmente sumergido
$V_{cell}$	Volumen de una celda de malla
$V_{desp}$	Volumen desplazado
$V_f$	Fracción de volumen en una celda malla
$V_F$	Fracción de volumen de flujo
$V_G$	Velocidad del centro de masa de un cuerpo rígido
$V_n$	Volumen neto parcialmente sumergido



$V_{obj}$	Velocidad de un objeto móvil en la celda de malla
$V_u$	Vulnerabilidad
$W_3$	Trabajo realizado por un impulso normal
$x$	Vector de posición
$x', y', z'$	Sistema de coordenadas de un objeto móvil
$x_s, x_b$	Vectores de posición de un punto en el espacio y en un objeto respectivamente
$y$	Calado
$\bar{y}$	Calado medio
$y_c$	Calado crítico
$y_m$	Calado en el modelo
$y_{max}$	Calado máximo
$y_n$	Calado normal
$y_{perfil}$	Calado en un perfil de velocidades
$y_p$	Calado en el prototipo
$y_1, y_2$	$y_2$ es el calado conjugado de $y_1$
$y_I, y_{II}, y_{III}, y_{IV}, y_V$	Calado en la posición del perfil de velocidades I, II, III, IV y V respectivamente
$\alpha$	Coefficiente de Coriolis
$\alpha^*$	Ángulo límite para inicio de deslizamiento
$\alpha, \beta$	Parámetros relacionados con la forma del vehículo, tipo de neumáticos y la rugosidad de la carretera
$\beta$	Coefficiente de Boussinesq
$\gamma_w$	Peso específico del agua
$\delta$	Salto entre $f_e$ y $f_r$
$\delta_{ik}$	Simbolo $\delta$ de Kronecker
$\delta u_s, \delta v_s, \delta w_s$	Componentes de velocidades relativas relacionadas con la fuente de masa
$\delta x_i, \delta y_i, \delta z_i$	Ancho, profundidad y altura de celdas
$\Delta t$	Incremento de tiempo o paso de tiempo
$\Delta x$	Tamaño de la celda en una dirección
$\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$	Incremento de distancia en dirección x, y, z respectivamente

$\varepsilon$	Disipación de la energía turbulenta
$\varepsilon_{ikm}$	Tensor de permutación
$\theta$	Ángulo entre sonda de emisión y de recepción en velocímetro Vectrino
$\theta_P$	Parámetro de movilidad para la inestabilidad por deslizamiento de personas
$\theta_{P_{cr}}$	Umbral crítico de inestabilidad para personas
$\theta_{P_t}$	Parámetro de movilidad para la inestabilidad por vuelco de personas
$\theta_V$	Parámetro de movilidad para vehículos
$\kappa$	Energía cinética turbulenta
$\lambda$	Factor de escala geométrica
$\lambda_F$	Factor de escala de fuerzas
$\lambda_{F_b}$	Factor de escala de fuerzas de flotación
$\lambda_{F_g}$	Factor de escala de fuerzas gravitacionales o debidas al peso
$\mu$	Coefficiente de rozamiento
$\bar{\mu}$	Coefficiente para la adhesión
$\nu_T$	Viscosidad turbulenta
$\xi$	Coefficiente para considerar coordenadas cilíndricas. Para coordenadas cartesianas tiene un valor de 0
$\pi_i$	Número adimensional i
$\rho_c$	Densidad de vehículo
$\rho_w$	Densidad del agua
$\varphi$	Ángulo de la dirección de deslizamiento medida desde $n_1$ sobre $\mathbf{n}$
$\boldsymbol{\tau}_R$	Tensor de tensiones turbulentas o de Reynolds
$\varphi$	Dirección de deslizamiento la cual varía durante la colisión
$\omega$	Velocidad angular de un cuerpo rígido
$\boldsymbol{\omega}$	Ratio entre la disipación de la energía turbulenta y la energía cinética turbulenta $\omega = \varepsilon/\kappa$
$\Omega_x, \Omega_y$ y $\Omega_z$	Componentes x, y y z respectivamente de la velocidad angular de un objeto móvil en el sistema espacial
$\nabla$	Vector simbólico nabla



# CONTENIDOS

Erratum	i
Resumen	iii
Abstract	v
Agradecimientos	vii
Notación	ix
Contenidos	xvii

## **CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS** **1**

I.1. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA. LA DISCIPLINA DE LA HIDROLOGÍA URBANA .....	1
I.2. LA URBANIZACIÓN Y EL PROCESO DE ESCORRENTÍA .....	3
I.3. CONCEPTO DE DRENAJE DUAL.....	4
I.4. DISCUSIÓN SOBRE EL CONCEPTO DE RIESGO, PELIGROSIDAD Y VULNERABILIDAD .....	7
I.5. REPRESENTACIÓN ESPACIAL DE LA PELIGROSIDAD Y EL RIESGO .....	12
I.6. TERMINOLOGÍA SOBRE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES .....	19
I.7. OBJETIVOS Y ALCANCE .....	21

## **CAPÍTULO II REVISIÓN DEL ESTADO DE LA CUESTIÓN** **23**

II.1. INTRODUCCIÓN .....	23
II.2. LEGISLACIÓN EUROPEA EN RELACIÓN A LA EVALUACIÓN Y GESTIÓN DE LOS RIESGOS DE INUNDACIÓN. DIRECTIVA 2007/60/CE.....	23
II.3. CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD PARA PERSONAS ANTE INUNDACIONES .....	28
II.3.1. Criterios de evaluación de peligrosidad en calles, basados en un calado máximo admisible del flujo .....	29
II.3.1.1. <i>Criterio de Denver (Colorado, EEUU) (1969)</i> .....	29
II.3.1.2. <i>Criterio de la Comisión Nacional de Transportes de la República de Sudáfrica (1986)</i> .....	29
II.3.1.3. <i>Criterio de Mendoza (1999)</i> .....	29

II.3.2. Criterios de evaluación de peligrosidad, según la estabilidad de las personas, basados en la consideración conjunta de los calados y velocidades del flujo.....	29
II.3.2.1. Criterio de la Federal Emergency Management Agency (FEMA) (1979).....	30
II.3.2.2. Criterio de Abt et al. (1989).....	30
II.3.2.3. Criterio de Témez (1992).....	33
II.3.2.4. Criterio de la región de Liguria (1993).....	34
II.3.2.5. Criterio de peligrosidad por inundaciones debidas a rotura de presas en EEUU (1988) y en España (1996).....	34
II.3.2.6. Criterio del condado de Clark (Las Vegas, EEUU) (1999).....	37
II.3.2.7. Criterio de estabilidad al deslizamiento de Nanía (1999).....	37
II.3.2.8. Criterio del Agriculture and Resource Management Council de Australia y Nueva Zelanda (ARMC) (2000).....	39
II.3.2.9. Criterio RESCDAM (2000).....	40
II.3.2.10. Criterio de Estabilidad al Vuelco de Gómez (2001).....	43
II.3.2.11. Criterio propuesto en la tesis doctoral de Kelman (2002).....	44
II.3.2.12. Procedimiento de Ramsbottom et al. (2006).....	45
II.3.2.13. Criterio Suizo (2004).....	46
II.3.2.14. Criterio del Departamento de Infraestructuras, Planificación y Recursos Naturales del Gobierno de Nueva Gales del Sur (Sídney, Australia) (2005).....	47
II.3.2.15. Criterio del PICBA06 (Pla Integral de Clavegueram de Barcelona), CLABSA (2006).....	49
II.3.2.16. Criterio propuesto por Russo (2009).....	50
II.3.2.17. Criterio propuesto en la Guía Australian Rainfall and Runoff (2010).....	54
II.3.3. Criterios de evaluación de peligrosidad en zonas subterráneas, según el tiempo de evacuación de las personas.....	58
II.3.1. Resumen de los criterios de peligrosidad para personas ante inundaciones.....	59
II.4. CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE VEHÍCULOS ANTE INUNDACIONES.....	61
II.4.1. Criterios experimentales y analíticos.....	61
II.4.1.1. Bonham y Hattersley (1967).....	61
II.4.1.2. Gordon y Stone (1973).....	63
II.4.1.3. Keller y Mitsch (1993).....	65
II.4.1.4. Teo et al. (2010, 2012 y 2013).....	66
II.4.1.5. Xia et al. (2011).....	74
II.4.1.6. Shu et al. (2011).....	76
II.4.1.7. FRMRC: Flood Risk Management Research Consortium (2012).....	80
II.4.1.1. Xia et al. (2013).....	81
II.4.1.2. Toda et al. (2013).....	85
II.4.1.3. Kramer et al. (2016).....	88

II.4.2. Criterios propuestos en directrices o recomendaciones en Australia y Nueva Zelanda .....	92
II.4.2.1. Criterios previos a la Guía Australian Rainfall & Runoff (2011).....	92
II.4.2.2. Criterio propuesto por la Guía Australian Rainfall & Runoff (2011).....	95
II.4.3. Resumen de los criterios de evaluación de la estabilidad de vehículos ante inundaciones.....	97
II.5. CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE DAÑOS DIRECTOS OCASIONADOS POR INUNDACIONES .....	104
II.5.1. Curvas de daños para vehículos.....	109
II.5.1.1. Criterio propuesto por Federal Emergency Management Agency (FEMA) en el proyecto HAZUS-MH (EEUU) (2003).....	109
II.5.1.2. Criterio propuesto para el Proyecto CRUE. Effectiveness and Efficiency of Non-structural Flood Risk Management Measures (Valencia, España) (2008).....	111
II.5.1.3. Criterio propuesto por el Cuerpo de Ingenieros del Ejercito de los Estados Unidos (USACE) (2009).....	113
II.5.2. Resumen de los criterios de evaluación de daños a vehículos ocasionados por inundaciones.....	115
II.6. DISCUSIÓN SOBRE EL ESTADO DE LA CUESTIÓN Y NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN .....	116
II.6.1. Criterios de peligrosidad para personas ante inundaciones.....	116
II.6.2. Criterios de evaluación de la estabilidad de vehículos ante inundaciones.....	117
II.6.3. Evaluación de daños directos ocasionados por inundaciones.....	118
<b>CAPÍTULO III ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE PEATONES ANTE INUNDACIONES PLUVIALES EN ZONAS URBANAS</b> .....	<b>119</b>
III.1. INTRODUCCIÓN .....	119
III.2. DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES DEL LABORATORIO Y DEL MODELO FÍSICO.....	122
III.3. DETERMINACIÓN DE LOS CAUDALES PROPUESTOS .....	125
III.4. DETERMINACIÓN DE LAS VELOCIDADES Y CALADOS EN EL MODELO DE CALLE.....	127
III.4.1. Instrumentación: Velocímetro Vectrino .....	127
III.4.1.1. Software de registro de datos.....	128
III.4.1.2. Registro de información, grabado y conversión de datos .....	131
III.4.1.3. Filtrado de datos.....	131

III.4.2. Metodología para el registro de velocidades y medición de calados.....	132
III.4.3. Verificación de la calidad del registro de velocidades.....	134
III.4.3.1. Resultados de las variables hidráulicas obtenidas .....	141
III.5. PROPUESTA DE CASOS DE ESTUDIO.....	147
III.6. PERFIL DE PERSONAS ENSAYADAS.....	150
III.7. CARACTERÍSTICAS DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL Y PROTOCOLO DE ENSAYOS.....	151
III.8. RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	157
III.9. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES .....	173
<b>CAPÍTULO IV ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA ESTABILIDAD DE VEHÍCULOS ANTE INUNDACIONES</b>	<b>175</b>
IV.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	175
IV.2. FUERZAS HIDRODINÁMICAS ACTUANTES SOBRE EL VEHÍCULO .....	177
IV.3. ESCALAS DE LOS MODELOS DE VEHÍCULOS A ENSAYAR (TEORÍA DE MODELOS) .....	180
IV.1. DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES DEL LABORATORIO.....	182
IV.2. ESTUDIO Y PLANIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES. CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO LOCAL DE PENDIENTE VARIABLE.....	184
IV.3. ELECCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS A ESCALA ENSAYADOS Y SUS PROTOTIPOS.....	195
IV.4. CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	202
IV.4.1. Determinación de los caudales de ensayo .....	202
IV.4.2. Obtención de datos experimentales .....	204
IV.4.3. Casos de estudio.....	204
IV.4.4. Determinación del coeficiente de rozamiento entre el neumático y la superficie de ensayo.....	205
IV.4.5. Determinación de la inestabilidad por flotación.....	208
IV.4.6. Influencia de los efectos de escala .....	210
IV.4.7. Umbrales de estabilidad preliminares.....	213
IV.4.8. Umbrales de estabilidad propuestos.....	220

IV.5. METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN DEL LÍMITE DE ESTABILIDAD PARA UN VEHÍCULO CUALQUIERA .....	223
IV.6. EJEMPLO PRÁCTICO DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA .....	225
IV.7. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....	228
IV.8. ANÁLISIS COMPARATIVO CON OTROS CRITERIOS DE ESTABILIDAD DE VEHÍCULOS.....	230
IV.9. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES.....	235
<b>CAPÍTULO V MODELACIÓN 3D: ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE PEATONES Y VEHÍCULOS ANTE INUNDACIONES</b>	<b>237</b>
V.1. INTRODUCCIÓN .....	237
V.2. REVISIÓN DEL ESTADO DE LA CUESTIÓN.....	239
V.2.1. Aplicaciones numéricas tridimensionales a la estabilidad de vehículos .....	239
V.2.2. Aplicaciones numéricas tridimensionales a la estabilidad de personas .....	242
V.2.3. Software dedicado a la simulación tridimensional en CFD.....	247
V.3. SIMULACIONES NUMÉRICAS PROPUESTAS .....	249
V.4. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE FLOW-3D .....	251
V.4.1. Ecuaciones de Navier-Stokes, Reynolds y concepto de turbulencia .....	251
V.4.2. Resolución numérica .....	254
V.4.3. Métodos FAVOR y VOF. Definición de los sólidos y de las interfases entre fluidos .....	256
V.4.4. Disipación de energía.....	258
V.4.5. Geometría y mallado .....	260
V.4.6. Condiciones de contorno y condiciones iniciales .....	262
V.4.7. Objetos en movimiento .....	264
V.4.7.1. Ecuaciones de movimiento para cuerpos rígidos.....	265
V.4.7.2. Adaptación de las ecuaciones de conservación.....	267
V.4.7.3. Ecuaciones dinámicas para la colisión de cuerpos rígidos.....	268
V.4.7.4. Simulación en Flow-3D de Objetos Móviles (GMO).....	272



V.5. ELABORACIÓN Y RESULTADOS DE LOS MODELOS APLICADOS AL ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE PERSONAS Y DE VEHÍCULOS .....	273
V.5.1. Estudio de la estabilidad de personas. Desarrollo y calibración del modelo.....	273
V.5.2. Discusión de los resultados de las simulaciones basada en estabilidad de personas.....	280
V.5.3. Estudio de la estabilidad de vehículos. Desarrollo y calibración de los modelos propuestos .....	288
V.5.3.1. Fase 1: Flotación del vehículo.....	291
V.5.3.2. Fase 2: Comprobación del correcto comportamiento del vehículo.....	291
V.5.3.3. Fase 3: Obtención de nuevos resultados no determinados mediante ensayos experimentales .....	299
V.5.4. Discusión de los resultados de las simulaciones basada en estabilidad de vehículos.....	302
V.5.4.1. Fase 1: Flotación del vehículo.....	302
V.5.4.2. Fase 2: Comprobación del correcto comportamiento del vehículo.....	303
V.5.4.3. Fase 3: Obtención de nuevos resultados no determinados mediante ensayos experimentales .....	307
V.6. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES.....	315

## **CAPÍTULO VI APLICACIÓN A UN CASO DE ESTUDIO: BADALONA 319**

VI.1. INTRODUCCIÓN.....	319
VI.2. DATOS DE PARTIDA .....	321
VI.3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO: MUNICIPIO DE BADALONA (BARCELONA) .....	322
VI.4. EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD PARA PEATONES Y VEHÍCULOS: MAPAS DE PELIGROSIDAD .....	325
VI.4.1. Criterio aplicado a la estabilidad de peatones .....	325
VI.4.2. Criterio aplicado a la estabilidad de vehículos .....	326
VI.4.3. Metodología para la elaboración de mapas de peligrosidad para peatones y vehículos .....	328
VI.5. EVALUACIÓN DEL RIESGO PARA PEATONES Y VEHÍCULOS: MAPAS DE RIESGO .....	329
VI.5.1. Metodología para la elaboración de Mapas de Riesgo para peatones.....	329
VI.5.2. Curvas de daños para vehículos.....	330

VI.5.3. Metodología para la elaboración de Mapas de Riesgo, basados en la evaluación del daño económico sobre vehículos .....	334
VI.5.3.1. Caracterización de la ocupación de vehículos en Badalona.....	335
VI.5.3.2. Distribución espacial de los vehículos. Método de aplicación de la curva de daños ponderada .....	340
VI.5.4. Daño Anual Esperado (DAE) .....	342
VI.6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	344
VI.6.1. Peligrosidad y riesgo para peatones en Badalona.....	344
VI.6.2. Peligrosidad y Riesgo para los vehículos en Badalona .....	348
VI.6.2.1. Mapas de peligrosidad y riesgo para vehículos.....	348
VI.6.2.1. Daño Anual Esperado (DAE).....	350
VI.7. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES.....	351
<b>CAPÍTULO VII CONCLUSIONES GENERALES</b> .....	<b>353</b>
VII.1. CONCLUSIONES.....	353
VII.2. FUTURAS INVESTIGACIONES .....	358
<b>Referencias .....</b>	<b>363</b>

## *ANEJOS*

Anejo A.	Integración de perfiles de velocidad	373
Anejo B.	Resumen de los resultados de las encuestas a las personas ensayadas	465
Anejo C.	Planificación numérica de cobertura de puntos (velocidad-calado) para los ensayos experimentales de inestabilidad de vehículos	505
Anejo D.	Inundaciones en entorno urbano. Casos reales	511

## **FIGURAS**

Figura I-1. Tendencias mundiales de la urbanización: Distribución regional, 1950-2030 (Sadik, 1999)	2
Figura I-2. Ejemplos de bandas verdes. Drenaje sostenible	3
Figura I-3. Hidrograma de respuesta de una cuenca menos urbanizada (pre-desarrollo) y más urbanizada (pos-desarrollo)	4
Figura I-4. Sábado 30/07/2011 en Barcelona. Evento de lluvia de hasta 58 mm en algunos puntos de la ciudad con intensidad máxima de 140 mm/h	5
Figura I-5. Esquema de sistema de alcantarillado y calle. Drenaje dual (Djordjevic <i>et al.</i> , 1999)	6
Figura I-6. Modelo conceptual S-P-R-C (Fleming <i>et al.</i> , 2001; Fleming, 2002)	8
Figura I-7. Componentes del Riesgo de inundación según el Gobierno de Queensland (Australia) (Government of Queensland, 2014)	8
Figura I-8. Condiciones de calado (y) y velocidad (v) peligrosas para personas (Témez, 1992)	9
Figura I-9. Definición del riesgo en el proyecto europeo BINGO	11
Figura I-10. Modelo de ensayos de inundación en superficie urbana, Russo (2009) (izquierda) y en zona subterránea, Ishigaki <i>et al.</i> (2008) (derecha)	13
Figura I-11. Modos de inestabilidad de vehículos durante eventos de inundaciones (izquierda) y fuerzas actuantes en el vehículo (derecha)	13
Figura I-12. Vehículos afectados por una inundación	14
Figura I-13. Afectaciones a viviendas a causa de unas inundaciones	14
Figura I-14. Curvas de daños para diferentes categorías (enfoque Meso). Fuente Elsner <i>et al.</i> (2003).	16
Figura I-15. Curvas de vulnerabilidad: arriba (terremoto) (Cardona, 2010); abajo (inundación) (Francés <i>et al.</i> , 2008)	17
Figura I-16. Flujos de agua en una calle peligrosos para personas y vehículos	19
Figura II-1. Inundaciones en Europa, desde el año 1900 hasta el 2013. Fuente: CRED International Disaster Database (2013)	24
Figura II-2. Muertes por inundaciones en Europa, desde el año 1900 hasta el 2013. Fuente: CRED International Disaster Database (2013)	24
Figura II-3. Afectación económica debida a inundaciones en Europa, desde el año 1900 hasta el 2013. Fuente: CRED International Disaster Database (2013)	25
Figura II-4. Monolito de cuerpo idealizado (Abt <i>et al.</i> , 1989)	31

Figura II-5. Curva de derribo para un monolito de 54.4 kg (120 lbs). (1 ft= 30.48 cm; 1 fps= 3.28 m/s)	31
Figura II-6. Sujeto ensayado en el canal	32
Figura II-7. Criterio para la delimitación de la zona de inundación peligrosa, según Témez (1992)	33
Figura II-8. Valores límite de calado y velocidad según el criterio de peligrosidad adoptado en la región de Liguria (Italia) (Regione Liguria, 1993)	34
Figura II-9. Definición de zonas de peligrosidad para adultos (arriba) y para niños (abajo), gráficas en pies para el calado y pies/segundo para la velocidad. Fuente: Downstream Hazard Classification Guidelines	35
Figura II-10. Definición de zonas de peligrosidad para los ocupantes de las viviendas situadas en la zona de inundación, gráfica en pies para el calado y pies/segundo para la velocidad. Fuente: Downstream Hazard Classification Guidelines	36
Figura II-11. Definición de zonas de peligrosidad en zonas urbanas según las Directrices Técnicas en relación a la rotura de presas en España	36
Figura II-12. Fuerzas actuantes sobre las piernas de una persona, en el caso de estar sometida a la acción de la escorrentía	38
Figura II-13. Criterio propuesto para la delimitación de la zona de inundación peligrosa	38
Figura II-14. Estimación de la peligrosidad (izquierda) y efecto del tiempo relativo de evacuación para el índice de peligrosidad (derecha)	40
Figura II-15. Canal (denominado en el estudio como modelo de cuenca) (izquierda) y carro de remolque (derecha) de la Universidad de Helsinki (Karvonen <i>et al.</i> , 2000)	41
Figura II-16. Individuo con traje de supervivencia Gore-Tex, cinturón y casco de seguridad (izquierda). Individuo con botas altas y cinturón de seguridad, atado con cuerda de seguridad (derecha) (Karvonen <i>et al.</i> , 2000)	41
Figura II-17. Individuo 1; calado= 1.1 m; velocidad = 0.7 m/s (Karvonen <i>et al.</i> , 2000)	42
Figura II-18. Individuo 5; calado= 1.07 m; velocidad = 1.0 m/s (Karvonen <i>et al.</i> , 2000)	42
Figura II-19. Esquema de las fuerzas actuantes sobre las piernas de una persona, para evaluar su estabilidad al vuelco producido por la acción de la escorrentía	44
Figura II-20. Daño a los edificios en base a la tesis doctoral de Kelman (2002)	45
Figura II-21. Relaciones de velocidad y calado	48
Figura II-22. Relaciones de peligrosidad hidráulica	48
Figura II-23. Sección transversal de la plataforma de ensayos utilizada por Russo (2009)	50
Figura II-24. Depósito de cabecera a la izquierda y modificación de la pendiente longitudinal de la plataforma a la derecha	51
Figura II-25. Protocolo de ensayos, mapa de recorrido a la izquierda e imagen de persona realizando el ensayo a la derecha	52

- Figura II-26. Condiciones de peligrosidad alta relacionadas a las condiciones de flujo frente a las características de las personas (Russo, 2009) 53
- Figura II-27. Combinación de los resultados de los diferentes autores, representando el producto ( $v \cdot y$ ) frente al producto Altura\*Peso ( $H \cdot P$ ) de las personas ensayadas, incluyendo la regresión lineal de todas ellas (línea discontinua), sin considerar los datos de Abt *et al.* (1989) (línea continua) y el 95 % de intervalos de confianza para todos los datos excepto los de Abt *et al.* (1989) (línea punteada) 55
- Figura II-28. Valores de flujo ( $v \cdot y$ ) indicando el nivel de peligrosidad como función de la altura ( $H$ ) y peso ( $P$ ) de la persona ensayada para todas las fuentes de datos experimentales. Una zona de peligrosidad baja (■) se indica para niños ( $H \cdot P = 25$  hasta 50 mkg) y adultos ( $H \cdot P > 50$  mkg). Una zona de peligrosidad moderada (■) la cual es peligrosa para algunos adultos, indicada con  $v \cdot y = 0.8$  como límite superior para adultos experimentados. Una zona de peligrosidad significativa (■) la cual es peligrosa para la mayoría de adultos, con valores de ( $v \cdot y$ ) más altos ( $v \cdot y > 1.2 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ) delimitando la zona de peligrosidad extrema, peligrosa para todos los adultos (Cox *et al.*, 2010) 57
- Figura II-29. Rangos de peligrosidad propuestos como una función de calado y velocidad, comparados con los datos experimentales disponibles (Cox *et al.*, 2010) 57
- Figura II-30. Inundación de un parquin subterráneo en Barcelona (izquierda) e inundación de metro en Caracas (centro) e inundación en un centro comercial en Escocia (derecha) 58
- Figura II-31. Modelo a escala real de una escalera de 20 escalones y un pasillo de 10 metros de longitud (izquierda). Fotografía de un ensayo por la ruta de evacuación (derecha) 59
- Figura II-32. Maqueta de vehículo Ford Falcon a escala 1:25 (izquierda) y esquema conceptual del ensayo y variables que intervienen (derecha) 62
- Figura II-33. Resultados de los ensayos de Bonham y Hattersley (1967) indicando diferentes coeficientes de rozamiento requeridos para iniciar el deslizamiento y sus líneas de valoración de rozamiento constante 62
- Figura II-34. Resultados de los ensayos de Gordon y Stone (1973) con las fuerzas horizontales (kg) observadas y las fuerzas (kg) de las reacciones verticales delanteras (a) y traseras (b) indicadas. Se superponen las líneas de rozamiento constante para el inicio de movimiento del vehículo que se evaluaron durante sus estudios 64
- Figura II-35. Relaciones de velocidades inestables de flujo teóricas para los diferentes vehículos ensayados por Keller y Mitsch (1993) asumiendo un coeficiente de rozamiento de 0.3 y un coeficiente de arrastre de 1.1 hasta 1.15 66
- Figura II-36. Canales utilizados por Teo (2010) para sus ensayos de estabilidad de vehículos. a) Canal pequeño; b) Canal grande. 67
- Figura II-37. Vehículos a escala ensayados por Teo (2010) 68
- Figura II-38. Esquema de los primeros ensayos llevados a cabo en el canal pequeño (Teo, 2010) 68

Figura II-39. Validación de los resultados obtenidos con los vehículos a escala 1:43 frente a los obtenidos con los vehículos a escala 1:18 (Teo, 2010)	70
Figura II-40. Configuraciones para el análisis de la influencia de la orientación (Teo, 2010)	70
Figura II-41. Variación de calados de inestabilidad según diferentes orientaciones (Teo, 2010)	71
Figura II-42. Variación de velocidades de inestabilidad según diferentes orientaciones (Teo, 2010)	71
Figura II-43. Límites de estabilidad propuestos para vehículos prototipo (Teo, 2010)	71
Figura II-44. Configuración para el análisis de la influencia de la pendiente (Teo, 2010)	72
Figura II-45. Variación de calados y velocidades críticas según la pendiente del terreno. a) vehículos a escala 1:43; b) vehículos a escala 1:18. (Teo, 2010)	72
Figura II-46. Localización de los puntos de medidas en el canal grande (Teo, 2010)	73
Figura II-47. Relaciones de variación de a) calado, y b) velocidad. (Teo, 2010)	73
Figura II-48. Vehículos totalmente y parcialmente sumergidos en el canal	75
Figura II-49. a) Validación de la ecuación [II-19], utilizando los datos experimentales para vehículos a escala 1:18; y b) aplicación de la ecuación [II-19] en el cálculo de las velocidades de arrastre para prototipos	76
Figura II-50. Esquema de fuerzas actuantes sobre un vehículo parcialmente sumergido	77
Figura II-51. Vehículos a escala 1:18 ensayados por Shu <i>et al.</i> (2011)	78
Figura II-52. Resultados de los puntos de inestabilidad para los tres modelos de vehículos ensayados por Shu <i>et al.</i> (2011). a) Ford Focus; b) Ford Transit y c) Volvo XC90.	78
Figura II-53. Validación de la formulación propuesta por Shu <i>et al.</i> (2011)	80
Figura II-54. Sistema de fuerzas considerado por Xia <i>et al.</i> (2013)	81
Figura II-55. Resultados de los puntos de inestabilidad para los tres modelos de vehículos (escala 1:14) ensayados por Xia <i>et al.</i> (2013). a) Honda 0° y 180°; b) Honda 90°; c) Audi 0° y 180°; y d) Audi 90°	83
Figura II-56. Comparativa de la velocidad de arrastre estimada para vehículos prototipo, para orientaciones de 90° y 180°. Formulación y resultados experimentales de modelos 1:24 escalados a prototipo	84
Figura II-57. Efecto de las diferentes pendientes analizadas para prototipo a) Honda y b) Audi	84
Figura II-58. Maquetas de vehículos usados por Toda <i>et al.</i> (2013) en sus ensayos. Tipo sedán a la izquierda y tipo furgoneta a la derecha	85
Figura II-59. Ensayo con la maqueta del vehículo tipo sedán. (Toda <i>et al.</i> , 2013)	85
Figura II-60. Esquema de fuerzas sobre vehículo tipo sedán parcialmente sumergido. (Toda <i>et al.</i> , 2013)	86

Figura II-61. Relaciones experimentales $C_D=f(h/k)$ , siendo $C_D$ el coeficiente de arrastre, $h$ el calado y $k$ la altura del vehículo. Sedan a la izquierda y minivan a la derecha. (Toda <i>et al.</i> , 2013)	86
Figura II-62. Espacio vacío en un coche (Toda <i>et al.</i> , 2013)	87
Figura II-63. Diagrama de condiciones de flotación. Vehículo tipo sedán con una sobrecarga $M'=100$ kg a la izquierda, y tipo furgoneta con sobrecarga $M'=100$ kg a la derecha. (Toda <i>et al.</i> , 2013)	87
Figura II-64. Vehículos ensayados por Kramer <i>et al.</i> (2016). Volkswagen Golf III (arriba) y vehículo de emergencias LF 10/6. Prototipos a la izquierda y modelo a la derecha	88
Figura II-65. Resultados de puntos de inestabilidad del modelo Golf III para tres orientaciones con respecto al flujo: $0^\circ$ , $45^\circ$ y $90^\circ$ . (Kramer <i>et al.</i> , 2016)	89
Figura II-66. Resultados de puntos de inestabilidad del modelo LF 10/6 (cuerpo Ahmed) para tres orientaciones con respecto al flujo: $0^\circ$ , $45^\circ$ y $90^\circ$ . (Kramer <i>et al.</i> , 2016)	90
Figura II-67. Ensayo experimental para evaluar el calado de flotación de un vehículo real. (Kramer <i>et al.</i> , 2016)	91
Figura II-68. Tendencia del calado de flotación según la velocidad de ascensión del agua para vehículo Volkswagen Golf III. (Kramer <i>et al.</i> , 2016)	91
Figura II-69. Umbrales de estabilidad propuestos por Kramer <i>et al.</i> (2016) para un turismo ( $h_E=0.3$ m) y vehículo de emergencias ( $h_E=0.6$ m)	92
Figura II-70. Criterios propuestos por la Guía AR&R (1987) y por el Department Public Works, NSW (PWD) (1986) y NSW Floodplain Development Manual (2005)	93
Figura II-71. Criterios propuestos por el Melbourne Water Land Development Manual (1996) y Austroads (2008)	93
Figura II-72. Criterios propuestos por la EMA (1999) y Moore y Power (2002)	94
Figura II-73. Comparación de directrices y recomendaciones para el límite de la estabilidad de vehículos con resultados experimentales y numéricos	95
Figura II-74. Criterios de estabilidad posibles (A) y propuestos (B) para vehículos estacionados en comparación con resultados experimentales y numéricos	97
Figura II-75. Representación gráfica de los criterios de evaluación de peligrosidad para los vehículos (experimentales y teóricos)	101
Figura II-76. Representación gráfica de los criterios de evaluación de peligrosidad para los vehículos (directrices y recomendaciones)	103
Figura II-77. Curvas FIA Credibility-Weighted Calado-Daños para edificios a partir de 12/31/1998. Incluidas en el Software HAZUS-MH (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2015)	105
Figura II-78. Curvas de daño sintéticas propuestas para estructuras de edificios (izquierda) y contenidos de los edificios (derecha) teniendo en cuenta las condiciones locales del barrio del Raval (Velasco <i>et al.</i> , 2016; Russo <i>et al.</i> , 2013)	105



Figura II-79. Curva descriptiva del riesgo de inundación (Meyer <i>et al.</i> , 2009)	106
Figura II-80. Indicadores de que un vehículo ha sido dañado por una inundación. Fuente: National Auto Auction Association	108
Figura II-81. Curvas de daños para vehículos implementadas en el proyecto HAZUS-MH	111
Figura II-82. Curvas de daños para las dos clases de vehículos considerados en el proyecto CRUE	112
Figura II-83. Curva de daños promediada para vehículos para 100 m <sup>2</sup> de área afectada	113
Figura II-84. Curvas de daños para vehículos desarrolladas por el USACE	114
Figura III-1. Modelo físico durante uno de los ensayos con personas	120
Figura III-2. Condiciones de peligrosidad alta relacionadas a las condiciones de flujo frente a las características de las personas (Russo, 2009)	121
Figura III-3. Sección transversal de la plataforma de ensayos mirando de aguas abajo hacia aguas arriba	122
Figura III-4. Modelo físico de calle. Entrada uniforme de 100 l/s de caudal	123
Figura III-5. Depósito de cabecera del modelo físico	123
Figura III-6. Vista aérea del laboratorio exterior del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (ECA) en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universitat Politècnica de Catalunya. Siendo 1: Depósito de nivel constante, 2: Canales con vertederos triangulares y 3: Modelo físico de calle	124
Figura III-7. Interior de la estación de bombeo del laboratorio	124
Figura III-8. Depósito de nivel constante (izquierda), vertederos triangulares (centro) y zona de lectura mediante limnímetros (derecha)	125
Figura III-9. Sistema de variación de la pendiente longitudinal de la plataforma	125
Figura III-10. Esquema de un vertedero triangular (izquierda), liminimetro (centro), vertedero en funcionamiento (derecha)	126
Figura III-11. Esquema y dimensiones del Vectrino sidelooking de Nortek	127
Figura III-12. Volumen de control (a) y ejes de referencia (b) del Vectrino sidelooking	128
Figura III-13. Interfaz del software Vectrino +	129
Figura III-14. Configuración del software Vectrino +	130
Figura III-15. Conversión de datos del software Vectrino +	131
Figura III-16. Interfaz del programa WinADV. Ejemplo de registro de velocidades durante 180 segundos.	132
Figura III-17. Instalación del Vectrino Sidelooking en el modelo	133
Figura III-18. Localización de la sección de análisis de velocidades	133
Figura III-19. Perfil de velocidades para un caudal de 191.34 l/s y una pendiente del modelo del 2%	134

Figura III-20. Esquema de discretización de subdominios para cada punto de velocidad en la sección de estudio. Situación sin desbordamiento de agua en las aceras	135
Figura III-21. Esquema de discretización de subdominios para cada punto de velocidad en la sección de estudio. Situación con desbordamiento de agua en las aceras	135
Figura III-22. Velocidades asociadas a cada subdominio o celda $i,j$ . Caudal real de 423.64 l/s y pendiente del 6%	136
Figura III-23. Área de cada subdominio o celda $i,j$ , y área hidráulica total. Caudal real de 423.64 l/s y pendiente del 6%	136
Figura III-24. Caudal en cada subdominio o celda $i,j$ y caudal calculado. Caudal real de 423.64 l/s y pendiente del 6%	137
Figura III-25. Calculo de coeficiente de Coriolis. Caudal real de 423.64 l/s y pendiente del 6%	139
Figura III-26. Calculo de coeficiente de Boussinesq. Caudal real de 423.64 l/s y pendiente del 6%	139
Figura III-27. Entrada de aire en las antenas receptoras para altas velocidades de flujo	141
Figura III-28. Isotacas en diferentes secciones transversales. Fuente: Hidráulica de canales abiertos (Chow, 1994)	141
Figura III-29. Isotacas de la sección de estudio (de aguas abajo a aguas arriba). Caudal de 384.43 l/s y pendiente longitudinal del 4% del modelo. Sección escalada verticalmente ( $E_v$ : 2:1). Velocidad en m/s	142
Figura III-30. Representación de la variabilidad de las velocidades medias de cada perfil en la sección de estudio, para los diferentes caudales ensayados y una pendiente longitudinal del 4% del modelo	143
Figura III-31. Representación de la variabilidad de los calados de cada perfil en la sección de estudio, para los diferentes caudales ensayados y una pendiente longitudinal del 4% del modelo	144
Figura III-32. Representación de la variabilidad del producto velocidad media por calado de cada perfil en la sección de estudio, para los diferentes caudales ensayados y una pendiente longitudinal del 4% del modelo	144
Figura III-33. Representación de la variabilidad del producto velocidad media al cuadrado por calado de cada perfil en la sección de estudio, para los diferentes caudales ensayados y una pendiente longitudinal del 4% del modelo	144
Figura III-34. Calzado utilizado en los ensayos con personas. a) y b) zapatos para chica y chico respectivamente, c) chanclas y d) botas de agua	147
Figura III-35. Determinación del coeficiente de rozamiento mediante una balanza de resorte	148
Figura III-36. Elementos utilizados en los ensayos. a) y b) casco y arnés de seguridad, y c) gafas para limitar la visibilidad	148
Figura III-37. Ejemplos de ensayos con las manos ocupadas	149

Figura III-38. Protocolo de ensayos	155
Figura III-39. Base de datos de los ensayos sobre estabilidad para peatones	157
Figura III-40. Ejemplos de inestabilidades de personas producidas durante los ensayos experimentales	160
Figura III-41. Representación de todos los casos evaluados según alta, media y baja peligrosidad, relacionando la raíz del producto velocidad por calado máximo y el producto peso por altura de las personas ensayadas	163
Figura III-42. Representación de todos los casos evaluados según alta, media y baja peligrosidad, relacionando la raíz del producto velocidad por calado medio y el producto peso por altura de las personas ensayadas	163
Figura III-43. Representación de los casos evaluados según peligrosidad alta, relacionando el producto velocidad por calado máximo y el producto peso por altura de las personas ensayadas	164
Figura III-44. Representación de los casos evaluados según peligrosidad alta, relacionando el producto velocidad por calado medio y el producto peso por altura de las personas ensayadas	164
Figura III-45. Representación de los casos evaluados según peligrosidad alta, así como los datos obtenidos por Russo (2009), relacionando el producto velocidad por calado máximo y el producto peso por altura de las personas ensayadas	165
Figura III-46. Representación de los casos evaluados según peligrosidad alta, así como los datos obtenidos por Russo (2009), relacionando el producto velocidad por calado medio y el producto peso por altura de las personas ensayadas	165
Figura III-47. Representación de la raíz cuadrada del producto ( $v \cdot y$ ) frente al producto ( $H \cdot P$ ) de los puntos de inestabilidad inferiores para cada sujeto ensayado en el presente estudio y en Abt <i>et al.</i> (1989)	166
Figura III-48. Representación de las condiciones hidráulicas (velocidad y calado máximo) que han generado situaciones de peligrosidad alta, definición de la función velocidad por calado máximo que delimita la zona de estabilidad y comparativa con el criterio habitual de seguridad para personas	167
Figura III-49. Representación de las condiciones hidráulicas (velocidad y calado medio) que han generado situaciones de peligrosidad alta, definición de las funciones velocidad por calado medio que delimitan el dominio de estudio y comparativa con el criterio habitual de seguridad para personas	167
Figura III-50. Representación de las condiciones hidráulicas (velocidad y calado máximo) que han generado situaciones de peligrosidad alta para personas de un peso en torno a 50 kg, definición de las funciones velocidad por calado máximo que delimitan el dominio de estudio y comparativa con los criterios de seguridad propuestos por Témez (1992), Nanía (1999) y Gómez (2001)	168
Figura III-51. Representación de las condiciones hidráulicas (velocidad y calado medio) que han generado situaciones de peligrosidad alta para personas de un peso en torno a 50 kg, definición de las funciones velocidad por calado	

medio que delimitan el dominio de estudio y comparativa con los criterios de seguridad propuestos por Témez (1992), Nanía (1999) y Gómez (2001)	169
Figura III-52. Combinación de los resultados de diferentes autores incluyendo los resultados de Russo (2009) y los propios del presente estudio, representando el producto velocidad por calado ( $v \cdot y$ ) frente al producto Altura por Peso ( $H \cdot P$ ) de las personas ensayadas. Se incluye la regresión lineal de los datos originales así como la modificada con la inclusión de los resultados de Russo (2009) y los obtenidos en este estudio y finalmente la regresión para los resultados de Russo (2009) y los obtenidos en este estudio. Fuente original: Cox <i>et al.</i> (2010)	170
Figura III-53. Valores del producto ( $v \cdot y$ ) indicando el nivel de peligrosidad como función de la altura (H) y peso (P) de la persona ensayada para todas las fuentes de datos experimentales, superponiendo los resultados de Russo (2009) y los propios del presente estudio. Fuente original: Cox <i>et al.</i> (2010)	172
Figura III-54. Rangos de peligrosidad propuestos como una función de calado y velocidad, comparados con los datos experimentales disponibles y superponiendo los resultados de Russo (2009) y los propios del presente estudio. Fuente original: Cox <i>et al.</i> (2010)	173
Figura IV-1. Inundación producida en Tenerife el 10 de octubre de 2014 ( $139.2 \text{ l/m}^2$ en unas 15 horas)	176
Figura IV-2. Principales fuerzas actuando sobre un vehículo estacionado y parcialmente sumergido	179
Figura IV-3. Líneas de corriente a través de un cuerpo sumergido. a) Situación laminar y b) situación turbulenta	179
Figura IV-4. Bombas de impulsión del laboratorio de hidráulica	183
Figura IV-5. Canal de pendiente variable	183
Figura IV-6. a) Vertedero de recirculación. b) Compuertas hacia vertedero triangular. c) Cuadro de control de compuertas	183
Figura IV-7. Vertedero triangular y limnómetro	184
Figura IV-8. Calibración del coeficiente de Manning del canal de pendiente variable y limnómetro para la toma de datos	184
Figura IV-9. Dominio de puntos de inestabilidad de vehículos analizado por la totalidad de autores considerados en este trabajo	185
Figura IV-10. Esquema del modelo de pendiente local diseñada para los ensayos de estabilidad de vehículos	186
Figura IV-11. Propuesta de puntos de ensayo en la zona de domino de régimen rápido. Escala de trabajo 1:18	187
Figura IV-12. Propuesta de puntos de ensayo en la zona de domino de régimen lento. Escala de trabajo 1:18	187
Figura IV-13. Plano detallado del modelo de pendiente local variable	188
Figura IV-14. Modelo de pendiente local variable construido y colocado aguas arriba del canal	189

Figura IV-15. Lámina de agua calculada del modelo físico de pendiente local variable. Condiciones de régimen rápido o supercrítico; Q: 2.96 l/s y 8% de pendiente	192
Figura IV-16. Localización de los puntos de medición experimental de calados	193
Figura IV-17. Comparación del modelo numérico con los calados tomados experimentalmente para Q=6.26 l/s	194
Figura IV-18. Comparación del modelo numérico con los calados tomados experimentalmente para Q=17.75 l/s	194
Figura IV-19. Ejemplo de cálculo del coeficiente de estabilidad para el vehículo Volvo XC70	196
Figura IV-20. Representación conjunta de las funciones límite de estabilidad propuestas por Shu <i>et al.</i> (2011)	198
Figura IV-21. Algunos vehículos a escala rellenos de espuma ligera	199
Figura IV-22. Vehículos a escala ensayados	201
Figura IV-23. Esquema de un vertedero triangular (a), vertedero real (b) y liminimetro (c)	202
Figura IV-24. Curva de caudales del vertedero. Caudales de ensayo y lecturas de vertedero	203
Figura IV-25. Indicador de abertura de la compuerta y nivel y lectura de limnómetro	203
Figura IV-26. Determinación del coeficiente de rozamiento neumático-terreno mediante una balanza de resorte	206
Figura IV-27. Determinación del coeficiente de rozamiento neumático-superficie mediante inclinación de la superficie	206
Figura IV-28. Determinación del coeficiente de rozamiento neumático-terreno de una rueda real, mediante una balanza de resorte	207
Figura IV-29. Recipiente para el ensayo de inestabilidad por flotación	208
Figura IV-30. Ejemplo de ensayos de inestabilidad por flotación	208
Figura IV-31. Modelos Mini Cooper a escalas 1:14, 1:18 y 1:24	211
Figura IV-32. Representación de los puntos de inestabilidad de los Modelos Mini Cooper a escalas 1:14, 1:18 y 1:24. Ajuste polinómico, a la izquierda, y ajuste a una función $(v \cdot y) = 0.45$ , a la derecha	213
Figura IV-33. Ajuste preliminar de los puntos de inestabilidad para los diferentes vehículos (1 de 2)	218
Figura IV-34. Ajuste preliminar de los puntos de inestabilidad para los diferentes vehículos (2 de 2)	219
Figura IV-35. Abanico de curvas de ajuste de todos los vehículos ensayados	220
Figura IV-36. Ajuste de los puntos de inestabilidad para los diferentes vehículos mediante la función $(v \cdot y)$ (1 de 2)	221
Figura IV-37. Ajuste de los puntos de inestabilidad para los diferentes vehículos mediante la función $(v \cdot y)$ (2 de 2)	222

Figura IV-38. Abanico de curvas V·Y de ajuste propuestas para todos los vehículos ensayados	223
Figura IV-39. Representación de la correlación lineal entre el valor de la constante de la curva (v·y) propuesta para cada vehículo y el coeficiente de estabilidad modificado asociado a cada uno de ellos	224
Figura IV-40. Esquema de la metodología general para determinación de la estabilidad de un vehículo cualquiera	225
Figura IV-41. Seat Ibiza, Citroën C4 y Seat León, de izquierda a derecha	226
Figura IV-42. Determinación gráfica del umbral (v·y) en función del SC <sub>mod</sub> , para el coche Seat Ibiza	226
Figura IV-43. Determinación gráfica del umbral (v·y) en función del SC <sub>mod</sub> , para el coche seat Ibiza	227
Figura IV-44. Representación de los puntos experimentales de Xia <i>et al.</i> (2013) frente a las curvas límite de estabilidad propuestas	228
Figura IV-45. Representación de los puntos experimentales de Shu <i>et al.</i> (2011) frente a las curvas límite de estabilidad propuestas	230
Figura IV-46. Comparativa entre el criterio propuesto en la Guía AR&R (Shand <i>et al.</i> , 2011) y estudios posteriores en relación a la inestabilidad de vehículos	232
Figura IV-47. Comparativa entre el criterio propuesto en la Guía AR&R (Shand <i>et al.</i> , 2011) y las curvas de estabilidad superior e inferior obtenidas en este estudio	233
Figura IV-48. Ajuste a la curva de vehículos grandes según clasificación de la Guía AR&R. Imagen del Volkswagen Jetta como vehículo con el SC <sub>mod</sub> más próximo al vehículo tipo	234
Figura IV-49. Ajuste a la curva de vehículos todoterreno según clasificación de la Guía AR&R. Imagen del Mitsubishi Montero/Pajero como vehículo con el SC <sub>mod</sub> más próximo al vehículo tipo	234
Figura V-1. Algunos de los resultados obtenidos por Buscariolo (2014)	239
Figura V-2. Parámetro de movilidad $\theta V$ frente número de Froude aplicado a los resultados de Xia <i>et al.</i> (2011) y de Shu <i>et al.</i> (2011). (Arrighi <i>et al.</i> , 2015)	240
Figura V-3. Mallado (izquierda) y resultados obtenidos (derecha) por Arrighi <i>et al.</i> (2015)	241
Figura V-4. Comparativa, para un mismo instante de tiempo, de los resultados numéricos (izquierda) y experimentales (derecha)	241
Figura V-5. Parámetro de movilidad adimensional frente a número de Froude para las inestabilidades de todos los estudios experimentales considerados. Arrighi <i>et al.</i> (2016)	244
Figura V-6. Malla computacional alrededor de la silueta del cuerpo humano. Arrighi <i>et al.</i> (2016)	245
Figura V-7. Algunos resultados de la simulación llevada a cabo para uno de los sujetos ensayados por Jonkman <i>et al.</i> (2008), con un calado de 0.35 m y una velocidad de 2.40 m/s. Arrighi <i>et al.</i> (2016)	245

Figura V-8. Momento normalizado frente al número de Froude para las inestabilidades de los ensayos experimentales considerados. Arrighi <i>et al.</i> (2016)	246
Figura V-9. Comparativa de los parámetros de movilidad frente a los productos ( $C_s \cdot Fr^2$ ) ó ( $C_t \cdot Fr^2$ ), determinados a partir de resultados numéricos, según si la inestabilidad es por vuelco o deslizamiento respectivamente. Arrighi <i>et al.</i> (2016)	246
Figura V-10. Modelo físico de la plataforma de ensayos de estabilidad para personas (a) y modelo numérico (b)	249
Figura V-11. Modelo físico de pendiente local (a) y modelo numérico (b) para el análisis de la estabilidad de vehículos	250
Figura V-12. Fluctuaciones de la velocidad debidas a la turbulencia	253
Figura V-13. Notación de mallado (izquierda) y localización de variables en una celda de malla (derecha) en Flow-3D	255
Figura V-14. Esquema método FAVOR	256
Figura V-15. Esquema método VOF	257
Figura V-16. Representación de los perfiles laminares y turbulentos de velocidad perpendicular a la pared	258
Figura V-17. Estructura y planos de malla (arriba), y celdas de 3cm en el bloque (abajo) para el modelo de plataforma de ensayos con personas	261
Figura V-18. Domain removing	262
Figura V-19. Ejemplo de condición de contorno de salida (Outflow) en la plataforma de ensayos con personas	263
Figura V-20. Introducción condición de contorno	263
Figura V-21. FAVORize de la condición inicial en Flow-3D	264
Figura V-22. Bloques de malla del modelo de plataforma de ensayos de estabilidad para personas	274
Figura V-23. Fuente de masa del modelo de plataforma de ensayos de peligrosidad para personas	275
Figura V-24. Condiciones de contorno impuestas en el modelo de plataforma de ensayos de peligrosidad para personas	275
Figura V-25. Condición inicial establecida en el modelo de plataforma de ensayos de peligrosidad para personas	275
Figura V-26. Probes colocadas en diferentes alturas según la posición de cada perfil de velocidades	276
Figura V-27. Variación de velocidades en cada punto del perfil I durante el tiempo de simulación	276
Figura V-28. Ajuste de perfiles de velocidad	277
Figura V-29. Variación de calados en la posición de cada perfil durante el tiempo de simulación	277
Figura V-30. Ajuste lineal de velocidades experimentales según $v(y)$ frente $\ln(y)$	279

Figura V-31. Activación de las fuerzas de presión y de corte sobre el peatón	279
Figura V-32. Silueta tridimensional de la persona tenida en cuenta en la simulación	280
Figura V-33. Silueta tridimensional de una persona ubicada en la sección de trabajo de la plataforma de ensayos realizada en Flow-3D	280
Figura V-34. Isotacas en las secciones donde el peatón pisa (desde aguas arriba a aguas abajo) obtenidas mediante Flow-3D. $Q=450\text{l/s}$ $I_y: 4\%$ $t=60\text{s}$ . Velocidades en metros por segundo	281
Figura V-35. Pérdida de estabilidad del sujeto ensayado, para 4% de pendiente longitudinal y un caudal de 450 l/s	281
Figura V-36. Vista tridimensional de una persona expuesta a un flujo de agua. Representación del calado y de la velocidad en la dirección longitudinal de la calle. Instante de simulación $t=30\text{s}$	281
Figura V-37. Vista tridimensional de una persona expuesta a un flujo de agua. Representación de la presión ejercida por el agua y de la velocidad en la dirección longitudinal de la calle. Instante de simulación $t=45\text{s}$	282
Figura V-38. Esquema de Fuerza y Momento ejercidos sobre un peatón	282
Figura V-39. Variación de: a) Fuerza de arrastre y b) Momento ejercido sobre el peatón, a lo largo del tiempo simulación	283
Figura V-40. Esquema de inestabilidad por deslizamiento propuesto por Nanía (1999)	284
Figura V-41. Fases durante la marcha de una persona caminando, reacción horizontal y vertical del terreno y ratio entre ellas (Haslam <i>et al.</i> , 2006)	285
Figura V-42. Configuración de los ensayos llevados a cabo por Manning <i>et al.</i> (1990)	286
Figura V-43. Test de laboratorio para determinar el rozamiento entre la suela del zapato y diferentes superficies, llevado a cabo por Wilson <i>et al.</i> (1985)	286
Figura V-44. Test de rampa SATRA para determinar el rozamiento entre la suela del zapato y diferentes superficies, llevado a cabo por Wilson <i>et al.</i> (1985)	287
Figura V-45. Obtención de $\mu$ a partir de la fuerza de arrastre del agua y el peso de la persona	288
Figura V-46. Fases de las simulaciones llevadas a cabo, relacionadas con la inestabilidad de vehículos	289
Figura V-47. Características del vehículo Mercedes Clase C (e: 1/18)	290
Figura V-48. Preparación del modelo de flotación en Flow-3D y recipiente utilizado en los ensayos experimentales	291
Figura V-49. Calibración hidrodinámica del modelo Flow-3D para un caudal de 6 l/s	293
Figura V-50. Validación hidrodinámica del modelo Flow-3D para un caudal de 17 l/s	293
Figura V-51. Caudales considerados para la verificación del punto de inestabilidad del modelo Mercedes Clase C en el modelo Flow-3D de pendiente local	294
Figura V-52. Configuración del modelo de pendiente local en Flow-3D	295



Figura V-53. Resultados de fuerzas hidrodinámicas ejercidas sobre el vehículo utilizando un modelo de turbulencia $\kappa-\varepsilon$	296
Figura V-54. Resultados de fuerzas hidrodinámicas ejercidas sobre el vehículo utilizando un modelo de turbulencia RNG	296
Figura V-55. Resultados de fuerzas hidrodinámicas ejercidas sobre el vehículo utilizando un modelo de turbulencia $\kappa-\omega$	297
Figura V-56. Resultados de fuerzas hidrodinámicas ejercidas sobre el vehículo para los tres modelos de turbulencia considerados	297
Figura V-57. Resultados de fuerzas hidrodinámicas ejercidas sobre el vehículo para un único bloque de malla. Simulaciones con tamaño de celda (cz) de 4 mm y de 3 mm	298
Figura V-58. Resultados de fuerzas hidrodinámicas ejercidas sobre el vehículo para dos bloques de malla. Bloque de mayor tamaño de celda para todo el dominio y bloque anidado alrededor del vehículo con menor tamaño de celda. Simulaciones con tamaños de celda de (8+4) mm y (6+3) mm	299
Figura V-59. Esquema del modelo simplificado	299
Figura V-60. Condiciones hidráulicas para evaluar la estabilidad del modelo Mercedes Clase C	300
Figura V-61. Esquema del modelo para evaluar la fuerza de empuje vertical exclusivamente por flotación	301
Figura V-62. Esquema del modelo para evaluar la fuerza de empuje vertical como combinación de fuerza de flotación y de ascensión	301
Figura V-63. Condiciones hidráulicas simuladas para evaluar el efecto de la fuerza de ascensión	302
Figura V-64. Simulación del ensayo de flotación del vehículo Mercedes Clase C, justo cuando empieza a perder el contacto con el suelo	302
Figura V-65. Representación del punto de inestabilidad experimental (Caso 4), el correspondiente numérico para el caudal de inestabilidad ( $Q=5.99$ l/s) y el par velocidad-calado obtenido para la simulación con un caudal un 20% inferior ( $Q=4.80$ l/s)	303
Figura V-66. Postproceso de velocidades para la simulación con el caudal de inestabilidad ( $Q=5.99$ l/s)	303
Figura V-67. Postproceso de calados para la simulación con el caudal de inestabilidad ( $Q=5.99$ l/s)	304
Figura V-68. Comparativa de un ensayo experimental con diferentes instantes de una simulación en Flow-3D	304
Figura V-69. Fuerzas actuantes sobre el vehículo Mercedes Clase C ( $e: 1/18$ ). Reproducción numérica del caso experimental 4, que produjo una inestabilidad del vehículo. Caudal de circulación de 5.99 l/s y una pendiente del modelo del 8%	305

Figura V-70. Fuerzas actuantes sobre el vehículo Mercedes Clase C (e: 1/18). Reproducción numérica del Caso 4 experimental, disminuyendo un 20% el caudal de circulación (4.80 l/s)	306
Figura V-71. Código fortran implementado para introducir la fuerza de rozamiento artificial al vehículo	307
Figura V-72. Fuerzas hidrodinámicas sobre el vehículo a escala 1:18, resultado obtenidas mediante simulación del modelo reducido. Punto 1: $v= 1.2$ m/s $y= 0.88$ cm	308
Figura V-73. Fuerzas hidrodinámicas sobre el vehículo a escala 1:18, resultado obtenidas mediante simulación del modelo reducido. Punto 2: $v= 1.6$ m/s $y= 0.66$ cm	308
Figura V-74. Fuerzas hidrodinámicas sobre el vehículo a escala 1:18, resultado obtenidas mediante simulación del modelo reducido. Punto 3: $v= 2.0$ m/s $y= 0.53$ cm	309
Figura V-75. Fuerzas hidrodinámicas sobre el vehículo a escala 1:18, resultado obtenidas mediante simulación del modelo reducido. Punto 4: $v= 1.0$ m/s $y= 0.70$ cm	309
Figura V-76. Fuerzas hidrodinámicas sobre el vehículo a escala 1:18, resultado obtenidas mediante simulación del modelo reducido. Punto 5: $v= 1.4$ m/s $y= 0.50$ cm	310
Figura V-77. Fuerzas hidrodinámicas sobre el vehículo a escala 1:18, resultado obtenidas mediante simulación del modelo reducido. Punto 6: $v= 1.8$ m/s $y= 0.39$ cm	310
Figura V-78. Comparativa de las fuerzas hidrodinámicas sobre el vehículo a escala 1:18 y sobre su prototipo (e:1/1). Punto 4: $v= 1.0$ m/s (4.24 m/s) $y= 0.70$ cm (12.6 cm)	311
Figura V-79. Evolución de la Fuerza de empuje vertical sobre el vehículo con la variación de la velocidad de aproximación. Influencia de la fuerza de ascensión con respecto el total de la fuerza de empuje vertical	312
Figura V-80. Aproximación del área proyectada del vehículo con respecto la dirección principal del flujo	313
Figura V-81. Ajuste a una función parabólica de los valores de fuerza de arrastre de cada simulación	314
Figura VI-1. Mapas de calados. $T= 1, 5, 10, 100$ y $500$ años	322
Figura VI-2. Localización de Badalona en España y Cataluña y Cartografía del municipio	323
Figura VI-3. Principales cursos de agua en Badalona (izquierda) y delimitación de subcuencas (derecha)	323
Figura VI-4. Inundación producida tras un fuerte evento de lluvia por falta de capacidad de la red de drenaje (izquierda). Comportamiento hidráulico del sistema de drenaje indicando en rojo las conducciones con sobrecarga (derecha)	324
Figura VI-5. Consecuencias de los vertidos (izquierda). Puntos de vertido (centro) y modelación de la dispersión de contaminantes en aguas de baño (derecha)	324

Figura VI-6. Representación de puntos de alta y media peligrosidad junto con los límites $(v \cdot y) = 0.22 \text{ m}^2/\text{s}$ y $(v \cdot y) 0.16 \text{ m}^2/\text{s}$ respectivamente	325
Figura VI-7. Criterio de rangos de peligrosidad propuesto para peatones	326
Figura VI-8. Ajuste lineal de los valores $(v \cdot y)_{\text{ajuste}}$ y $SC_{\text{mod}}$ para cada vehículo ensayado (izquierda) y definición gráfica de la metodología propuesta (derecha)	327
Figura VI-9. Criterio de rangos de peligrosidad propuesto para el vehículo de diseño	328
Figura VI-10. Distribución espacial de los niveles de vulnerabilidad establecidos en Badalona	330
Figura VI-11. Curvas de daños para vehículos desarrolladas por el USACE y consideradas en el presente caso de estudio	331
Figura VI-12. Curvas de daños para vehículos modificadas de las desarrolladas por el USACE	333
Figura VI-13. Curva de daños ponderada según el porcentaje de vehículos en Badalona	333
Figura VI-14. Pasos para el cálculo de daños tangibles directos propuestos por Merz <i>et al.</i> (2010)	334
Figura VI-15. Zona de detalle de Badalona. Fotografía aérea de 25 cm de resolución	335
Figura VI-16. Localización de las ocho zonas de análisis en Badalona	336
Figura VI-17. Detalle de las ocho zonas de estudio en Badalona y selección de los vehículos presentes	337
Figura VI-18. Patrones de ocupación de vehículos en Badalona	339
Figura VI-19. Celdas triangulares, resultado del cálculo hidrodinámico bidimensional. Cada celda almacena información hidráulica, entre otras variables el calado	340
Figura VI-20. Superficie vehicular asociada a una celda para la aplicación del método distribuido	341
Figura VI-21. Cruce de la delimitación de vehículos con las celdas que almacenan resultados de calados	341
Figura VI-21. Curva descriptiva del riesgo de inundación (Meyer <i>et al.</i> , 2009)	343
Figura VI-23. Mapas de peligrosidad y riesgo para peatones ( $T= 5$ años)	344
Figura VI-24. Mapas de peligrosidad y riesgo para peatones ( $T= 10$ años)	345
Figura VI-25. Mapas de peligrosidad y riesgo para peatones ( $T= 100$ años)	345
Figura VI-26. Mapas de peligrosidad y riesgo para peatones ( $T= 500$ años)	346
Figura VI-27. Detalle del mapa de peligrosidad de la zona más crítica para peatones ( $T= 500$ años)	347
Figura VI-28. Pendientes del terreno en el municipio de Badalona	347
Figura VI-29. Mapas de peligrosidad y daños/riesgo para vehiculos ( $T= 5$ años)	348
Figura VI-30. Mapas de peligrosidad y daños/riesgo para vehiculos ( $T= 10$ años)	349
Figura VI-31. Mapas de peligrosidad y daños/riesgo para vehiculos ( $T= 100$ años)	349

Figura VI-32. Mapas de peligrosidad y daños/riesgo para vehiculos (T= 500 años)	350
Figura VI-33. Curva Daño-Probabilidad para el municipio de Badalona. El área bajo la curva representa el Daño Anual Esperado (DAE) del municipio.	351

## **TABLAS**

Tabla I–1 Criterios de diseño del drenaje urbano en EEUU y en Europa	6
Tabla I–2 Probabilidad de ocurrencia de diferentes sucesos en función del número de años a tener en cuenta	13
Tabla I–3 Categorías de daños por inundación (Velasco <i>et al.</i> , 2012)	15
Tabla I–4 Características de enfoques macro, meso y micro de análisis de daños por inundación. Fuente: Messner <i>et al.</i> (2006)	16
Tabla I–5 Terminología propuesta por la Comisión Europea, en el documento Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management (European Commission, 2010)	20
Tabla I–6 Interpretación de las diferentes componentes del riesgo según el tipo de afectación: Personas, vehículos y propiedades	22
Tabla II–1 Calendario de actuaciones de la Directiva 2007/60/CE (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea)	25
Tabla II–2 Propuesta de actuaciones y calendario de la Directiva 2007/60/CE (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea)	26
Tabla II–3 Daño potencial ante inundaciones (Karvonen <i>et al.</i> , 2000)	43
Tabla II–4 Escala de daños propuesta por Kelman (2002)	44
Tabla II–5 Valores del factor de escombros para diferentes calados de inundación, velocidades y uso del suelo dominante	45
Tabla II–6 Peligrosidad referente a las personas como función de velocidad y calado (Ramsbottom <i>et al.</i> , 2006)	46
Tabla II–7 Criterio suizo de peligrosidad relacionado a algunos parámetros hidráulicos	46
Tabla II–8 Criterio de vulnerabilidad (Belleudy, 2004)	47
Tabla II–9 Características de las personas ensayadas	51
Tabla II–10 Comparativa entre los parámetros utilizados por diferentes autores en sus ensayos, Guía AR&R (Cox <i>et al.</i> , 2010)	54
Tabla II–11. Rangos de peligrosidad para niños muy pequeños, niños y adultos, según la guía AR&R (Cox <i>et al.</i> , 2010)	56
Tabla II–12 Resumen de los criterios de evaluación de peligrosidad basados en un calado máximo admisible del flujo	59
Tabla II–13 Resumen de los criterios de evaluación de peligrosidad basados en la consideración conjunta de los calados y velocidades del flujo	60
Tabla II–14 Resumen de los criterios de evaluación de peligrosidad para personas en zonas subterráneas	61
Tabla II–15 Características de los modelos utilizados y de sus prototipos	68

Tabla II-16 Resultados de los primeros ensayos llevados a cabo por Teo (2010)	69
Tabla II-17 Diferentes valores de parámetros en la fórmula de velocidad de arrastre [II-19]	74
Tabla II-18 Características de los modelos ensayados por Shu <i>et al.</i> (2011) y de sus prototipos	78
Tabla II-19 Parámetros obtenidos para los vehículo para formula de velocidad de arrastre	79
Tabla II-20 Características de los modelos ensayados por Xia <i>et al.</i> (2013) y de sus prototipos	82
Tabla II-21 Parámetros obtenidos en cada vehículo para la fórmula de velocidad de arrastre según orientaciones del vehículo	83
Tabla II-22 Características de los modelos ensayados por kramer <i>et al.</i> (2016) y de sus prototipos	89
Tabla II-23 Propuesta provisional para criterios de estabilidad de vehículos estacionados. Guía AR&R (Shand <i>et al.</i> , 2011)	96
Tabla II-24 Resumen de los criterios de evaluación de peligrosidad para los vehículos (experimentales y teóricos) (1 de 3)	98
Tabla II-25 Resumen de los criterios de evaluación de peligrosidad para los vehículos (experimentales y teóricos) (2 de 3)	99
Tabla II-26 Resumen de los criterios de evaluación de peligrosidad para los vehículos (experimentales y teóricos) (3 de 3)	100
Tabla II-27. Resumen de los criterios de evaluación de peligrosidad para los vehículos (directrices y recomendaciones)	102
Tabla II-28 Distribución de vehículos por tipología y antigüedad	110
Tabla II-29 Daños al vehículo según niveles de calados. Dimensiones en pies	110
Tabla II-30 Porcentaje de daños según calado de agua para los cinco tipos de vehículos considerados por el USACE	114
Tabla II-31 Resumen de las características de las curvas de daños para vehículos descritas	115
Tabla III-1 Descripción de los grados de peligrosidad propuestos por Russo (2009)	120
Tabla III-2 Determinación de los caudales reales proporcionados por las bombas	126
Tabla III-3 Pendientes y caudales ensayados para determinar el campo de velocidades en la sección de estudio	134
Tabla III-4 Errores en los caudales y coeficientes de Coriolis y Boussinesq calculados para los diferentes casos de estudio	140
Tabla III-5 Velocidades medias y calados en la posición de cada perfil	142
Tabla III-6 Resultados de las variables hidráulicas representativas para cada caso de estudio	146
Tabla III-7 Coeficientes de rozamiento determinados experimentalmente	148

Tabla III-8 Listado detallado de combinaciones de estudio, para los ensayos con personas	149
Tabla III-9 Características de las personas ensayadas	150
Tabla III-10 Sesiones experimentales llevadas a cabo	151
Tabla III-11 Combinaciones llevadas a cabo para cada persona, en cada una de las sesiones para los niveles de caudal de 300 l/s y 375 l/s	152
Tabla III-12 Combinaciones llevadas a cabo para cada persona, en cada una de las sesiones para los niveles de caudal de 450 l/s y 550 l/s	154
Tabla III-13 Cantidad de casos según el nivel de peligrosidad evaluado	158
Tabla III-14 Casos en los que se han producido situaciones de peligrosidad alta	158
Tabla III-15 Reparto de las situaciones de peligrosidad alta según los diferentes casos de estudio	161
Tabla III-16 Resumen de los resultados de las encuestas realizadas a las personas ensayadas	161
Tabla III-17. Rangos de peligrosidad para niños muy pequeños, niños y adultos, según la Guía AR&R (Cox <i>et al.</i> , 2010)	171
Tabla IV-1 Calados experimentales en los 9 puntos de comprobación	193
Tabla IV-2 Muestra de vehículos representativos, características físicas y coeficiente de estabilidad	196
Tabla IV-3 Características de los vehículos estudiados por Shu <i>et al.</i> (2011)	198
Tabla IV-4 Características de los modelos de vehículos seleccionados para los ensayos de estabilidad	200
Tabla IV-5 Coeficientes de rozamiento entre neumático y superficie del modelo de ensayos, determinado experimentalmente	207
Tabla IV-6 Calado de agua causante de la inestabilidad por flotación para los diferentes coches ensayados	209
Tabla IV-7 Validación del calado de flotación de los diferentes modelos ensayados	209
Tabla IV-8 Modelos Mini Cooper a diferentes escalas, ensayados para comprobar la influencia de los efectos de escala	211
Tabla IV-9 Puntos de inestabilidad para modelo Mini Cooper (e:1/24)	212
Tabla IV-10 Puntos de inestabilidad para modelo Mini Cooper (e:1/18)	212
Tabla IV-11 Puntos de inestabilidad para modelo Mini Cooper (e:1/14)	213
Tabla IV-12 Puntos de inestabilidad para modelo BMW 650 (e:1/14)	214
Tabla IV-13 Puntos de inestabilidad para modelo BMW i3 (e:1/14)	214
Tabla IV-14 Puntos de inestabilidad para modelo Mercedes Glá (e:1/14)	214
Tabla IV-15 Puntos de inestabilidad para modelo Mercedes Clase C (e:1/18)	215
Tabla IV-16 Puntos de inestabilidad para modelo Range Rover Evoque (e:1/14)	215

Tabla IV–17 Puntos de inestabilidad para modelo Porsche Cayenne Turbo (e:1/14)	215
Tabla IV–18 Puntos de inestabilidad para modelo Bentley Continental GT Speed (e:1/18)	216
Tabla IV–19 Puntos de inestabilidad para modelo Volkswagen Touareg (e:1/14)	216
Tabla IV–20 Puntos de inestabilidad para modelo BMW X6 (e:1/14)	216
Tabla IV–21 Puntos de inestabilidad para modelo Audi Q7 (e:1/14)	217
Tabla IV–22 Puntos de inestabilidad para modelo Mercedes G55 AMG (e:1/14)	217
Tabla IV–23 Valores de coeficientes de estabilidad modificados ( $SC_{mod}$ ) para cada vehículo y constante del mejor ajuste de la curva ( $v \cdot y$ ) para los puntos de inestabilidad para cada vehículo	223
Tabla IV–24 Dimensiones y pesos del modelo Citroën C4, Seat León y Seat Ibiza (año 2015)	226
Tabla IV–25 Coeficientes de estabilidad, calados de flotación y umbrales de estabilidad para los vehículos considerados	227
Tabla IV–26 Características de los vehículos estudiados por Xia <i>et al.</i> (2013)	228
Tabla IV–27 Características de los vehículos estudiados por Shu <i>et al.</i> (2011)	229
Tabla IV–28 Propuesta provisional para criterios de estabilidad de vehículos estacionados	231
Tabla V–1 Coeficientes de rozamiento determinados experimentalmente	283
Tabla V–2 Ubicación de los puntos de calibración en el modelo de pendiente local	292
Tabla V–3 Resultados de la calibración hidrodinámica del modelo Flow-3D para un caudal de 6 l/s	292
Tabla V–4 Resultados de la validación hidrodinámica del modelo Flow-3D (Q= 17 l/s)	292
Tabla V–5 Resultados experimentales. Variables hidráulicas que produjeron el desplazamiento (inestabilidades) del vehículo Mercedes Clase C	294
Tabla V–6 Simulaciones propuestas para el modelo simplificado de estabilidad de vehículos (Fase 3)	300
Tabla VI–1 Criterios adoptados para los tres niveles de peligrosidad para peatones	328
Tabla VI–2 Criterios adoptados para los tres niveles de peligrosidad para vehículos.	329
Tabla VI–3 Niveles de riesgo en función de los niveles de peligrosidad y vulnerabilidad	330
Tabla VI–4 Porcentaje de daños según calado de agua para los cinco tipos de vehículos considerados por el USACE. Valores considerados en el presente caso de estudio	331
Tabla VI–5 Características promedio de los diferentes grupos de vehículos considerados	332
Tabla VI–6 Características de las zonas evaluadas y porcentaje de ocupación de vehículos en cada una	338
Tabla VI–7 Comparativa de la valoración económica del método distribuido frente al completo	342



Tabla VI-8 Probabilidades y daños para las inundaciones derivadas de las diferentes lluvias de diseño consideradas

350

## *Capítulo I*

# *Introducción y objetivos*

### **I.1. Introducción histórica. La disciplina de la Hidrología Urbana**

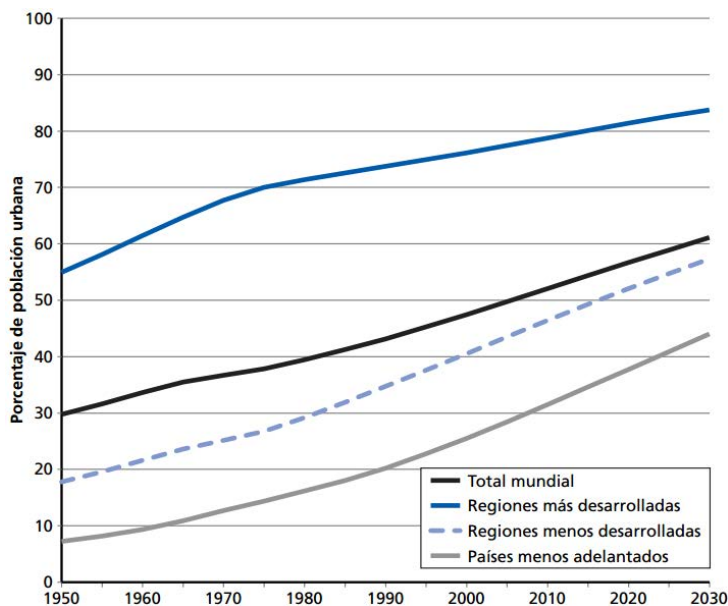
Durante el siglo XIX el impulso de la construcción de redes de alcantarillado fue considerable en muchas ciudades de diversos países. La relación de la gran mortalidad, debida a enfermedades endémicas, y la generación de aguas residuales era evidente, de ahí el gran impulso en la construcción de redes de evacuación de estas aguas residuales. Hasta mitad del siglo XX se construyeron las redes que hoy en día conocemos como redes unitarias, encargadas de evacuar no solo las aguas residuales, sino también las pluviales. Obviamente, en sus orígenes, los criterios de diseño de estas redes distaban en gran medida de los actuales, ya que se trataba de nuevos servicios urbanos y requerían de una mayor experiencia para establecer las maneras más adecuadas para diseñar estas redes.

El gran y rápido aumento de la población durante la segunda mitad del siglo XX (Figura I-1), junto con la disminución de la mortalidad debida, en parte, a las mejoras sanitarias producidas por las redes de drenaje, llevó al crecimiento de las áreas urbanas y, con ello, al déficit de las infraestructuras de drenaje. En 1950 la población urbana representaba el 29.1% de la población mundial y el año 2005 se alcanzó la cifra del 48.7%. Actualmente ya se ha superado el umbral del 50% y las proyecciones de futuro en un escenario de crecimiento medio indican que el año 2030 la población urbana puede llegar al 60% del total de la población mundial. Un rápido crecimiento urbano conlleva, entre otros temas, una degradación ambiental, falta de servicios urbanos y sobrecarga de la infraestructura existente.

Esta nueva situación ocasionaba inundaciones, por falta de capacidad de las redes existentes hasta ese momento, y derivó en una mayor implicación e interés por esta problemática. A partir de ese momento se aplicaron conceptos de la hidráulica y la hidrología como herramientas para el dimensionamiento de las redes de drenaje, aplicando criterios que originariamente no se tenían en cuenta.

Se puede decir, por tanto, que a partir de entonces surgió una nueva disciplina que actualmente se conoce como hidrología urbana. Desde entonces esta disciplina no ha dejado de evolucionar, puesto que las áreas urbanas, con una gran densidad de población frente a las áreas rurales,

requieren de necesidades esenciales como la seguridad, la higiene y el bienestar en general. En dicha evolución, han ido apareciendo otros temas no exclusivamente relacionados con el drenaje propiamente, sino con la contaminación de las aguas residuales. Desde los años ochenta se impulsaron los estudios relacionados con la calidad del drenaje urbano (carga contaminante de las aguas residuales), añadiéndose así un enfoque ambientalista, de cara a minimizar las afectaciones a los medios receptores de estas aguas drenadas. Hoy en día los métodos de tratamiento de la contaminación de las aguas residuales y pluviales son un tema de primer orden en el drenaje urbano.



**Figura I-1.** Tendencias mundiales de la urbanización: Distribución regional, 1950-2030 (Sadik, 1999)

En la actualidad, tras un gran proceso de evolución, la hidrología urbana es una disciplina contemplada y aplicada a nivel mundial. Habiéndose alcanzado una elevada madurez, en las diferentes ciudades del mundo, aunque de manera no homogénea, se aplican criterios de seguridad en el dimensionamiento de las redes de drenaje. Estos criterios están relacionados con el periodo de retorno asociado a una lluvia determinada. Además, se recogen datos de lluvia que permiten el análisis de series temporales y se dispone de muchas herramientas informáticas que facilitan las tareas de dimensionamiento de las redes de drenaje. También se ha avanzado mucho en temas como depósitos de retención o de laminación, bombes en redes de drenaje y alternativas para drenaje sostenible (Aumento de la infiltración, bandas verdes...) (Figura I-2), campos de los que se ocupa la hidrología urbana. Otros aspectos menos estudiados, pero de esencial importancia, es el análisis de los efectos de la escorrentía en calles (agua no captada por los imbornales o devuelta desde la red) sobre los peatones y el resto de elementos de una ciudad.

En definitiva, la hidrología urbana, durante su evolución, ha ido adquiriendo varios objetivos: higiénicos, hidráulicos y ambientales. Otros aspectos como la seguridad en las ciudades, cuando se producen inundaciones, deben ser considerados también hoy en día por esta disciplina. El aumento de las zonas urbanas, junto con las consecuencias del cambio climático, agrava las inundaciones urbanas y refuerza el interés por garantizar la seguridad en las ciudades de todo el mundo.



**Figura I-2.** Ejemplos de bandas verdes. Drenaje sostenible

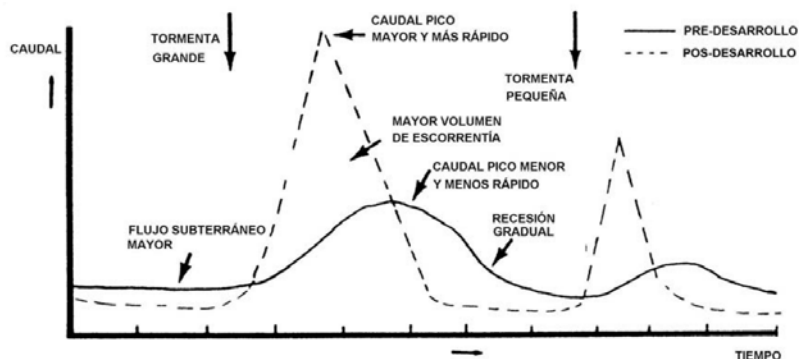
## I.2. La urbanización y el proceso de escorrentía

Las dos características más importantes de una cuenca urbana, en comparación con una rural, son el elevado porcentaje de superficie impermeable y la existencia de una red de drenaje artificial con puntos localizados de entrada de agua (rejas de imbornal). Por lo tanto, en el caso de una cuenca urbana, además de tener en cuenta el relieve superficial, hay que contar también con la red de drenaje, que puede no tener la misma pendiente o dirección de drenaje que el terreno.

Las escalas de trabajo también son diferentes, pues espacialmente el orden de magnitud habitual es de hectáreas en cuencas urbanas frente a kilómetros cuadrados y las escalas temporales son mucho más cortas, pues los sucesos de lluvia críticos tienen duraciones de pocas horas y, consecuentemente, los intervalos de tiempo de estudio son del orden de minutos.

Además de estas características, para entender la actual problemática del drenaje urbano, hay que tener en cuenta el crecimiento notable del número de habitantes en las ciudades españolas (en Barcelona y su área de influencia, por ejemplo) en las últimas décadas. Este rápido crecimiento de la población se ha hecho especialmente patente en algunos municipios en los últimos años, debido a la elevada densidad urbana y la falta de suelo edificable en algunas ciudades, creándose movimientos migratorios muy importantes. La elevada demanda de viviendas en estos municipios (cerca de grandes urbes, generalmente) está produciendo una mayor urbanización del suelo de los mismos. Como resultado de este proceso, como ya se introducía en el apartado anterior, las redes de drenaje se ven obligadas a soportar nuevas cargas para las que no estaban dimensionadas inicialmente.

Estas nuevas cargas son debidas, precisamente, a los efectos de la nueva urbanización, que se traduce en un aumento de las superficies impermeables (aceras de hormigón, pavimentos bituminosos y edificaciones), con la consecuente reducción de las pérdidas hidrológicas y de la rugosidad del terreno, lo que conduce a un aumento del volumen total de escorrentía (Figura I-3). La consecuencia es un flujo de agua que discurre con mayor rapidez y una pérdida de la capacidad de laminación natural de la cuenca, dando lugar a caudales punta mayores y con tiempos de concentración menores.



**Figura I-3.** Hidrograma de respuesta de una cuenca menos urbanizada (pre-desarrollo) y más urbanizada (pos-desarrollo)

Si además se localiza este fenómeno urbanístico en el litoral mediterráneo, caracterizado por una pluviometría de lluvias muy intensas en cuencas pequeñas y con pendientes elevadas, que generan gran cantidad de escorrentía superficial, los fenómenos se combinan provocando frecuentes inundaciones con todos los daños materiales y pérdidas económicas (e incluso vidas humanas) que esto conlleva.

Por las características de cuenca urbana y el continuo crecimiento de las ciudades, resulta necesario conocer la dinámica de la escorrentía superficial en las calles para determinar los niveles de agua y velocidades máximas que se pueden alcanzar. La evolución de la hidrología urbana lleva a contemplar hoy en día, no solo el correcto dimensionamiento de la red de drenaje, sino también garantizar la seguridad de los peatones y del resto de elementos urbanos que se ven expuestos a la escorrentía que circula por las calles.

### I.3. Concepto de drenaje dual

Tradicionalmente el estudio de la escorrentía en redes de calles se ha centrado en la transformación lluvia-escorrentía así como en la evacuación de esta agua una vez captada a través de colectores, sin centrarse en su captación, pues se ha dado por hecho que ésta se producía a través de las rejas e imbornales de manera casi automática. Sin embargo, los problemas que se han generado en el transcurso de los años han puesto de manifiesto que este hecho no es así, por lo que otro motivo del aumento de la escorrentía en las calles es la insuficiente importancia que se le ha dado a las obras de drenaje superficial en la urbanización. Este desconocimiento de la captación de escorrentía ha provocado que en muchas ocasiones se haya desembocado en la filosofía de colocación de rejas por densidad espacial, es decir, colocación de un número determinado de rejas en función del número de hectáreas a urbanizar, sin pensar en el tipo de reja a colocar ni su distribución, la cual, en algunas ocasiones, atiende más a requisitos estéticos que funcionales. En consecuencia, ya en superficie se produce un mal funcionamiento de la captación de agua.

Se podría plantear una solución a estos problemas que pasara por la ampliación de los colectores o del número de rejas. Sin embargo, dadas las grandes afectaciones de estas actuaciones (molestias ocasionadas a la población, tanto a transeúntes como a vehículos) es muy difícil llevarlas a la práctica.

Durante episodios de lluvia intensa, bien sea por unos motivos u otros, el aumento del flujo de agua en las calles puede llegar a transformarse en una gran corriente de agua cuyos calados y velocidades pueden llegar a ser peligrosos para la seguridad de peatones y la circulación de vehículos. Por esta razón es importante conocer los calados y velocidades máximas que pueden alcanzarse en las calles en relación con una tormenta de un determinado período de retorno y valorar las posibles consecuencias. Además, esta información puede ayudar en gran medida a localizar las zonas donde podría ser necesario un redimensionamiento del sistema de drenaje y donde sería más urgente o prioritario.

Existen claros ejemplos cercanos de situaciones de peligro producidas por eventos de lluvia, como los acaecidos en Barcelona el sábado 30 de julio de 2011 (Figura I-4), produciéndose una lluvia de unos 30 mm de media y una intensidad máxima de 140.4 mm/h.



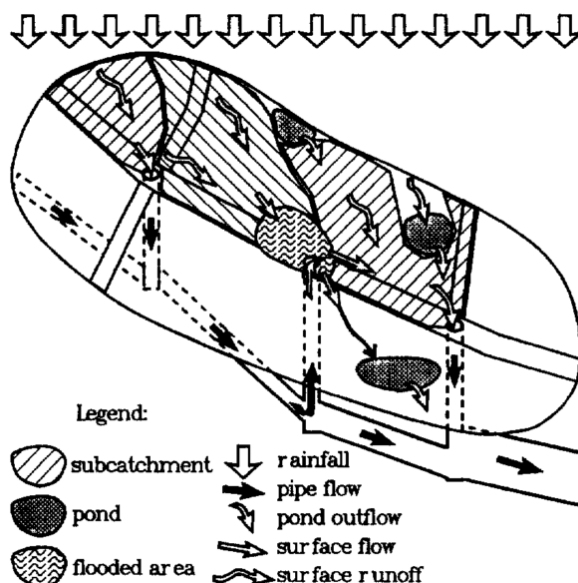
**Figura I-4.** Sábado 30/07/2011 en Barcelona. Evento de lluvia de hasta 58 mm en algunos puntos de la ciudad con intensidad máxima de 140 mm/h

Debido a dicho evento, aparte de llenar prácticamente varios depósitos de retención situados en Barcelona, Escuela Industrial (84%), calle Urgell (78%) y parque Joan Miró (74%), se produjeron caídas de árboles, inundaciones de bajos y afectaciones en instalaciones eléctricas. Además se produjeron problemas de tráfico, averías en semáforos, afectaciones en varias líneas de metro (grandes filtraciones), grandes charcos en carreteras que supusieron kilómetros de retenciones y accidentes, y averías en catenarias de trenes que supuso la evacuación de pasajeros.

Estas son algunas de las consecuencias que un evento de lluvia puede producir en una ciudad como Barcelona. Como ya se ha comentado, el correcto dimensionamiento de la red de drenaje no garantiza que en las calles no se produzca una escorrentía con un alto grado de peligrosidad y que genere grandes daños, pues la capacidad de la red de drenaje puede ser insuficiente, según el nivel de seguridad asumido, para el evento de lluvia producido, o la captación de los imbornales no es lo eficiente que debiera ser (quizá mala ubicación de las rejillas o demasiadas rejillas tapadas por suciedad, vehículos sobre ellas...).

El estudio de la escorrentía en redes de calles también debería ser analizado para poder complementar la modelación del flujo en un sistema de drenaje pluvial. Porque ante un correcto dimensionamiento de la red de drenaje y una correcta eficiencia de las rejillas de imbornales, podemos y debemos preguntarnos: ¿Qué sucede en superficie cuando se supera el nivel de seguridad adoptado? De esta manera, surge el concepto de drenaje dual (Wisner, 1985; Djordjevic *et al.*, 1999; Nasello *et al.*, 2005; Concha *et al.*, 2009; Nanía *et al.*, 2015), que considera el agua

generada por la lluvia moviéndose en dos planos paralelos, uno subterráneo formado por el sistema de drenaje convencional soterrado y uno superficial formado por la red de calles, ambos interconectados por medio de imbornales y donde se permite el libre intercambio de flujo entre ambos planos y en todo momento (Figura I-5). Esto es lo que sucede realmente y por lo tanto, una modelación de este tipo permitiría un análisis más riguroso del drenaje urbano.



**Figura I-5.** Esquema de sistema de alcantarillado y calle. Drenaje dual (Djordjevic *et al.*, 1999)

Utilizando este concepto, si un sistema de drenaje es insuficiente para conducir toda la escorrentía que se genera en superficie, sería posible contar con una capacidad adicional del sistema que brindaría una conducción controlada del agua por las calles, pudiéndose evitar quizá una costosa obra de rehabilitación. Para que esto sea posible se debe demostrar, a través de la modelación del flujo en las calles, que el agua que no entra en el sistema produce calados y velocidades que no superan ciertos límites impuestos como criterios de diseño (baja peligrosidad), o que la duración de la situación no es importante.

Se puede realizar, en este sentido, una sencilla diferenciación entre los criterios de diseño adoptados en Europa y en Estados Unidos. En Europa la elección de un nivel de seguridad se asocia al funcionamiento de la red de drenaje/alcantarillado, y en cambio en EEUU se utiliza un doble criterio, seguridad en la red y seguridad de la superficie de la ciudad (Tabla I-1).

**Tabla I-1** Criterios de diseño del drenaje urbano en EEUU y en Europa

Criterios de diseño EEUU	Criterios de diseño Europa
Primer nivel de seguridad/diseño, asociado a infraestructura de drenaje, entre 10 y 25 años de periodo de retorno.	Nivel de seguridad centrado en la infraestructura de alcantarillado.
Segundo nivel, desagüe para caudales de periodo de retorno de 100 años.	Periodo de retorno entre 2 y 50 años
Drenaje compuesto (drenaje dual)	Países nórdicos con valores más bajos, incorporando el agua en el diseño urbano (calles como elementos de transporte)

Parece, por tanto, que el drenaje dual, sin ser un concepto ampliamente extendido en Europa, presenta una gran importancia y es requerido para estimar los efectos de los sucesos de lluvia en la superficie urbana. Una ciudad diseñada y preparada para resistir el impacto producido por una inundación es una ciudad resiliente para ese tipo de sucesos.

Tal y como define la Unidad de Desarrollo Urbano y Gobierno Local del Banco Mundial, en su documento “Urban Risk Assessments: An Approach for Understanding Disaster & Climate Risk in Cities” (The World Bank, 2011), el concepto general de resiliencia es la habilidad de un sistema para resistir o acomodarse a las fuerzas y sobresaltos debidos a impactos, mientras el sistema sigue manteniendo su función. Desde el punto de vista urbano, resiliencia dependerá de la habilidad para mantener los bienes esenciales, así como asegurar acceso a servicios y funciones que generan el bienestar de los ciudadanos.

#### I.4. Discusión sobre el concepto de riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad

Se ha comentado anteriormente que los eventos de lluvia producidos en las ciudades pueden ocasionar daños, los cuales no solo son materiales sino que también pueden afectar a las personas. Un correcto dimensionamiento de las redes de alcantarillado, y una buena eficiencia de las rejillas de los imbornales (Russo, 2009) es imprescindible, pero la escorrentía que circula por la superficie urbana debe ser analizada y conocida, tal y como propone el concepto de drenaje dual. En la literatura se hace referencia en muchas ocasiones al concepto riesgo, en relación a unas inundaciones producidas por un evento de lluvia, pero parece que se produce cierta confusión de términos y en este apartado introductorio se pretende llevar a cabo una discusión al respecto.

La palabra riesgo tiene un amplio rango de significados, relacionándose con conceptos de seguridad, economía, medio ambiente y aspectos sociales. En el ámbito de estudio en el que estamos, se relaciona al riesgo con el riesgo de inundación; entendiendo inundación a la cobertura temporal del territorio por el agua fuera de sus confines usuales. En definitiva el riesgo de inundación tiene como causas principales la lluvia, la geomorfología y la ocupación del territorio.

El modelo conceptual Source-Pathway-Receptor-Consequence (S-P-R-C) (Fleming *et al.*, 2001; Fleming, 2002) define de forma detallada las relaciones del término riesgo, pasando por diferentes conceptos intermedios hasta llegar a él (Figura I-6). Los pasos previos “fuente”, “camino” y “receptor” se refieren al proceso físico, mientras que la evaluación de las (negativas) consecuencias es un problema de valores sociales. Fleming *et al.* (2001) remarcaron la importancia de utilizar una terminología apropiada y consistente, definiendo el riesgo como la exposición a una peligrosidad de inundación. En ocasiones se define el riesgo como el **producto de la peligrosidad por las consecuencias**, como por ejemplo el Gobierno de Queensland (Australia) (Government of Queensland, 2014) que no entiende el riesgo sin la consideración de las consecuencias (exposición y vulnerabilidad) derivadas de la inundación (Figura I-7). En cambio, según terminología de la oficina de las Naciones Unidas el riesgo de inundación surge de la convolución de la peligrosidad de inundación y la vulnerabilidad a inundaciones. En este segundo caso el riesgo se entendería como el **producto peligrosidad por vulnerabilidad**.

En la literatura no parece haber discrepancias en cuanto a la forma de entender la peligrosidad. La peligrosidad se produce ante cualquier evento natural amenazante, en este caso las inundaciones debidas a sucesos de lluvia, y no indican la ocurrencia de daños sino la posibilidad



de éstos. El concepto de peligrosidad incluye su probabilidad o frecuencia y su magnitud o intensidad, por tanto la hidráulica y la hidrología aportan las respuestas hasta la evaluación de la peligrosidad.

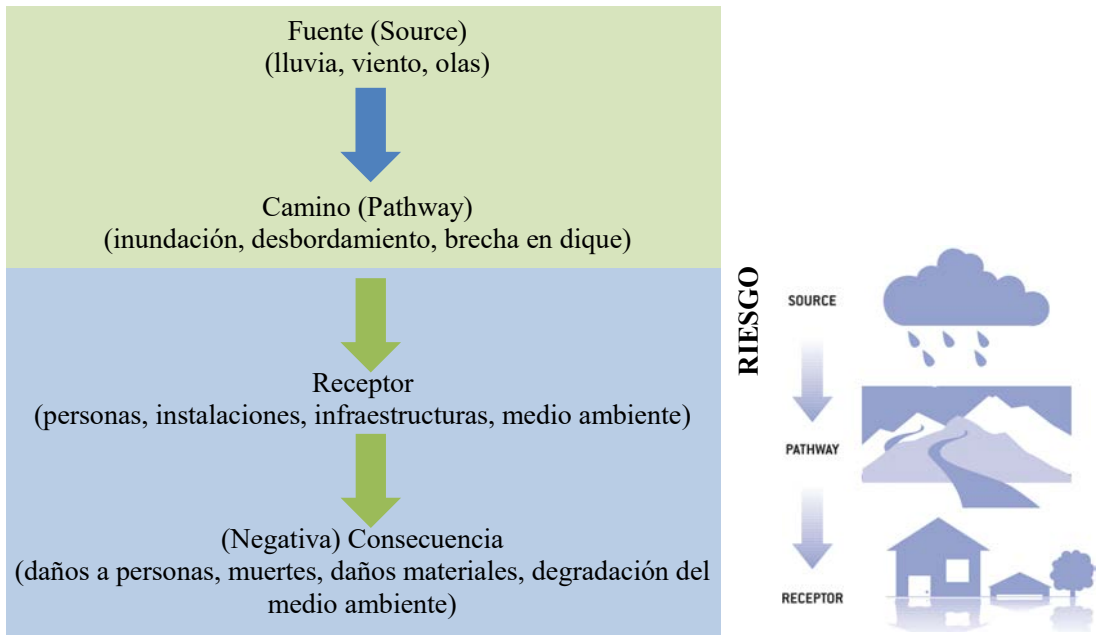


Figura I-6. Modelo conceptual S-P-R-C (Fleming *et al.*, 2001; Fleming, 2002)

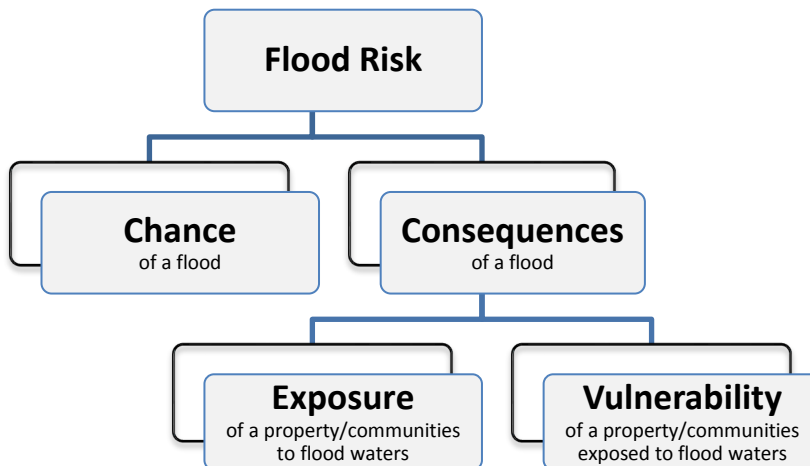
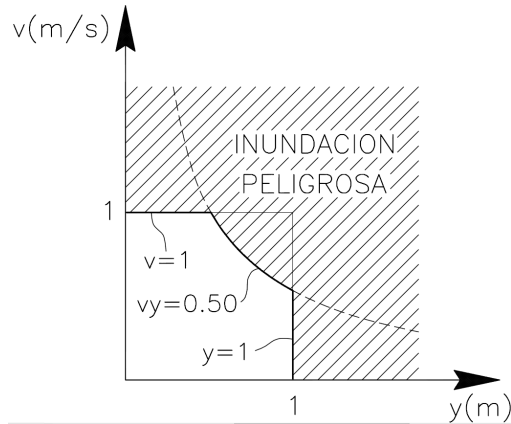


Figura I-7. Componentes del Riesgo de inundación según el Gobierno de Queensland (Australia) (Government of Queensland, 2014)

En general, en la literatura, parece haber un consenso en que las principales variables hidráulicas que intervienen en la evaluación de la peligrosidad son la velocidad, el calado e incluso el tiempo de exposición, aunque esta última en inundaciones urbanas no es significativa. Por tanto,

se puede decir que la determinación de la peligrosidad es posible con suficiente objetividad. En la Figura I-8 se muestra un ejemplo de gráfica, con aplicación para llanuras de inundación en ríos, donde se distingue entre inundación peligrosa y no peligrosa para personas, en base a las variables hidráulicas de velocidad y calado.



**Figura I-8.** Condiciones de calado ( $y$ ) y velocidad ( $v$ ) peligrosas para personas (Témez, 1992)

Este criterio, propuesto por Témez (1992), se utiliza en la definición de una zona de inundación peligrosa. El autor define la zona de inundación peligrosa, como aquella en donde existe serio riesgo de pérdidas humanas o graves daños personales. Para que una zona merezca tal calificativo, según Témez (1992), deben darse las condiciones desfavorables de calado y velocidad del flujo que se definen en la Figura I-8. Se observa en este caso cómo tal definición se aleja de las propuestas más actuales, que tratan de distinguir el concepto de riesgo del de peligrosidad.

En cuanto a la forma de entender el concepto de vulnerabilidad, se presentan diferentes puntos de vista, puesto que en este caso entra en juego en mayor medida la subjetividad. Sarewitz *et al.* (2003) describen el término vulnerabilidad como aquel que se refiere a las características inherentes a esos elementos que determinan su potencial para ser dañados. A su vez, clasifican la vulnerabilidad en tres grupos: social/cultural, económica y ecológica. La primera se refiere a la pérdida de vidas, impactos sobre la salud de las personas (lesiones), pérdida de vitalidad, estrés, impactos sociales, pérdidas de artículos personales y pérdida de patrimonio cultural. La segunda se refiere a pérdidas económicas directas o indirectas a causa de daños a propiedades, bienes, reducción de la productividad y esfuerzos de socorro. El último grupo se refiere a la contaminación de las aguas, suelos y sistemas ecológicos.

Otros autores contemplan que la vulnerabilidad se compone de dos elementos, la exposición (o daño potencial) y (pérdida) susceptibilidad (Merz *et al.*, 2007). En esta última definición el concepto exposición forma parte de la vulnerabilidad, lo que llevaría a definir el riesgo como producto de la peligrosidad por la vulnerabilidad. Thywissen (2006) define la vulnerabilidad como la susceptibilidad a daños físicos o emocionales.

En el documento “Urban risk assessments. An approach for understanding disaster and climate risk in cities” llevado a cabo por The World Bank (2011) proponen unas guías para la evaluación de la exposición y de la vulnerabilidad, considerando ambos como variables independientes, propio de la definición conceptual de riesgo como producto de peligrosidad por consecuencias:

- **Evaluación de la exposición de personas y bienes físicos.** Un análisis del planeamiento urbano o cambios del uso del suelo puede proporcionar buena información como patrón de asentamientos y definir qué zonas y poblaciones de la ciudad están expuestas a peligrosidades o impactos potenciales del cambio climático. Diferentes factores contribuyen al asentamiento de las personas en zonas de alto riesgo. Algunos de estos factores pueden ser: patrones de urbanizaciones existentes, usos del suelo y políticas de zonificación, inmigración de personas del campo o pobres, y la disponibilidad de tierra para el desarrollo de nuevos asentamientos. La localización de bienes físicos importantes, tales como carreteras, suministros de agua y redes de saneamiento, canales de drenaje, líneas eléctricas y telefónicas, y hospitales, debería ser incluida en este asentamiento y de la misma manera geo-referenciarlos si es posible.
- **Evaluación de la vulnerabilidad.** El grado de la vulnerabilidad física o daño potencial en el que un bien o comunidad puede incurrir ante un cierto evento puede ser estimado. Como punto de inicio, en ciudades oficiales se pueden determinar las zonas de alta concentración de gente bajo el umbral de la pobreza, cuyos edificios en la ciudad son viejos o de baja calidad, si la ciudad tiene un sistema de alerta temprana y mecanismos para apoyar su eficiencia, y la extensión a la que el patrón de desarrollo de la ciudad está evitando las zonas propensas a peligrosidades.

Otros factores que deben ser considerados en la evaluación de la vulnerabilidad son los siguientes:

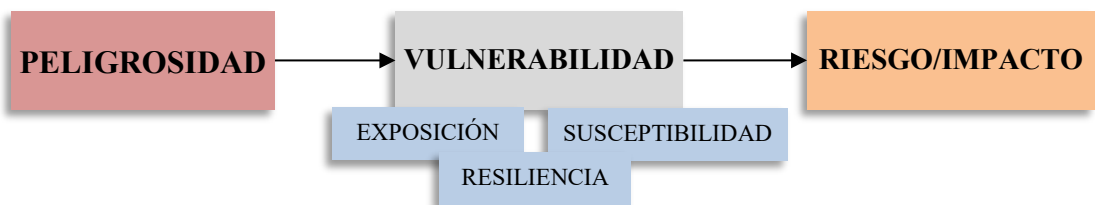
- Factores referentes a las **características de la población**:
  - El comportamiento de algunos individuos durante inundaciones. Han ocurrido muertes de personas curiosas por ver una inundación, en particular las producidas en la costa, y donde han sido arrastradas por el efecto de las olas. El “Turismo de inundaciones” es un problema reconocido por toda Europa.
  - Donde la población sometida al riesgo son ancianos, como el suceso acaecido en Agramunt (Lleida) el 2 de noviembre del 2015 en el que murieron cuatro ancianos tras producirse una inundación en una residencia debido a las fuertes lluvias.
  - Donde hay ciertos tipos particulares de propiedades (por ejemplo Bungalós de una planta).
  - Donde no existe experiencia previa a inundaciones y no se tiene consciencia del riesgo.
  - Donde hay un aumento de la ansiedad por la posible reaparición del evento.
  - Donde hay una pérdida en el nivel de confianza percibida en las autoridades responsables de proporcionar protección y alertas ante inundaciones.
- Factores referentes a las **características de la localización**:
  - Donde las estructuras de protección, naturales o artificiales, fallan por desbordamiento o colapso.
  - Donde la gente intenta conducir a través del agua y son arrastrados o quedan atrapados en sus coches.
  - Donde la gente queda atrapada en edificios de un solo piso, plantas bajas, apartamentos, bodegas o estructuras a pie de calle, como vías de ferrocarril o párquines de coches.

Uno de los enfoques más actuales es el que se propone en el proyecto europeo de investigación BINGO (2015-2019) (Bringing INnovation to onGOing water management – a better future under climate change), que está financiado por el programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea. El propósito de este proyecto es proporcionar conocimiento práctico y herramientas a los usuarios finales, gestores de agua y a los responsables de la toma de decisiones y aplicación de políticas afectados por el cambio climático, para permitirles tratar de la mejor manera posible con las proyecciones climáticas, incluyendo sequías e inundaciones.

En el proyecto BINGO se llevó a cabo en la primera fase una definición del lenguaje común en relación al riesgo. El hecho de llevar a cabo un proyecto entre diferentes socios de diferentes países hacía necesario, para una correcta comunicación, la definición de este lenguaje común. La base se estableció en la Guía ISO 73:2009 “Risk management-Vocabulary” donde se recogen y definen gran cantidad de términos relacionados con la gestión del riesgo.

La primera definición que requiere ser establecida es la del concepto de riesgo. En BINGO se definió como la combinación de las consecuencias (daños) de un evento peligroso (incluyendo cambios en circunstancias) y su posibilidad de ocurrencia (probabilidad). El nivel y magnitud de las consecuencias dependerá de las características del evento peligroso así como de la vulnerabilidad del sistema (Figura I-9). La vulnerabilidad es entendida como función de tres variables:

- **Exposición:** es la extensión a la cual un sistema está sujeto a un evento y básicamente depende de la presencia de personas, modos de vida, especies o ecosistemas, servicios medioambientales y recursos, infraestructuras, bienes económicos, sociales o culturales en lugares que podrían ser afectados negativamente.
- **Susceptibilidad:** Se trata del grado de afectación sobre un sistema, dependiendo de sus propias características intrínsecas de sus elementos (por ejemplo, el contexto económico y social de la comunidad expuesta, las características físicas y medioambientales del sistema que ha recibido el impacto, etc.).
- **Resiliencia:** Es la capacidad adaptativa del sistema en un ambiente complejo y cambiante. Se trata de un factor que disminuye los efectos de daños potenciales y el cual debe ser, por tanto, también considerado cuando se evalúa el riesgo.



**Figura I-9.** Definición del riesgo en el proyecto europeo BINGO

Independientemente de las diferentes propuestas de la definición conceptual del riesgo, parece claro que si la inundación no compromete nada o a nadie, el daño sería nulo y, en este sentido el riesgo es nulo en cualquier caso. Sin embargo, desde el punto de vista clásico ingenieril, dimensionamos en base a las solicitudes (minimizar al máximo la peligrosidad), sin tener en cuenta el binomio peligrosidad y vulnerabilidad. En el diseño de redes de drenaje pluvial, y según

el concepto de drenaje dual, el dimensionamiento de los conductos debiera ser para el caudal que no pudiera circular por las calles al sobrepasarse los niveles de peligrosidad aceptables, tales que se minimice el riesgo en superficie. En términos de inundaciones fluviales en zonas rurales, la delimitación de la zona inundable indica la superficie peligrosa (en mayor o menor medida). Por tanto, evitando su ocupación con asentamientos urbanos se evitan los futuros riesgos.

### I.5. Representación espacial de la peligrosidad y el riesgo

Los conceptos descritos hasta el momento, ya sea una u otra la definición conceptual de riesgo y/o vulnerabilidad, se traducen desde un punto de vista práctico en la elaboración de mapas de peligrosidad y riesgo para ciertas zonas de estudio, según señala la Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en el marco europeo.

Para la elaboración de un **mapa de peligrosidad** se requiere inicialmente el desarrollo de un modelo numérico. Éste será bidimensional en muchos casos (en ocasiones 1D ó incluso 3D) para zonas rurales que contemplen inundaciones fluviales, o será un modelo acoplado 1D/2D que tenga en cuenta la interacción de la escorrentía y del flujo por el sistema de alcantarillado en zona urbana (Russo *et al.*, 2013). Las lluvias de diseño utilizadas para las simulaciones se relacionan con diferentes periodos de retorno (T=1 año, T=5 años, T=10 años...) y, por tanto, se obtienen resultados de los calados y las velocidades que se dan en el área inundada para cada periodo de retorno. En este sentido se caracteriza perfectamente la peligrosidad, donde los calados y velocidades indican la intensidad del evento de inundación y los periodos de retorno responden al concepto de probabilidad de ocurrencia, no de la inundación directamente sino del suceso de lluvia que genera dicha inundación.

Decimos que un valor de nivel o caudal, por ejemplo un caudal de valor  $Q_T$ , es de periodo de retorno T años, cuando como media se produce un caudal mayor que  $Q_T$  una vez cada T años. Cuando el número de años con datos de lluvia o caudal disponible no es muy grande, para hacer una predicción de comportamiento futuro debemos pasar al dominio de la probabilidad. Un suceso de periodo de retorno T, presenta una probabilidad de ser superado en un año, P, que se puede expresar como:

$$P(Q > Q_T) = \frac{1}{T} \quad \text{[I-1]}$$

Se puede expresar la probabilidad de que un suceso de periodo de retorno T años se supere en un periodo de tiempo de n años, según la siguiente formula estadística:

$$P(Q > Q_T)_n = 1 - \left[1 - \frac{1}{T}\right]^n \quad \text{[I-2]}$$

En la Tabla I-2 se recogen algunas probabilidades de ocurrencia, para diferentes periodos de retorno y diferentes periodos de tiempo, expresadas en tantos por ciento.

Llegados a este punto, se debe delimitar la peligrosidad según los valores de las variables hidráulicas del calado y velocidad. En este sentido se pueden definir unos grados de peligrosidad asociados a estas variables (alta, moderada, baja, (Russo *et al.*, 2013)), que serán representados en los mapas de peligrosidad, traduciendo los valores de velocidad y calado en rangos de peligrosidad.

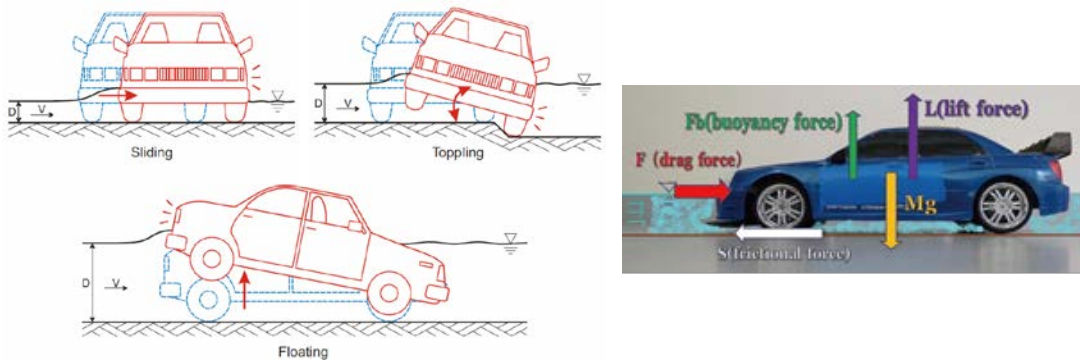
**Tabla I-2** Probabilidad de ocurrencia de diferentes sucesos en función del número de años a tener en cuenta

Periodo de retorno del evento (años)	Probabilidad de que el suceso se produzca 1 vez en un año (%)	Probabilidad de que el suceso se produzca 1 vez en 10 años (%)	Probabilidad de que el suceso se produzca 1 vez en 20 años (%)	Probabilidad de que el suceso se produzca 1 vez en 50 años (%)
3	33	98	99.97	99.99
10	10	65	88	99
50	2	18	33	64
100	1	10	18	39
500	0.2	2	4	10

En el contexto de inundaciones urbanas, la peligrosidad puede ser tenida en cuenta directamente para la seguridad de los peatones que cruzan una calle (Figura I-10), pero también desde el punto de vista de los vehículos, los cuales pueden ser arrastrados, deslizar y/o volcar cuando se ven expuestos a corrientes de agua debidas a inundaciones (Figura I-11).



**Figura I-10.** Modelo de ensayos de inundación en superficie urbana, Russo (2009) (izquierda) y en zona subterránea, Ishigaki *et al.* (2008) (derecha)



**Figura I-11.** Modos de inestabilidad de vehículos durante eventos de inundaciones (izquierda) y fuerzas actuantes en el vehículo (derecha)

También se puede evaluar la peligrosidad en situaciones urbanas localizadas, como los estudios realizados por Ishigaki *et al.* (2008) sobre inundaciones de zonas subterráneas como áreas comerciales subterráneas, estaciones de metro o sótanos de edificios (Figura I-10). En este caso se pueden representar rutas de evacuación para cada área subterránea concreta y mapas de peligrosidad según el tiempo necesario para la evacuación (Ishigaki *et al.*, 2008), siendo este análisis de especial interés en zonas urbanas.

Llegados a este punto son de gran utilidad las herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica), que permiten combinar o cruzar mapas con diferente información.



**Figura I-12.** Vehículos afectados por una inundación



**Figura I-13.** Afectaciones a viviendas a causa de unas inundaciones

Los impactos de una cierta peligrosidad pueden ser varios: Daño económico (nacional, comunidad o individual), número de propiedades afectadas, daño a individuos (muertes, heridos, afectados) y/o daño ecológico y medioambiental (a veces expresado en términos monetarios). En evaluaciones probabilísticas/cuantitativas del riesgo, el término vulnerabilidad expresa la parte o porcentaje de exposición que posiblemente será perdida debido a una cierta peligrosidad (European Commission, 2010).

Una inundación puede afectar de una manera tangible o intangible, entendiendo tangible como aquello que al verse sometido a la inundación sufre unos daños que pueden cuantificarse económicamente; e intangible es el daño que pueden sufrir las personas y que debe interpretarse de manera diferente (Landefeld *et al.*, 1982). En zonas urbanas se puede decir, de manera generalizada, que las afectaciones se producen esencialmente sobre propiedades, **vehículos** y

**personas**, sin olvidarse de servicios u otras infraestructuras, interpretándose para éstos de forma diferente la peligrosidad, la vulnerabilidad y por tanto el riesgo.

Así pues, las propiedades son afectadas de una manera tangible, las personas de una manera intangible y los vehículos de ambas maneras, en cuanto que éstos, si están ocupados en el momento de la inundación, sufren daños tangibles pero las personas en su interior pueden sufrir daños intangibles. Hay que considerar a los vehículos de manera independiente al ser elementos de las ciudades cada vez más presentes y que una vez inestables se comportan como enormes escombros que pueden producir múltiples daños. A su vez los daños tangibles que se producen cuando un vehículo sufre una inestabilidad debido a una inundación, ya sea por arrastre, deslizamiento o vuelco, pueden ser entendidos de una forma directa e indirecta, siendo la primera el daño ocasionado al vehículo, así como los daños derivados de las posibles colisiones del vehículo arrastrado por el agua, y la segunda el daño debido a la disrupción del tráfico y retrasos. Estas afectaciones y formas de entender los daños producidos fueron descritas por diferentes autores (Grigg *et al.*, 1975; Hammond *et al.*, 2015). En la Tabla I-3 se recogen diferentes daños asociados a inundaciones y clasificados según las categorías mencionadas anteriormente: tangible o intangible y directo o indirecto.

**Tabla I-3** Categorías de daños por inundación (Velasco *et al.*, 2012)

		Forma de Medida	
		Tangible	Intangible
Forma del daño	<b>Directa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Daños físicos a bienes:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Edificios</li> <li>• Contenidos</li> <li>• Infraestructuras</li> <li>• Tierras agrícolas</li> </ul> </li> <li>▪ Operaciones de evacuación y rescate</li> <li>▪ Costes de reparación y limpieza</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Accidentes y lesiones</li> <li>▪ Enfermedades</li> <li>▪ Pérdidas históricas y culturales</li> <li>▪ Pérdidas de bienes ecológicos y medioambientales</li> <li>▪ Molestias</li> </ul>
	<b>Indirecta</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pérdida de producción industrial</li> <li>▪ Interrupción del tráfico</li> <li>▪ Costes de emergencias</li> <li>▪ Viviendas temporales para los evacuados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Alteraciones sociales</li> <li>▪ Aumento de la vulnerabilidad de los afectados</li> <li>▪ Pérdida de confianza en las autoridades públicas</li> <li>▪ Trauma psicológico</li> </ul>

Atendiendo al caso de la representación espacial de las afectaciones sobre propiedades (edificios y contenidos), en primer lugar se debe disponer de mapas con los usos del suelo. En este caso se trata de un análisis de zona urbana en el que se puede considerar información con mayor o menor detalle: usos del suelo, redes de transporte, tipología y características de cada edificio, etc. De acuerdo a la escala de trabajo y el objetivo, existen tres categorías o enfoques de análisis: Macro, Meso y Micro escala de análisis (Tabla I-4) (Messner *et al.*, 2006).

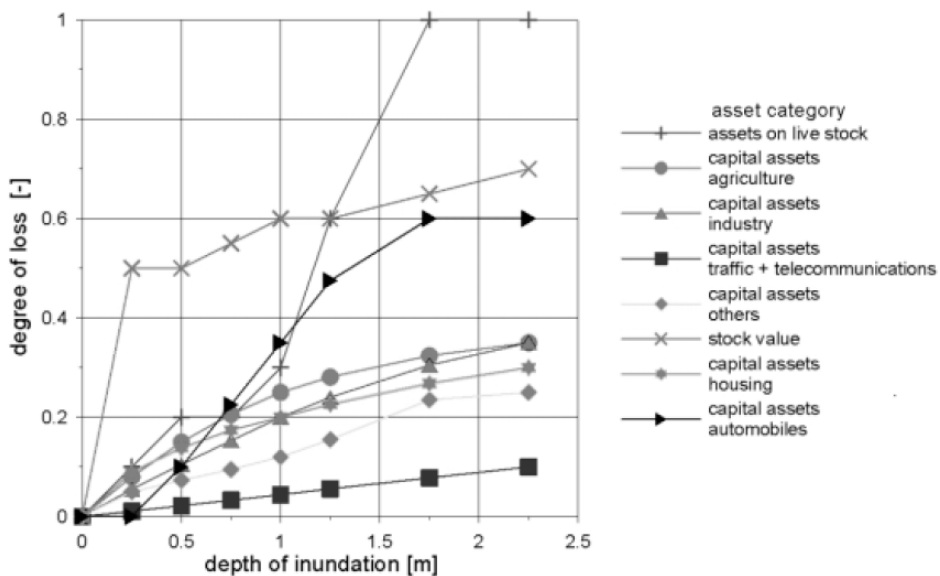
Un enfoque Macro llevaría a cabo el cálculo de los daños potenciales a nivel de municipios. La distribución espacial entre municipios no se diferencia, es decir que se asume una misma distribución de los bienes en toda el área considerada. Si el propósito del estudio es estimar de manera aproximada el nivel de daño para un área muy extensa, éste podría ser el enfoque más adecuado. Un análisis Meso presenta una localización mucho más realista de los bienes dentro de los municipios, distinguiendo entre diferentes usos del suelo. Este enfoque permite la



diferenciación entre áreas de alta concentración de valor, como zonas urbanas, y áreas de poco valor como terrenos agrícolas o bosques (Figura I-14).

**Tabla I-4** Características de enfoques macro, meso y micro de análisis de daños por inundación. Fuente: Messner *et al.* (2006)

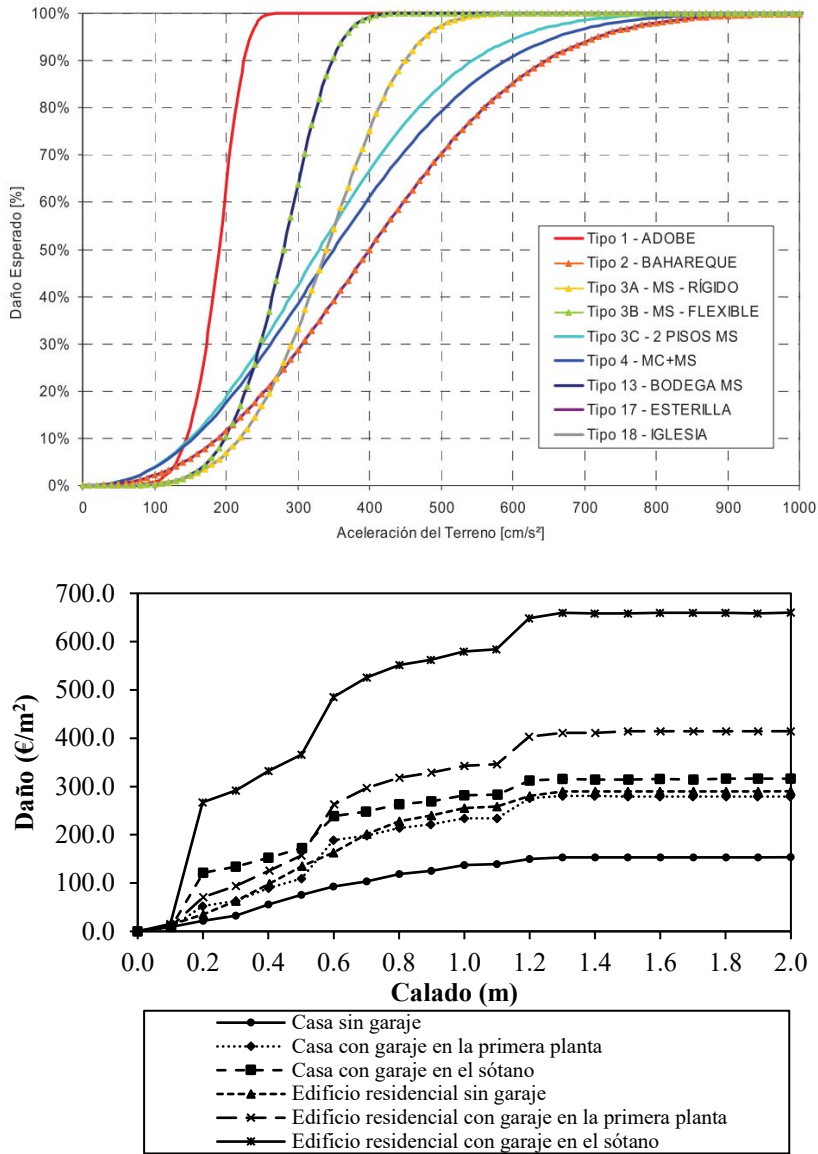
Escala	Tamaño del área de estudio	Nivel de gestión	Detalle	Cantidad de recursos necesarios por unidad de área	Cantidad de información de partida
Macro	Nacional	Políticas generales de mitigación de inundación	Bajo	Bajo	Bajo
Meso	Regional	Estrategias de mitigación de inundaciones a gran escala	Medio	Media	Media
Micro	Local	Medidas de protección individuales	Alto	Alta	Alta



**Figura I-14.** Curvas de daños para diferentes categorías (enfoque Meso). Fuente Elsner *et al.* (2003).

En el análisis Micro los daños se analizan sobre elementos individuales, es decir bienes agrupados por categorías, tales como propiedades residenciales o no residenciales (Merz *et al.*, 2007). Este último análisis es el adecuado para evaluaciones de daños en zonas urbanas, como el que se trata en este trabajo.

A partir de las tipologías de edificios y/o usos del suelo el grado de daño potencial a una estructura puede ser medido a través de curvas de daños, las cuales pueden medir porcentajes de daños para diferentes niveles de intensidades del evento, según se muestra en las curvas de daños para un evento de terremoto en la Figura I-15 (arriba). También se pueden representar estas curvas mediante el daño en base a unidades monetarias relativas a una unidad de superficie afectada [ $\text{€}/\text{m}^2$ ] frente al calado cuando el evento producido es una inundación, según se muestra en la curva de daños para un evento de inundación en la Figura I-15 (abajo).



**Figura I-15.** Curvas de vulnerabilidad: arriba (terremoto) (Cardona, 2010); abajo (inundación) (Francés et al., 2008)

En ambos ejemplos se escoge una medida de intensidad del evento, aceleración del terremoto en el primero y calado en el segundo, frente a un criterio de valoración del daño, un tanto por ciento de daño en el primero y una valoración económica por unidad de superficie en el segundo. En cualquier caso, conceptualmente el sistema de elaboración de curvas de daños (denominadas curvas de vulnerabilidad en ocasiones) es equivalente y siempre asociado a la tipología de estructura afectada.

Usando la tipología de edificios y las curvas de daños asociadas en combinación con los datos de peligrosidad y exposición, se puede elaborar un mapa de riesgo (económico) con mayor o

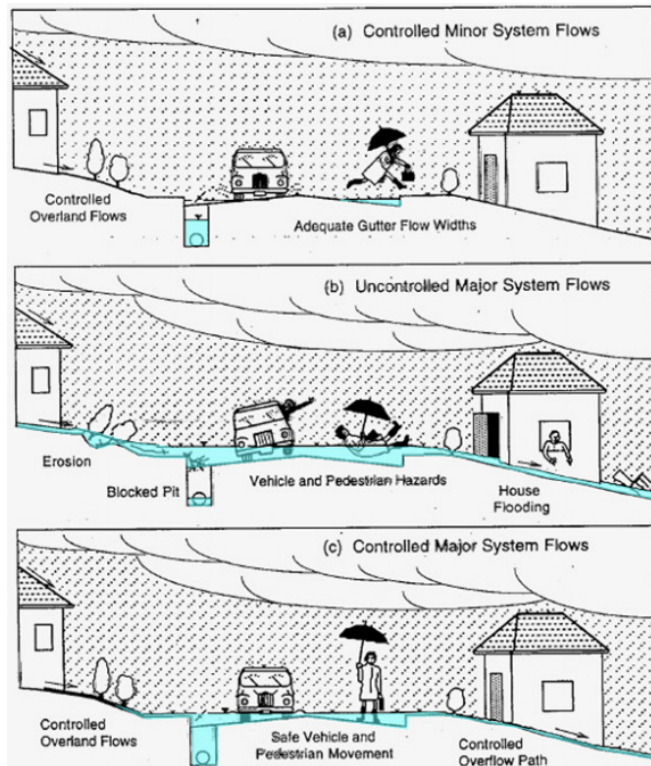
menor detalle. En el caso de eventos de inundaciones se requieren las curvas de daños en función del calado, el mapa de calados y el mapa de usos del suelo; tratándolos mediante herramientas SIG se obtiene el mapa de riesgos.

En el caso de las afectaciones sobre **personas**, peatones en entorno urbano, (Figura I-16b), la intangibilidad se debe a la dificultad de valorar o cuantificar económicamente las lesiones o fallecimientos. Antes de la representación espacial de la peligrosidad para peatones, se deben definir los rangos de ésta, basados en criterios subjetivos para establecer el límite entre peligrosidad alta y media, así como entre peligrosidad media y baja. La única manera de obtener estos límites es reproducir en laboratorio la situación real y ensayar personas, observando su reacción al verse expuestos a inundaciones, tal y como realizó Russo (2009). Además de los mapas de peligrosidad, se deben realizar mapas de vulnerabilidad humana o social reflejando diferentes categorías: densidad de población, personas de elevada o baja edad, % de extranjeros y edificios o estructuras críticas. Estas categorías es un ejemplo que responde a situaciones que puedan generar mayor vulnerabilidad, y representando estas zonas en un mapa será posible cruzar esta información con la que ofrece el mapa de peligrosidad para personas, obteniendo de esta manera el mapa de riesgos para personas.

En cuanto a la afectación a los **vehículos** (Figura I-16b), se deben hacer consideraciones diferentes para los tipos de daños producidos, intangibles a personas y tangibles directos e indirectos. El desarrollo de mapas de peligrosidad se debería hacer en base a un vehículo de diseño el cual, garantizando su estabilidad se garantice la estabilidad del resto o de la amplia mayoría. El vehículo de diseño sería distinto en función del lugar de estudio, siendo los técnicos los encargados de tomar la decisión de qué vehículo es representativo de ese municipio o ciudad. La elaboración de estos mapas de peligrosidad requiere definir rangos de peligrosidad que solo pueden ser correctamente establecidos a partir de ensayos de laboratorio, para determinar los umbrales de estabilidad de cada vehículo.

La interpretación de la vulnerabilidad se debe realizar de diferente manera para las personas del interior del vehículo (daños intangibles), así como para el vehículo o daños a terceros (daños tangibles directos) y los efectos perjudiciales producidos por la interrupción del tráfico (daños tangibles indirectos). En el primer caso se debe tener en cuenta esencialmente las características físicas de los ocupantes del vehículo, si los hubiera; en el segundo, el nivel de estabilidad del vehículo (dimensiones y peso) y curvas de daños desarrolladas para vehículos; y en el tercero, si el vehículo está aparcado o en movimiento, así como, por ejemplo, cierres de calles por excesivo calado de agua que hagan desviar el tráfico. En cuanto a la distribución de vehículos en una zona de estudio se deberían considerar mapas de intensidades de circulación de vehículos, zonas de estacionamiento de vehículos en la calle, así como el porcentaje de los diferentes tipos de vehículos (agrupación en clases) que circulan habitualmente por el área de estudio. Bajo estos criterios se pueden obtener mapas de riesgos según los tres tipos de daños comentados, intangibles y tangibles directos o indirectos en relación a los vehículos. Los tangibles directos requerirán del desarrollo de curvas de daños asociadas a diferentes tipologías o clases de vehículo, de forma análoga al desarrollo de curvas para propiedades.

Obviamente, en estos mapas se podrían considerar además escenarios que contemplen la situación actual y la futura haciendo las estimaciones oportunas de los cambios que se producirán en la zona de análisis, tanto sobre las condiciones climáticas como sobre las socioeconómicas.



**Figura I-16.** Flujos de agua en una calle peligrosos para personas y vehículos

En definitiva, la elaboración de estos planos tiene como objetivo disponer de herramientas que permitan llevar a cabo la gestión del riesgo de inundación en medio urbano por parte de los agentes implicados en esta tarea. Se trata de mejorar la resiliencia urbana utilizando estos mapas como herramientas para proponer medidas o estrategias, estructurales, no estructurales y también propuestas de sistemas de drenaje urbano sostenible.

### I.6. Terminología sobre gestión del riesgo de inundaciones

La Comisión Europea, a finales del año 2010, redactó el documento “Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management” (European Commission, 2010), donde se recogen directrices para la realización de mapas de peligrosidad y riesgo, valoración y análisis, para facilitar el trabajo a los Estados miembros y asegurar un criterio similar entre ellos.

Para el desarrollo de estas directrices, se usaron estándares internacionales desarrollados por la International Organisation for Standardisation (ISO), en particular ISO 31000, ISO 31010, y la correspondiente guía de terminología de la ISO. También se usa terminología de la oficina de las Naciones Unidas para la reducción de riesgos de desastres (UNISDR) (2009), y además se usan nuevas propuestas de terminología adaptada para el propio documento. A continuación, en la Tabla I-5, se recoge dicha terminología que servirá de referencia en adelante para todo el documento de tesis.

**Tabla I-5** Terminología propuesta por la Comisión Europea, en el documento Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management (European Commission, 2010)

Concepto	Definición	Procedencia
<b>Peligrosidad Natural</b>	Proceso natural o fenómeno que puede causar pérdida de vida, daños u otros impactos en la salud, daños a la propiedad, pérdida de los medios de vida y servicios, consecuencias económicas, o daños ambientales. El término se usa para describir los eventos de peligrosidad actuales, así como las condiciones de peligrosidad latentes que pueden dar lugar en futuros eventos. Los eventos de peligrosidad natural pueden ser caracterizados por su magnitud o intensidad, su velocidad de inicio, duración y su área de extensión.	(UNISDR,2009)
Exposición	Gente, propiedades, sistemas, u otros elementos presentes en zonas de peligrosidad que por ello son sujetos a pérdidas potenciales.	(UNISDR,2009)
<b>Vulnerabilidad</b>	Las características y circunstancias de una comunidad, sistema o bien susceptible a los efectos dañinos de la peligrosidad. En las valoraciones probabilísticas/cualitativas del riesgo, el termino vulnerabilidad expresa la parte o porcentaje de exposición que probablemente va a ser pérdida debido a una cierta peligrosidad.	(UNISDR,2009)
Resiliencia	La habilidad de un sistema, comunidad o sociedad expuesta a peligrosidades de resistir, absorber, acomodarse y recuperarse de los efectos de la peligrosidad de una manera eficiente y oportuna, incluyendo hasta la conservación y rehabilitación de sus estructuras y funciones básicas.	(UNISDR,2009)
<b>Riesgo</b>	Es una combinación de las consecuencias de un evento (peligrosidad) y la probabilidad de ocurrencia asociada.	(ISO 31010)
Identificación del riesgo	Es el proceso de búsqueda, reconocimiento y descripción del riesgo.	(ISO 31010)
Análisis del riesgo	Es el proceso de comprensión de la naturaleza del riesgo y la determinación del nivel de riesgo.	(ISO 31010)
Valoración del riesgo	Es el proceso global de identificación del riesgo, análisis del riesgo, y evaluación del riesgo.	(ISO 31010)
Evaluación del riesgo	Es el proceso de comparación de los resultados del análisis del riesgo con el criterio de riesgo para determinar si el riesgo y/o su magnitud es aceptable o tolerable.	(ISO 31010)
Criterio de riesgo	Son los términos de referencia contra los cuales el significado de riesgo es evaluado.	(ISO 31010)
Consecuencias	Son los efectos negativos de un desastre expresado en términos de impactos humanos, económicos y medioambientales y políticos/sociales.	(ISO 31010)
Mapa de peligrosidad	Es un mapa que representa niveles de probabilidad sucediendo en un área geográfica. Tales mapas se centran únicamente en la peligrosidad o incluyen varios tipos de peligrosidades (mapa de multi-peligrosidades).	Adaptada

Concepto	Definición	Procedencia
	Un mapa de multi-peligrosidad representaría niveles de probabilidad de varias peligrosidades ocurriendo en un área geográfica.	
Mapa de riesgo	Es un mapa que representa niveles de riesgo en un área geográfica. Tales mapas se centran únicamente en el riesgo o incluyendo diferentes tipos de riesgos.	Adaptada
Escenario de riesgo	Es una representación de una situación de único riesgo o multi-riesgo destacando los impactos significantes, seleccionados	Adaptada

Esta terminología se define para casos generales de riesgo, pero perfectamente adaptables al caso de estudio de este documento, las inundaciones en zonas urbanas.

## I.7. Objetivos y alcance

El objetivo de esta tesis se centra en el desarrollo y aplicación de herramientas esenciales en la gestión de **inundaciones en zonas urbanas**, y fundamentales, en última instancia, para la elaboración de los comentados mapas de riesgo con mucho mayor detalle y fiabilidad que hasta el momento.

Se abarca el desarrollo de ensayos experimentales para definir correctamente los **límites de estabilidad para peatones** que se ven expuestos a inundaciones pluviales en zonas urbanas. Se llevan a cabo, además, ensayos con modelos físicos a escala reducida para definir la **estabilidad de diferentes tipos de vehículos**, considerando los modos de inestabilidad a los que se ven sometidos. Finalmente, en base a los resultados obtenidos en los estudios de estabilidad para peatones y vehículos se proponen criterios de peligrosidad que se aplican en un **caso real de estudio** en una ciudad española. Además, se propone y se aplica una metodología de estimación de daños económicos a vehículos, considerando diferentes eventos de lluvia asociados a periodos de retorno, en base a curvas de daños propuestas por otros autores.

Durante este trabajo, en mayor medida experimental, se presentan, además, las modelaciones numéricas tridimensionales (CFD: Computational Fluid Dynamics) realizadas como complemento de los ensayos experimentales. Los modelos realizados corresponden con aquellos modelos físicos utilizados para analizar la estabilidad de personas y vehículos. Se trata de simulaciones calibradas en base a los ensayos experimentales y que, por tanto, ofrecen la garantía de resultados de confianza. Gracias a estos modelos numéricos se presentan resultados complementarios a los experimentales y que aportan mayor información de detalle.

**Tabla I-6** Interpretación de las diferentes componentes del riesgo según el tipo de afectación: Personas, vehículos y propiedades

Afectación a:	Tipo	Peligrosidad	Vulnerabilidad
<p><b>Personas</b></p> <p><b>Intangible.</b> Consideración subjetiva al daño a personas.</p>	<p><b>Tangible Directa.</b> La parte tangible de daño del vehículo o a terceros que se puede contabilizar económicamente</p>	<p>Mapas de peligrosidad según criterio basado en estudios de estabilidad para peatones.</p>	<p>Mapas de vulnerabilidad humana o social con las siguientes posibles categorías: densidad de población, personas de elevada o baja edad, % extranjeros, edificios o estructuras críticas</p>
		<p>Estabilidad de los vehículos. Curvas de daños.</p>	<p>Mapas de vulnerabilidad humana o social con las siguientes posibles categorías: densidad de población, personas de elevada o baja edad, % extranjeros, edificios o estructuras críticas</p>
<p><b>Vehículos</b></p> <p><b>Tangible Indirecta.</b> Las consecuencias económicas debidas al accidente. Disrupción del tráfico y consecuencias económicas derivadas de retrasos en viajes.</p>	<p>Mapas de peligrosidad según criterio basado en estudios de estabilidad para vehículos.</p>	<p>Diferentes periodos de retorno</p>	<p>Mapas de vulnerabilidad humana o social con las siguientes posibles categorías: densidad de población, personas de elevada o baja edad, % extranjeros, edificios o estructuras críticas</p>
		<p>Vehículo parado o en movimiento. El segundo caso interrumpiría un desplazamiento, derivando en posibles consecuencias negativas.</p>	<p>Mapas de vulnerabilidad humana o social con las siguientes posibles categorías: densidad de población, personas de elevada o baja edad, % extranjeros, edificios o estructuras críticas</p>
<p><b>Propiedades</b></p> <p><b>Tangible.</b> Consideración económica</p>	<p>Mapas de calado</p>	<p>Diferentes periodos de retorno</p>	<p>Mapas de vulnerabilidad humana o social con las siguientes posibles categorías: densidad de población, personas de elevada o baja edad, % extranjeros, edificios o estructuras críticas</p>
		<p>Curvas de daños</p>	<p>Mapas de vulnerabilidad humana o social con las siguientes posibles categorías: densidad de población, personas de elevada o baja edad, % extranjeros, edificios o estructuras críticas</p>

*Mapas de riesgo*

## *Capítulo II*

# *Revisión del estado de la cuestión*

### **II.1. Introducción**

En este segundo capítulo se recoge el estado de la cuestión en relación al análisis y evaluación de la peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo ante inundaciones en zonas urbanas. Se analiza en primera instancia el marco legislativo europeo actual, así como la evolución que han sufrido las leyes, normas y decretos hasta la actualidad en relación a la evaluación y gestión de inundaciones.

En apartados sucesivos se agrupan las diferentes investigaciones y documentos que se han encontrado en la literatura, relacionados con el ámbito de estudio objeto de esta tesis. Los apartados recogidos en adelante responden a las siguientes líneas de investigación:

- Evaluación de la peligrosidad para las personas ante inundaciones
- Evaluación de la estabilidad de vehículos ante inundaciones
- Evaluación de daños directos ocasionados por inundaciones

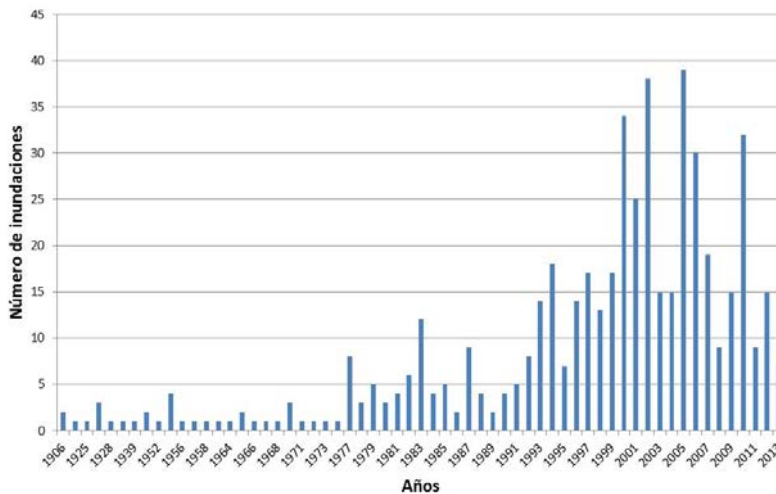
### **II.2. Legislación Europea en relación a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. Directiva 2007/60/CE**

En relación al marco legislativo europeo, entró en vigor el 26 de noviembre de 2007 la Directiva 2007/60/CE (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea) del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. Dicha directiva es acorde y va de la mano de la Directiva 2000/60/CE (El Parlamento Europeo y El Consejo de la Unión, 2000) del Parlamento europeo y del consejo de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. La reducción del riesgo de inundación no es uno de los objetivos principales de la Directiva 2000/60/CE (El Parlamento Europeo y El Consejo de la Unión, 2000) y tampoco tiene en cuenta los futuros cambios del riesgo de inundación que se derivarán del cambio climático, por eso surgió la Directiva 2007/60/CE. Se pretendía incorporar el concepto de peligrosidad (*hazard* en literatura anglosajona) que inicialmente no se había considerado, de modo que se identificaran las zonas peligrosas independientemente del grado de riesgo actual. De este modo se dispondría de una cartografía que

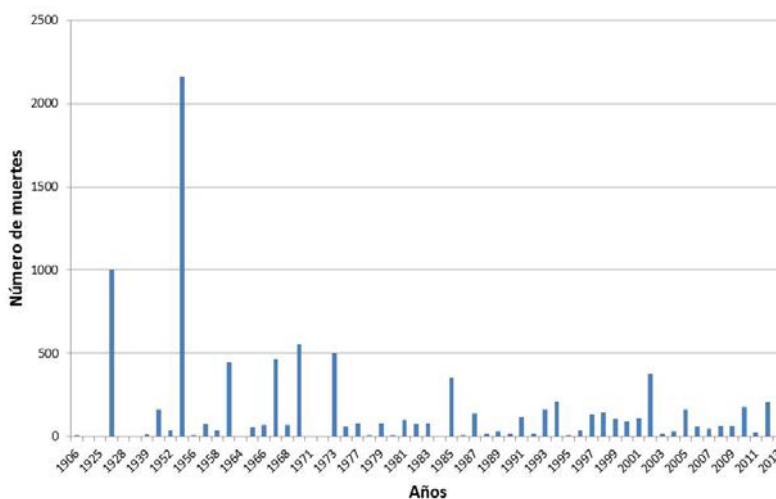


las administraciones competentes pudieran utilizar para evitar su ocupación y reducir así los riesgos de inundaciones en el futuro.

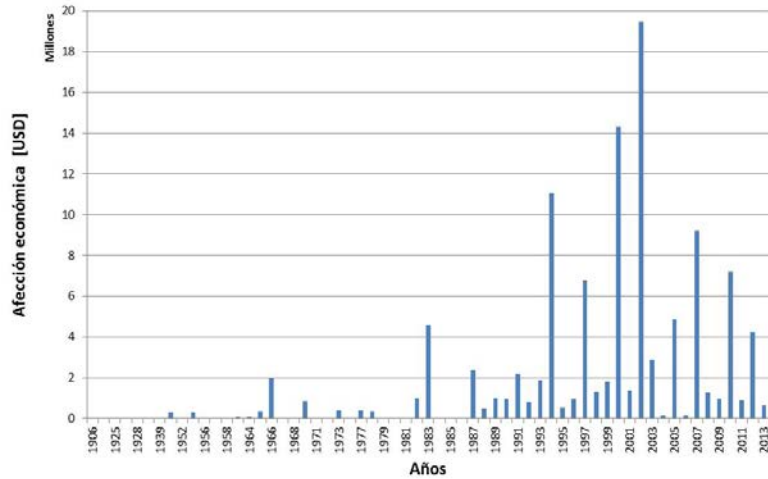
En el marco normativo español surge el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación (Ministerio de la Presidencia, 2010), que se ciñe estrictamente al mandato de la Directiva 2007/60/CE (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea) con el objetivo de reducir las consecuencias negativas, asociadas a las inundaciones, para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural, la actividad. Este real decreto tiene como principales objetivos obtener un adecuado conocimiento y evaluación de los riesgos asociados a las inundaciones y lograr una actuación coordinada de todas las administraciones públicas y la sociedad para reducir las consecuencias negativas de las inundaciones.



**Figura II-1.** Inundaciones en Europa, desde el año 1900 hasta el 2013. Fuente: CRED International Disaster Database (2013)



**Figura II-2.** Muertes por inundaciones en Europa, desde el año 1900 hasta el 2013. Fuente: CRED International Disaster Database (2013)



**Figura II-3.** Afectación económica debida a inundaciones en Europa, desde el año 1900 hasta el 2013. Fuente: CRED International Disaster Database (2013)

En la Figura II-1, Figura II-2 y Figura II-3 se muestra una evolución, desde el año 1900 hasta el año 2013, del número de inundaciones, de muertes producidas y de cuantificación económica por las inundaciones en Europa. El número de inundaciones ha ido aumentando hasta el año 2005 y se manifiesta un ligero descenso en los últimos 5 años.

El número de muertes no presenta un patrón que indique ninguna tendencia, ni si quiera crece con el aumento de inundaciones, aunque la mejora en los sistemas de alerta y protección frente a éstas los últimos años puede explicar este hecho. Las afecciones económicas sí se producen de forma acorde con la tendencia del número de inundaciones, observándose un ligero descenso de afecciones económicas en los últimos 5 años.

**Tabla II-1** Calendario de actuaciones de la Directiva 2007/60/CE (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea)

2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Entrada en vigor				Evaluación preliminar del riesgo		Mapas de peligrosidad y de riesgo		Planes de gestión			Actualización de la evaluación preliminar (y cada 6 años)	Actualización de los mapas (y cada 6 años)		Actualización de los planes (y cada 6 años)

En base a este panorama europeo, con la Directiva 2007/60/CE (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea) se propuso como objetivo reducir y gestionar los riesgos derivados de las inundaciones para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad

económica. Para ello, prevé cartografiar la peligrosidad y el riesgo de inundación en todas las regiones donde este riesgo es elevado, acometer actuaciones coordinadas en las cuencas hidrográficas compartidas por varios países y elaborar planes de gestión de los riesgos de inundación que sean el resultado de una cooperación y una partición lo más amplia posible de los Estados miembros. Para la realización de las acciones propuestas por la Directiva 2007/60/CE se propone un calendario de actuación (Tabla II-1) y unos contenidos mínimos para cada acción, que se recogen en la Tabla II-2.

**Tabla II-2** Propuesta de actuaciones y calendario de la Directiva 2007/60/CE (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea)

Acción	Definición	Contenido mínimo
<b>EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL RIESGO</b>	<p>Se realizará respecto a cada demarcación hidrográfica o unidad de gestión.</p> <p>Los Estados miembros determinarán las zonas para las cuales hayan llegado a la conclusión de que existe un riesgo potencial de inundación significativo o en las cuales la materialización de tal riesgo pueda considerarse probable sobre la base de la información de que se disponga o que pueda deducirse con facilidad, incluyendo el impacto del cambio climático.</p>	<p>Mapas de la demarcación hidrográfica, a la escala adecuada, que presenten los límites de las cuencas y subcuencas hidrográficas y, cuando existan, las zonas costeras, y que muestren la topografía y los usos del suelo.</p> <p>Descripción de las inundaciones ocurridas en el pasado que hayan tenido impactos negativos significativos para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica y que tengan una probabilidad significativa de volver a producirse, incluyendo una evaluación de las repercusiones negativas que hayan provocado.</p> <p>Descripción de las inundaciones de importancia ocurridas en el pasado (aunque no provocaran daños) cuando puedan preverse consecuencias adversas de futuros acontecimientos similares</p> <p>En función de las necesidades específicas de los Estados Miembros: topografía, localización de los cursos de agua y sus características hidrológicas y geomorfológicas, las llanuras aluviales como zonas de retención naturales, eficacia de las infraestructuras de protección contra inundaciones, zonas pobladas, actividad económica y repercusiones del cambio climático.</p>
<b>MAPAS DE PELIGROSIDAD Y DE RIESGO</b>	<p>Los Estados miembros prepararán, para cada demarcación hidrográfica, mapas de peligrosidad por inundaciones y mapas de riesgo de inundación, a la escala que resulte más apropiada para las zonas determinadas como ARPSIs.</p> <p>Los mapas de peligrosidad por inundaciones incluirán las zonas geográficas que podrían inundarse según los escenarios siguientes:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Baja probabilidad de inundación o escenario de eventos extremos.</li> <li>Probabilidad media de inundación.</li> <li>Alta probabilidad de inundación.</li> </ol> <p>Para las zonas costeras en las que existe un nivel adecuado de protección, los mapas de peligrosidad podrán limitarse al escenario de baja probabilidad.</p>	<p>Para cada uno de los escenarios los mapas deberán contener:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Extensión previsible de la inundación y calados del agua o nivel de agua, según proceda.</li> <li>En aquellos casos en que se considere necesario, se podrá incluir caudales y/o velocidades máximas.</li> </ol> <p>Los mapas de riesgo incluirán, como mínimo, la información siguiente:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Número indicativo de habitantes afectados.</li> <li>Tipo de actividad económica que puede verse afectada</li> <li>Instalaciones que puedan ocasionar contaminación accidental.</li> </ol> <p>Otra información, como zonas de inundaciones con alto contenido de sedimentos y flujos de derrubios e información de otras fuentes de contaminación.</p>

## PLANES DE GESTIÓN

Los Estados miembros establecerán objetivos adecuados de gestión centrandose su atención en la reducción de las consecuencias adversas potenciales de la inundación para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica, y, si lo consideran oportuno, en iniciativas no estructurales o en la reducción de la probabilidad de las inundaciones.

Éstos tendrán en cuenta aspectos pertinentes tales como los costes y beneficios, la extensión de la inundación y las vías de evacuación de inundaciones, las zonas con potencial de retención de las inundaciones, como las llanuras aluviales naturales, los objetivos medioambientales indicados en el artículo 4 de la Directiva 2000/60/EC, la gestión del suelo y del agua, la ordenación del territorio, el uso del suelo, la conservación de la naturaleza, la navegación e infraestructuras de puertos.

Estos planes abarcarán todos los aspectos de la gestión del riesgo, centrándose en la prevención, protección y preparación, incluidos la previsión y los sistemas de alerta temprana, y teniendo en cuenta las características de la cuenca hidrográfica considerada. Los planes de gestión del riesgo de inundación podrán incluir la promoción de prácticas de uso sostenible del suelo, la mejora de la retención de aguas y la inundación controlada de determinadas zonas en caso de inundación. Se elaborará un único plan de gestión del riesgo de inundación o una serie de planes de gestión coordinados por demarcaciones hidrográficas.

La Directiva 2007/60/CE distingue entre mapas de peligrosidad y mapas de riesgo. Los mapas de riesgo deben abarcar las áreas geográficas que podrían ser cubiertas, según tres escenarios posibles:

- a) Inundaciones con baja probabilidad, o escenario de eventos extremos
- b) Inundaciones con una probabilidad media (periodo de retorno  $\geq 100$  años)
- c) Inundaciones con una alta probabilidad, donde sea apropiado

Los periodos de retorno adoptados en estos escenarios parecen ser apropiados para gestión de inundaciones en ríos, pero no son adecuados para inundaciones ante sucesos de lluvia extrema en entorno urbano y con sistemas de drenaje en carga. La información que la Directiva solicita para estos mapas de peligrosidad es la siguiente:

- a) Extensión de la inundación
- b) Calados o nivel de agua, cuando sea necesario
- c) Donde sea necesario, la velocidad del agua o parámetros adecuados

Los mapas de riesgo deben mostrar las consecuencias potenciales adversas asociadas a los escenarios de inundaciones descritos anteriormente, según los términos siguientes:

- a) El número indicativo de habitantes potencialmente afectados
- b) Tipo de actividad económica del área potencialmente afectada

En base a información obtenida en relación a eventos de inundaciones por el mundo, varias condiciones pueden llevar a riesgo de daños o pérdida de vidas, y a continuación se recogen algunas de ellas:

- Donde el agua de la inundación tiene gran profundidad
- Donde las velocidades del flujo son elevadas
- Donde la combinación de calado y velocidad resulta peligrosa para los peatones. Éstos, pudiendo ser inconscientes de la fuerza del agua, pueden ser arrastrados por el efecto del

agua. Estudios experimentales sugieren que el límite de seguridad (para adultos) es el producto de calado (m) por velocidad (m/s) en el rango de 0.5 a 1.0 m<sup>2</sup>/s.

- Donde la duración del evento es mucha y/o las condiciones climáticas son severas, ocasionando fallecimientos por exposición. En estos casos la gente atrapada en edificios o en los tejados de éstos pueden sufrir graves afecciones debido a la exposición.
- Donde el comienzo de la inundación es repentino debido a lluvias relámpago.
- Donde no hay avisos o advertencias.
- Donde las víctimas presentan problemas de salud o de movilidad previos a la inundación.
- Donde hay flujo de escombros en el agua circulante que puede causar fallecimientos o lesiones. Además de los peligros causados por los escombros, otros tipos de contaminación pueden causar riesgo a las personas, por ejemplo, la emisión de productos químicos peligrosos.

### II.3. Criterios de evaluación de la peligrosidad para personas ante inundaciones

Este apartado recoge diversas propuestas de criterios de peligrosidad ante eventos de inundaciones. Se trata de diferentes autores que a lo largo del tiempo han analizado la peligrosidad que produce la escorrentía hacia las personas que el flujo encuentra a su paso. Los posibles resultados de la peligrosidad podrían ser el vuelco o deslizamiento del peatón y su consiguiente arrastre, así como la posibilidad que conductores queden atrapados en sus vehículos.

En realidad, referente a peligrosidad ante inundaciones producidas por eventos de lluvia en zona urbana, se encuentran pocas referencias, siguiendo este documento como base de trabajo, la tesis doctoral de Russo (2009), “Design of surface drainage systems according to hazard criteria related to flooding of urban áreas”, en la que se dedica uno de sus capítulos a tratar el tema de peligrosidad en relación a inundaciones en zonas urbanas. El resto de referencias tratan en general inundaciones producidas en cuencas únicamente rurales o en conjunto rurales y urbanas, que no responden a las singularidades que se producen en zonas urbanizadas.

Por otro lado cabe comentar que parece haber consenso en cuanto a las variables que definen la peligrosidad debida a las inundaciones; se trata de la velocidad (v) y el calado (y), así como varias propuestas de combinaciones entre estas variables. Los estudios experimentales sugieren que el límite de seguridad (para adultos) es el producto del calado (m) por la velocidad (m/s) en el rango de 0.5 a 1.0 m<sup>2</sup>/s.

En adelante se recogen diferentes criterios de peligrosidad propuestos por diferentes autores, y agrupados de la siguiente manera:

- Criterios de evaluación de peligrosidad en calles, basados en un calado máximo admisible (y)
- Criterios de evaluación de peligrosidad, según la estabilidad de las personas, basados en la consideración conjunta de calados (y) y velocidades (v)
- Criterios de evaluación de peligrosidad en zonas subterráneas, según el tiempo de evacuación de las personas

### ***II.3.1. Criterios de evaluación de peligrosidad en calles, basados en un calado máximo admisible del flujo***

Un calado máximo admisible en una calle, en relación a daños materiales y minimización de los mismos, es el que no permite la entrada de agua en las viviendas o comercios de la zona inundada. Este caso es menos habitual que la utilización conjunta de calado (y) y velocidad (v), pero en varias ciudades de EEUU éste es el criterio adoptado. En este apartado se describen los criterios de Denver (Colorado) (Wright-Mc Laughlin Engineers, 1969), de la Comisión de Transportes de la República de Sudáfrica (Rooseboom *et al.*, 1986), y de Mendoza (Rep. Argentina) (Nanía, 1999).

#### **II.3.1.1. Criterio de Denver (Colorado, EEUU) (1969)**

El Manual de Criterios de Drenaje de Denver, Colorado, EEUU (Wright-Mc Laughlin Engineers, 1969), establece que en las calles definidas como locales, se permite un calado tal que la cota de la lámina de agua no produzca la inundación de la planta baja de edificios residenciales, públicos, comerciales e industriales y como máximo se aceptan 45 cm sobre el nivel mínimo de la calle. Los edificios con cota de piso terminado inferior a este valor, deberán protegerse contra inundaciones. En calles de mayor importancia los criterios van siendo cada vez más restrictivos.

#### **II.3.1.2. Criterio de la Comisión Nacional de Transportes de la República de Sudáfrica (1986)**

La Comisión Nacional de Transporte de la República de Sudáfrica elaboró el Manual de drenaje de carreteras en 1986 (Rooseboom *et al.*, 1986). En esta manual, los autores propusieron un criterio específico limitando el calado máximo a 6 cm para una lluvia de periodo de retorno de 5 años.

#### **II.3.1.3. Criterio de Mendoza (1999)**

En la ciudad de Mendoza (Rep. Argentina), dadas las características de la urbanización y siguiendo el criterio de Denver (Wright-Mc Laughlin Engineers, 1969), el calado máximo admisible en la calle es aquel que no produce el ingreso del agua en edificios públicos o privados y se ha considerado un valor de 30 cm. Este criterio ha sido utilizado como parámetro para analizar la peligrosidad del flujo en las calles de esa ciudad (Nanía, 1999).

### ***II.3.2. Criterios de evaluación de peligrosidad, según la estabilidad de las personas, basados en la consideración conjunta de los calados y velocidades del flujo***

En este apartado se recogen diferentes criterios de peligrosidad, que consideran de manera conjunta los parámetros hidráulicos de calado y velocidad. Algunos criterios tienen en cuenta los parámetros por separado y otros criterios utilizan el producto de éstos, en base principalmente a la consideración del vuelco y/o deslizamiento del peatón. Como se observa en adelante, se encuentran muchos más criterios que utilizan la combinación de ambos parámetros, calado y velocidad, que los que utilizan solo el calado y se recogen en el apartado anterior.

### II.3.2.1. Criterio de la Federal Emergency Management Agency (FEMA) (1979)

De acuerdo con la Agencia Federal de Gestión de Emergencias de Estados Unidos de América (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1979), una persona de tamaño moderado comienza a perder la estabilidad con un calado de 0.91 m y una velocidad de agua de 0.61 m/s. En este caso el límite del parámetro velocidad (m/s) por calado (m) es:  $(v \cdot y) \leq 0.56 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Un niño pierde la estabilidad en el agua a menores velocidades y calados. Un flujo rápido de agua, de tan solo 15 cm de calado puede hacerle caer (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1979).

### II.3.2.2. Criterio de Abt *et al.* (1989)

Abt *et al.* (1989) llevaron a cabo un estudio teórico y experimental para predecir el calado y la velocidad del flujo donde se derriba una idealizada estructura de cuerpo rígido. A su vez, unas series de sujetos humanos fueron ensayados en un canal rectangular para determinar las velocidades y calados que generaban inestabilidad.

Para evaluar la peligrosidad frente a la vida humana en las inundaciones de agua, se realizó un análisis previo para determinar cuándo un cuerpo podía ser derribado por el agua. Este análisis se realizó usando un monolito de cuerpo rígido compuesto por un bloque rectangular con una cara ancha y miembros superiores tal y como se muestra en la Figura II-4. La configuración del monolito es considerada como una estimación de la estructura del cuerpo extremadamente conservativa en relación a la exposición a las inundaciones. Se asumía que los resultados del análisis del monolito eran representativos en el límite inferior de la estabilidad humana.

Durante un evento de inundación, el monolito se ve sometido a varias fuerzas (la fuerza debida al peso  $F_g$ , la fuerza de flotación  $F_b$ , la fuerza dinámica debida al flujo  $F_D$ , el rozamiento de superficie  $F_R$ , etc). La estabilidad rotacional del monolito es el resultado de las fuerzas actuando en el borde inferior. La rotación o derribo ocurre cuando la fuerza del flujo que se acerca excede el momento debido al peso del monolito. Considerando momentos sobre el borde inferior del monolito, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\sum M_0 = \left[ (F_g - F_b) \cdot \frac{\text{Thickness}}{2} \right] - \left[ P_m \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot y} \right) \right] = 0 \quad \text{[II-1]}$$

donde,

- $y$  es el calado de agua
- $F_b$  es la flotación calculada como:

$$F_b = (\text{Thickness} \cdot \text{Width}) \cdot y \cdot \gamma_w$$

$\gamma_w$  es el peso específico del agua

$F_D$  es la fuerza dinámica debida al flujo y calculada como:

$$F_D = C_d \cdot \rho_w \cdot \frac{v^2}{2} \cdot A \cdot S_f$$

$C_d$  es el coeficiente de arrastre

$\rho_w$  es la densidad del agua

A es el área transversal normal a la dirección del flujo

$S_f$  es el factor de seguridad

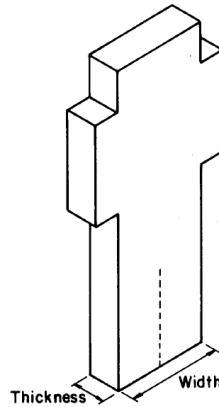


Figura II-4. Monolito de cuerpo idealizado (Abt *et al.*, 1989)

Resolviendo la ecuación [II-1] se obtiene una peligrosidad específica de derribo para cada peso de monolito. La Figura II-5 muestra la peligrosidad de derribo para un peso de monolito de 54.4 Kg (120 lbs) y 152.4 cm (5 feet) de altura. Las curvas de derribo pueden ser generadas para monolitos de diferentes pesos. El análisis asume que el monolito está de pie y se encuentra emplazado en una base firme y estable y la distribución de velocidades es uniforme en el canal.

La segunda fase del estudio fue una campaña experimental consistente en 71 ensayos, de los cuales en 6 se utilizó un monolito y en los 65 restantes sujetos humanos. Los ensayos se realizaron en un canal con pendientes de 0.5% y 1.5% y varios calados y velocidades. El programa experimental se llevó a cabo usando un único monolito y veinte personas.

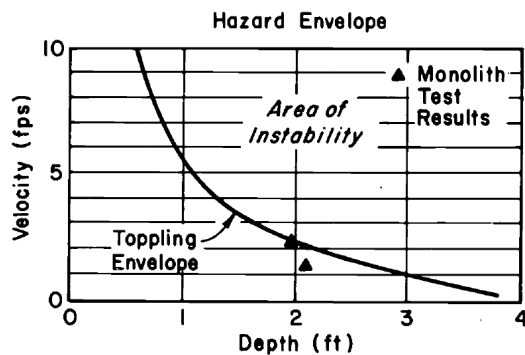


Figura II-5. Curva de derribo para un monolito de 54.4 kg (120 lbs). (1 ft= 30.48 cm; 1 fps= 3.28 m/s)

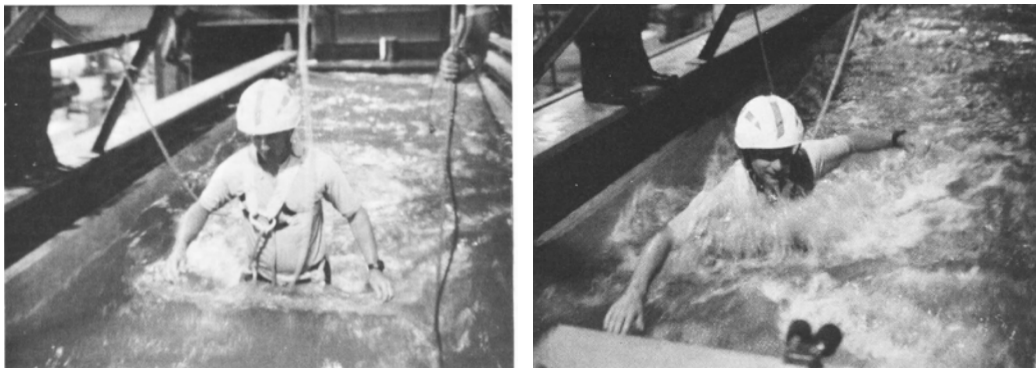
Se fabricó un monolito de hormigón con una huella de 446.5 cm<sup>2</sup> y 152.4 cm (5 pies) de altura para la verificación del derribo sobre la curva mostrada en la Figura II-5 donde los puntos experimentales están representados. Los resultados del análisis con el monolito se consideran



importantes como extrapolación de los datos que supondrían el haber ensayado con jóvenes y ancianos que no fueron considerados en este estudio.

Se presentará una comparación de los resultados de los ensayos con personas y con el cuerpo rígido mediante el producto  $v \cdot y$ , donde  $y$  es el calado y  $v$  es la velocidad del flujo.

Fueron ensayadas veinte personas con pesos entre 40.9 y 91.4 kg y alturas entre 152 y 183 cm. Cada sujeto fue ensayado hasta que indicaba una pérdida de estabilidad o de maniobrabilidad en el flujo según se observa en la Figura II-6. Los productos  $v \cdot y$  de inestabilidad para cada sujeto y para cada condición de ensayo se encontraban en el rango comprendido entre 0.71 y 2.13 m<sup>2</sup>/s (entre 7.56 y 22.84 considerando las unidades de longitud anglosajonas) dependiendo también del tipo de superficie. El rango de velocidades se encontraba entre 0.36 y 3.05 m/s, mientras que el de los calados estaba entre 0.49 y 1.20 m.



**Figura II-6.** Sujeto ensayado en el canal

Los resultados de los ensayos experimentales mostraron que el producto  $y \cdot v$  de inestabilidad para una persona que pesara 59.59 kg (124.5 lbs) era significativamente mayor que el producto de  $v \cdot y$  para el derribo de un monolito de 54.4 kg de peso (120 lbs). Esta diferencia se debe a la “innata” habilidad de las personas para compensar las variaciones de las condiciones de flujo y pendiente del canal, ajustando la postura y posición del cuerpo.

Para poder predecir cuantitativamente el punto de inestabilidad de las personas, se realizó un análisis empírico para relacionar el producto  $v \cdot y$  con el peso y la altura de los sujetos. En base a los resultados experimentales se desarrolló la relación [II-2], la cual no diferencia entre tipos de superficies, aunque los ensayos fueron llevados a cabo sobre superficies de diferentes materiales.

$$v \cdot y = [e^{(0.022 \cdot H \cdot P / 1000) + 1.088}]^2 \quad \text{[II-2]}$$

donde,

- $P$  es el peso de un peatón (libras)
- $H$  es la altura de un peatón (pies)

Debido a los procedimientos y restricciones experimentales, los resultados no reflejan completamente la situación real del flujo de la inundación. De acuerdo con Abt *et al.* (1989), el estudio incluye las siguientes tendencias y restricciones:

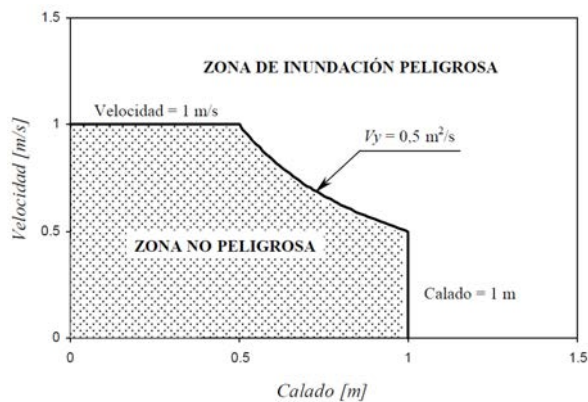
- Las personas ensayadas fueron influenciadas por el equipo de seguridad
- Las personas aprendieron a maniobrar en el agua con el tiempo
- Dos horas de trabajo incluían de 2 a 4 ensayos, lo cual puede ocasionar fatiga a la persona ensayada
- Las condiciones de ensayo fueron óptimas. En otras palabras, las condiciones de iluminación eran buenas y no se incluían escombros (debris) en el agua. La temperatura del agua variaba entre 20°C y 26°C
- Las personas ensayadas tenían una edad comprendida entre 19 y 54 años y se encontraban en buen estado de salud
- Las personas ensayadas no llevaban ninguna carga adicional

### II.3.2.3. Criterio de Témez (1992)

Este criterio, propuesto por Témez (1992), se utiliza en la definición de una zona de inundación peligrosa. Témez define la zona de inundación peligrosa, como aquella en donde existe serio riesgo de pérdidas humanas o graves daños personales. Para que una zona merezca tal calificativo deben darse las condiciones desfavorables de calado y velocidad del flujo que se definen en la Figura II-7.

Este criterio tiene en cuenta los resultados de ensayos de laboratorio de situaciones límite de estabilidad de personas realizadas por Abt *et al.* (1989) en la Universidad de Colorado, especialmente en lo que atañe al producto de la velocidad por el calado, aplicando un coeficiente de seguridad variable.

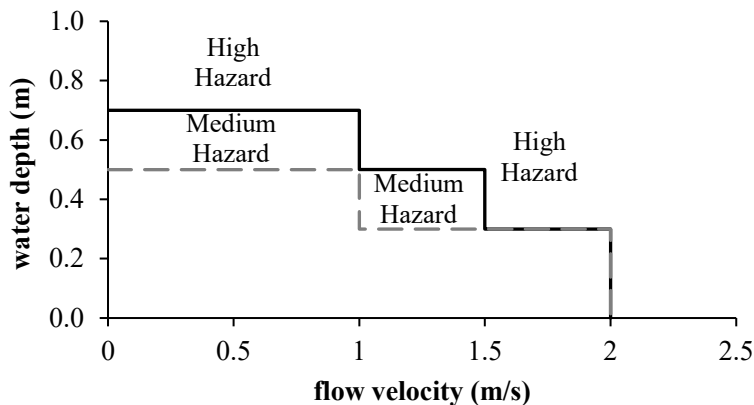
El límite de calados propuesto por Témez, de 1 m, podría resultar adecuado en su caso para el análisis de vías de intenso desagüe y para evaluar el riesgo de pérdidas de vidas, pero este calado límite parece ser excesivo en zonas urbanas densamente pobladas, en las que un calado de esa magnitud, sin tener en cuenta la velocidad, ocasionaría posiblemente no pérdida de vidas, pero sí cuantiosos daños materiales. Además, las condiciones de flujo habituales en zonas urbanas, producidas tras un evento de lluvia, presentan velocidades superiores a 1m/s, siendo por tanto este valor propuesto por Témez muy restrictivo para calles que presentan bajos valores de rugosidad.



**Figura II-7.** Criterio para la delimitación de la zona de inundación peligrosa, según Témez (1992)

### II.3.2.4. Criterio de la región de Liguria (1993)

Para Liguria, una densa región costera de Italia y limitante con Francia, Ravazzani *et al.* (2009) publicaron un documento acerca de la elaboración de mapas de inundación. En estos trabajos los autores adoptaron algunos valores límite de calado y velocidad para definir las condiciones de peligrosidad. Estos valores límite se muestran en la Figura II-8. La gráfica adoptada en este trabajo se propuso por la región de Liguria (Regione Liguria, 1993) en el “Piano di Bacino stralcio per la difesa idraulica e idrogeologica” (Plan de cuenca para la protección hidráulica e hidro-geológica de la tierra).



**Figura II-8.** Valores límite de calado y velocidad según el criterio de peligrosidad adoptado en la región de Liguria (Italia) (Regione Liguria, 1993)

Los puntos del gráfico que se encuentran sobre la línea continua indican condiciones de alta peligrosidad. Se propone un claro valor límite de velocidad del flujo (2 m/s) para pocos centímetros de calado (desde 0 hasta 30 cm). Estas condiciones de flujo son comunes durante una inundación en zona urbana producida por sucesos fuertes y medios de lluvia, así que este trabajo representa una de las pocas referencias de criterios de peligrosidad en zonas urbanas.

Los autores no explican cómo determinaron los valores límite, y no especifican si se obtuvieron de resultados de bibliografía de investigación, o fueron conseguidos de manera experimental.

### II.3.2.5. Criterio de peligrosidad por inundaciones debidas a rotura de presas en EEUU (1988) y en España (1996)

En el año 1988 el Bureau of Reclamation del Departamento del Interior de los Estados Unidos desarrolló un documento que recogía las directrices para la determinación de la peligrosidad producida por una posible rotura de presas, “Downstream Hazard Classification Guidelines” (U.S. Department of the Interior, 1988). Este documento engloba especialmente las pequeñas presas, cuyos fallos pudieran afectar a pequeñas poblaciones, asumiendo que la peligrosidad aguas abajo de la presa de grandes dimensiones es usualmente obvia.

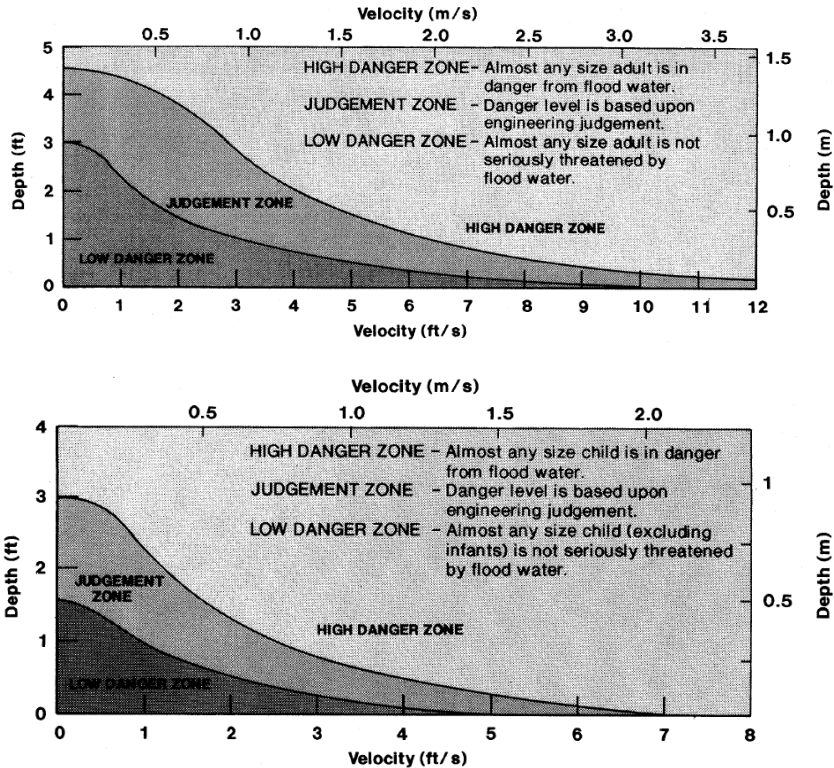


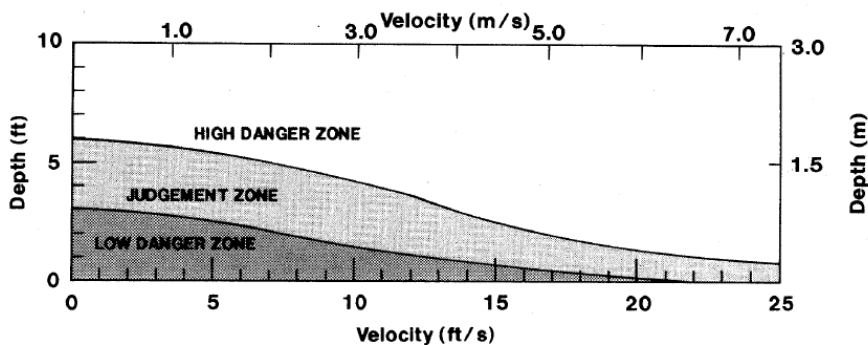
Figura II-9. Definición de zonas de peligrosidad para adultos (arriba) y para niños (abajo), gráficas en pies para el calado y pies/segundo para la velocidad. Fuente: Downstream Hazard Classification Guidelines

Se clasifican tres zonas posibles de peligrosidad, baja, indefinida o de valoración subjetiva y peligrosidad alta, definiéndolas de la siguiente manera:

- Zona de peligrosidad baja: Cuando se produce esta peligrosidad, por combinación de calado y velocidad, la afectación sobre las vidas de las personas se asume que es nula.
- Zona de peligrosidad alta: Cuando se produce esta peligrosidad, por combinación de calado y velocidad, se asume que las vidas de las personas están en peligro.
- Zona indefinida o de valoración subjetiva: Se trata de una zona situada entre las dos anteriores y presenta incerteza sobre la afectación a las vidas de las personas. Se trata por tanto de una zona que debe ser analizada y valorada por el ingeniero en cada caso.

Referente a los peatones, este documento presenta gráficas de peligrosidad, distinguiendo entre adulto (persona de más de 1.5m de altura y 54 kg de peso) y niño, utilizando esta segunda para poblaciones mixtas y obtener resultados del lado de la seguridad. Estas gráficas se muestran en la Figura II-9.

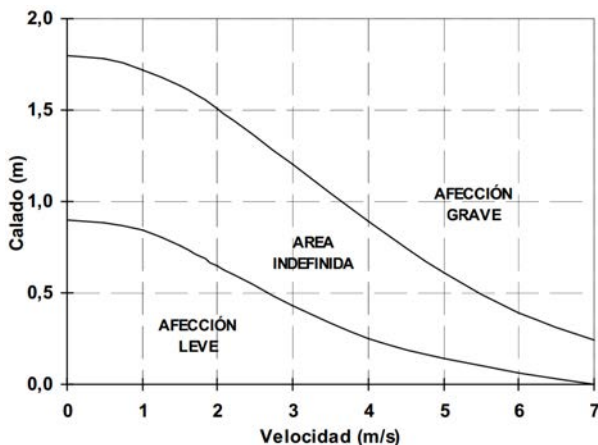
En cuanto a peligrosidad en zonas con viviendas o edificios, se presenta el gráfico que se muestra en la Figura II-10, y que indica la peligrosidad, también en función de la relación calado y velocidad, para los ocupantes de dichas viviendas.



**Figura II-10.** Definición de zonas de peligrosidad para los ocupantes de las viviendas situadas en la zona de inundación, gráfica en pies para el calado y pies/segundo para la velocidad. Fuente: Downstream Hazard Classification Guidelines

Unos años después la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de Aguas (DGOHCA), (Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno español) publicó en 1996, las Directrices Técnicas para clasificar las presas en base al riesgo potencial de su rotura (Ministerio de Medio Ambiente de España, 1996). Russo *et al.* (2014) realizan el análisis del grado de validez de las gráficas propuestas en dichas Directrices Técnicas.

En este documento, para zonas urbanas, se propuso un gráfico (Figura II-11) que distinguía entre condición de peligrosidad baja, indefinida o grave. En este gráfico se puede observar que las condiciones de peligrosidad son menos restrictivas que en muchos otros criterios de peligrosidad expuestos en este capítulo y coincide con los criterios expuestos en el documento del Bureau of Reclamation del Departamento de Interior de los Estados Unidos, “Downstream Hazard Classification Guidelines” (U.S. Department of the Interior, 1988), adoptando únicamente la gráfica de peligrosidad a vidas humanas en viviendas (Figura II-10), adaptando las unidades anglosajonas al sistema internacional.



**Figura II-11.** Definición de zonas de peligrosidad en zonas urbanas según las Directrices Técnicas en relación a la rotura de presas en España

### II.3.2.6. Criterio del condado de Clark (Las Vegas, EEUU) (1999)

El Manual de Criterios Hidrológicos y de Diseño del Drenaje del Condado de Clark, Nevada, EEUU (Clark County Regional Flood Control District (CCRFC), 1999) establece que para las calles locales con anchos menores a 24 m, se permite considerar un calado máximo sobre la parte más baja de la calle, normalmente junto al bordillo, de 30 cm, para evaluar la capacidad de transporte de la misma, y a su vez propone un producto  $y \cdot v \leq 0.55 \text{ m}^2/\text{s}$ . Por otro lado, en zonas con peligrosidad de inundación, se establece que el nivel de piso terminado en las viviendas debe ser como mínimo de 45 cm sobre el nivel de la parte alta del bordillo, o bien, deberían estar protegidas contra inundaciones, lo que estaría aceptando en esas zonas, la ocurrencia de calados de ese calibre.

En otras ciudades, como en Austin, Texas, se utiliza el criterio de dejar reservada una zona de la calzada, la más alta, junto a la coronación, para la circulación de vehículos de emergencia. De este modo no se define un calado máximo en forma explícita, sino que se hace implícitamente definiéndolo como aquél que no supere la cota de coronación de la calle, valor que puede variar ampliamente en función del ancho de la calle y de las pendientes transversales que posea (City of Austin Dept. of Public Works, 1977).

### II.3.2.7. Criterio de estabilidad al deslizamiento de Nanía (1999)

Este criterio fue propuesto por Nanía (1999), con el que se consideró la estabilidad al deslizamiento de una persona ante la fuerza de arrastre que ejerce el flujo sobre ella. Cuando es necesario cruzar una calle en la cual el flujo posee una velocidad y un calado determinados, uno tiene la incertidumbre de que si el agua podrá ser capaz de arrastrarnos o no. Para establecer dicho criterio, se planteó que la fuerza que ejerce el agua sobre una persona sea tal que no provoque su deslizamiento y/o caída (Figura II-12). La fuerza de arrastre del agua puede evaluarse como:

$$F_D = \frac{1}{2} C_d \rho_w A v^2 \quad \text{[II-3]}$$

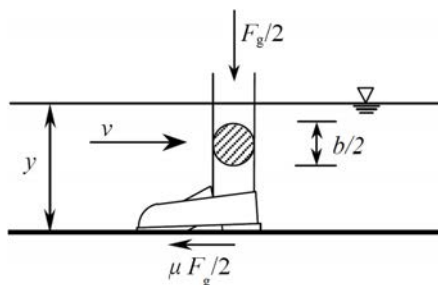
donde,

- $C_d$  es el coeficiente de arrastre, que depende básicamente de la forma de la superficie contra la cual choca el fluido
- $\rho_w$  es la densidad del fluido
- $A$  es la proyección frontal del área en donde actúa la fuerza del agua que es igual a  $y \times b$ , el calado por el ancho de la persona, en este caso de las piernas
- $v$  es la velocidad del fluido

Por otro lado, suponiendo que la persona en cuestión pueda ser capaz de mantenerse en pie, la fuerza que debe equilibrarla es la de fricción del calzado sobre el suelo y que sería igual a:

$$F_R = \mu F_g = \mu(P \cdot g) \text{ con } F_g \text{ la fuerza gravitacional debida al peso}$$

Siendo  $\mu$  el coeficiente de fricción, que depende de los materiales del calzado y del suelo y del estado de ambos, y  $P$  el peso de la persona. No se tiene en cuenta aquí el empuje vertical hacia arriba generado por el volumen líquido desalojado por la parte sumergida del cuerpo.



**Figura II-12.** Fuerzas actuantes sobre las piernas de una persona, en el caso de estar sometida a la acción de la escorrentía

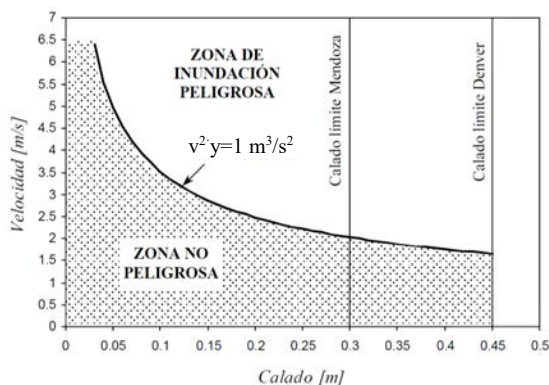
Considerando que el coeficiente de arrastre para un cilindro de altura infinita es igual a 1.2 (Streeter *et al.*, 1979), la densidad del agua es de  $1000 \text{ kg/m}^3$ , el ancho de las piernas  $b=0.1 \text{ m} \times 2=0.2 \text{ m}$ , el peso de la persona de  $50 \text{ kg}$  y el coeficiente de rozamiento entre caucho y hormigón húmedos igual a 0.5 (Gieck, 1981), con un coeficiente de seguridad de 2, para incluir el efecto del empuje y la posible variación de los parámetros considerados, la condición de estabilidad vendría dada por la siguiente desigualdad:

$$v^2 \cdot y \leq \frac{2\mu P g}{C_d \rho_w b^2} = \frac{2 \cdot 0.5 \cdot 50 \cdot 9.81}{1.2 \cdot 1000 \cdot 0.2 \cdot 2} \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2} = 1 \text{ m}^3/\text{s}^2 \quad \text{[II-4]}$$

El coeficiente de seguridad puede interpretarse aplicado al coeficiente de fricción, dada su incertidumbre por los distintos materiales y estados en los que pueden estar tanto el suelo como el calzado, o también al peso o ancho del peatón, ya que puede darse el caso de que el peso sea menor o el ancho de sus piernas mayor o que exista una combinación desfavorable de los tres factores.

Si bien a este criterio se le ponen cifras en función de una cierta tipología de peatón, debe remarcarse la versatilidad del mismo, dado que puede adaptarse al peso, tamaño y forma del peatón que se crea conveniente para cada caso, así como a los diferentes tipos de pavimento y de calzado que se quieran analizar.

El criterio de peligrosidad elaborado quedaría definido, teniendo en cuenta también los criterios de calados máximos, como se muestra en la Figura II-13.



**Figura II-13.** Criterio propuesto para la delimitación de la zona de inundación peligrosa

### II.3.2.8. Criterio del Agriculture and Resource Management Council de Australia y Nueva Zelanda (ARMC) (2000)

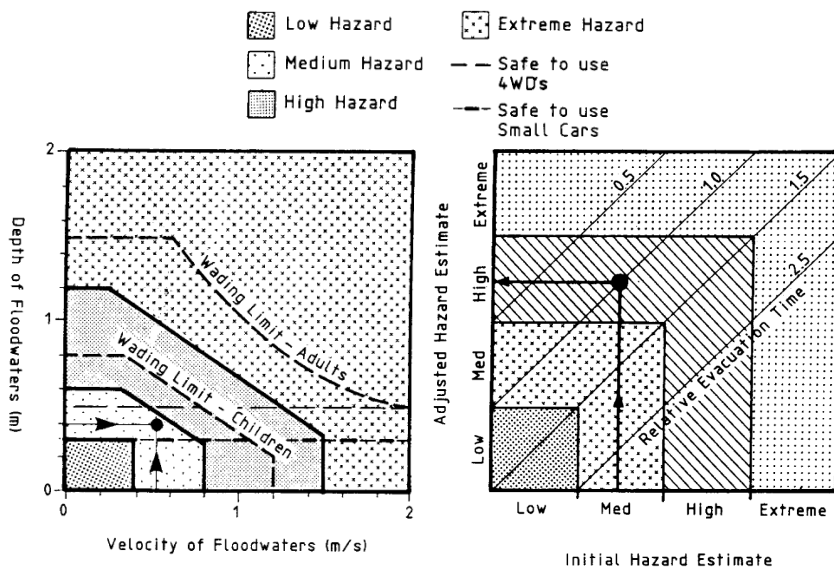
El Consejo para la gestión de la agricultura y de los recursos (ARMC) de Australia y Nueva Zelanda presentó una estimación de la peligrosidad basada en el calado, velocidad y tiempo de evacuación (Agricultural and Resource Management Council of Australia and New Zealand (ARMC), 2000). En esta investigación, la peligrosidad no solo se refiere a la estabilidad de una persona en el agua sino también a la estabilidad de los cimientos, mástiles, césped, etc.

De acuerdo con esta investigación el grado de peligrosidad se divide en cuatro grupos:

- **Baja:** No hay problemas significativos de evacuación. Si fuera necesario, niños y ancianos podrían caminar por el agua sin demasiadas dificultades; los calados y velocidades máximas a lo largo de la ruta de evacuación son pequeños. La evacuación es posible mediante el uso de coches. Hay un tiempo suficiente para la previsión de la inundación, y el aviso y evacuación de ésta; las rutas de evacuación pueden ser recorridas por vehículos por lo menos dos veces durante el tiempo necesario para la evacuación.
- **Media:** Adultos en buen estado de forma pueden desplazarse por el agua sin dificultad, pero los niños y los ancianos pueden tener más dificultades; las rutas de evacuación son más largas, los calados y velocidades máximas son mayores. La evacuación mediante coches es solo posible en las primeras etapas de la inundación, tras las cuales se requieren vehículos todoterreno o camiones.
- **Alta:** Adultos en buen estado de forma tienen dificultades en caminar por el agua con seguridad; las rutas de evacuación por el agua son más largas; los calados y velocidades máximas son mayores (superiores a 1.0 m y 1.5 m/s respectivamente). La evacuación con vehículos de motor es posible con vehículos todoterreno o camiones solo en las primeras etapas de la inundación. Barcos o helicópteros pueden ser necesarios. Las rutas de evacuación permiten el paso de tráfico solo hasta el mínimo tiempo de evacuación.
- **Extrema:** Son necesarios barcos o helicópteros para la evacuación; la salida por el agua a pie no es una opción debido a los altos calados y velocidades que se producen. Los calados y velocidades máximas son superiores a 1.0 m y 1.5 m/s respectivamente.

En la Figura II-14 se muestran unas graficas simples para estimar la peligrosidad a lo largo de las rutas de evacuación en base al calado y la velocidad del agua y del tiempo relativo de evacuación. El tiempo relativo de evacuación es la proporción del tiempo disponible para la evacuación (como se determinó por el comportamiento de la inundación y de la topografía) y del tiempo mínimo necesario para realizar la evacuación, los cuales dependen en gran medida del número y edad de las personas involucradas. El tiempo disponible para la evacuación se mide desde cuando se da la orden de evacuación hasta que la ruta de evacuación no permite el tráfico por el aumento de la inundación. En consecuencia, un tiempo relativo de evacuación de 1.0 significa que el tiempo disponible de evacuación (determinado por el comportamiento de la inundación) es justo el tiempo requerido para la evacuación. Un tiempo relativo de evacuación de menos de 1.0 significa que no hay tiempo suficiente para una ordenada y controlada evacuación.





**Figura II-14.** Estimación de la peligrosidad (izquierda) y efecto del tiempo relativo de evacuación para el índice de peligrosidad (derecha)

En resumen algunos valores ejemplo son los siguientes:

*Límite superior para la zona de alta peligrosidad:*

- Calado de 1.2 m combinado con velocidad de 0 m/s
- Calado de 0.3 m combinado con velocidad de 1.5 m/s

*Límite de poder caminar por el agua para adultos:*

- Calado de 1.5 m combinado con una velocidad de 0 m/s
- Calado de 0.5 m combinado con velocidad de 2 m/s

### II.3.2.9. Criterio RESCDAM (2000)

El proyecto europeo RESCDAM (Karvonen *et al.*, 2000), “Desarrollo de acciones de rescate en base al análisis de inundaciones debidas a rotura de presas”, fue puesto en marcha en 1999 y coordinado por el Instituto Finlandés de Medio Ambiente (Reiter, 2000). Los tres objetivos de este proyecto eran obtener resultados y conclusiones para los siguientes aspectos:

- 1- Estabilidad y maniobrabilidad de personas en un flujo de agua
- 2- Resistencia de viviendas en un flujo de agua
- 3- Coeficientes de rugosidad de bosques y casas

La estabilidad y maniobrabilidad de personas y la resistencia de viviendas en un flujo de agua fue estudiada para obtener información de cara a las autoridades de rescate, estimando los riesgos de una inundación por rotura de presa y el planeamiento de acciones de rescate. La estabilidad de personas y el coeficiente de rugosidad de bosques y casas fueron estudiados mediante ensayos en laboratorio físico. El programa experimental RESCDAM (Karvonen *et al.*, 2000) se centró en ensayos con sujetos humanos para definir los límites para una acción de rescate seguro en caso de inundación por rotura de una presa. De manera práctica, esto significaba la combinación del calado

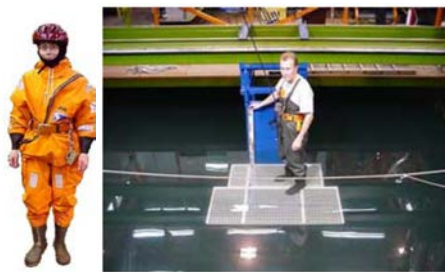
( $y$ ) y velocidad ( $v$ ) del flujo según el producto ( $v \cdot y$ ), el cual describe la supervivencia de las personas en la inundación.



**Figura II-15.** Canal (denominado en el estudio como modelo de cuenca) (izquierda) y carro de remolque (derecha) de la Universidad de Helsinki (Karvonen *et al.*, 2000)

Los experimentos sobre la estabilidad de las personas se llevaron a cabo en canal del laboratorio tecnológico de la Universidad de Helsinki. Dicho canal tenía unas dimensiones de 130 m de longitud y 11 metros de ancho. El calado era de aproximadamente 5.5 m y la temperatura del agua estaba sobre los 16°C (Figura II-15).

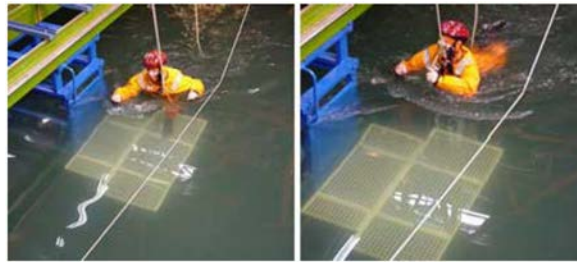
Los sujetos humanos fueron ensayados en una estructura de plataforma especial la cual fue especialmente diseñada y construida para tales ensayos. A diferencia de otros estudios, en este caso la plataforma se movía con el sujeto en ella, simulando la velocidad del agua en un caso real. La estructura de plataforma se instaló en un carro de remolque que sirvió como un estante para la colocación de las personas. Fueron ensayadas siete personas: cinco hombres y dos mujeres; altura 1.60-1.95 m; peso 48-100 kg; edad 17-60 años. Todas las personas ensayadas llevaban trajes de supervivencia Gore-Tex, casco de seguridad y fueron atados con una cuerda de seguridad. Además, había un mango y una segunda cuerda de seguridad que podía ser usada cuando los sujetos perdiesen la estabilidad (Figura II-16).



**Figura II-16.** Individuo con traje de supervivencia Gore-Tex, cinturón y casco de seguridad (izquierda). Individuo con botas altas y cinturón de seguridad, atado con cuerda de seguridad (derecha) (Karvonen *et al.*, 2000)

Cada sujeto fue ensayado individualmente para diferentes calados de agua. Antes de los experimentos, cada individuo se familiarizó con las instalaciones de los ensayos y los equipos de seguridad con el agua quieta. El calado inicial de agua fue fijado y posteriormente se le dio al carro de remolque la velocidad inicial. Las condiciones iniciales se escogieron de manera que el

producto ( $v \cdot y$ ) fuera lo suficientemente bajo para que fuese sencillo caminar por el agua. Cada individuo tenía que caminar por el agua, perpendicular al flujo y hacia aguas abajo del flujo. Si un individuo conservaba la maniobrabilidad, la velocidad se aumentaba gradualmente. Este proceso continuaba hasta que el sujeto perdía la estabilidad o la maniobrabilidad (Figura II-17 y Figura II-18). Una vez se pierde la estabilidad, el carro de remolque es inmediatamente parado. El calado y velocidad del agua fueron registrados y el experimento continuaba con el siguiente calado y procedimiento hasta por lo menos haber sido ensayados cuatro calados. El procedimiento experimental fue llevado a cabo con los siete sujetos, grabado y fotografiado.



**Figura II-17.** Individuo 1; calado= 1.1 m; velocidad = 0.7 m/s (Karvonen *et al.*, 2000)



**Figura II-18.** Individuo 5; calado= 1.07 m; velocidad = 1.0 m/s (Karvonen *et al.*, 2000)

En el programa experimental se ensayaron a siete individuos. El protocolo de ensayos preveía velocidades entre 0.6 y 2.75 m/s y calados entre 0.3 y 1.1 m. Debido a las propiedades individuales, existe un amplio rango del producto ( $v \cdot y$ ) describiendo la maniobrabilidad de la persona en el flujo. El producto ( $v \cdot y$ ) que causa la pérdida de estabilidad o maniobrabilidad varía de 0.64 m<sup>2</sup>/s hasta 1.26 m<sup>2</sup>/s. Los individuos más altos y fuertes mostraban mejor capacidad de maniobra.

Las restricciones del estudio de acuerdo con Abt *et al.* (1989) fueron unas óptimas condiciones de ensayo, la presencia del equipo de seguridad y la habilidad de los sujetos ensayados para aprender a maniobrar en el flujo con el tiempo. Las mismas restricciones son seguramente válidas en el estudio de RESCDAM (Karvonen *et al.*, 2000). No hay duda que los productos ( $v \cdot y$ ) serían considerablemente menores si se tratara de eventos reales en los que no se dan las óptimas condiciones de laboratorio. Por ejemplo, durante las inundaciones de primavera las condiciones del tiempo en Finlandia pueden ser difíciles, encontrándose siempre algunos escombros flotando en agua extremadamente fría. Las inundaciones pueden también propagarse por superficies que pueden ser irregulares y rugosas. A pesar de estas consideraciones los resultados del RESCDAM (Karvonen *et al.*, 2000) y el programa de estudio de Colorado aportan una cierta concepción de los límites de estabilidad de las personas en un flujo de agua.

En base a los estudios de Abt *et al.* (1989) y del proyecto RESCDAM (Karvonen *et al.*, 2000), se proporcionan las aproximaciones de los límites para la maniobrabilidad y estabilidad de adultos en un flujo de agua. Estos límites son válidos para adultos en flujos sin instrumentos especiales, tales como una cuerda, excluyendo el traje de supervivencia. La habilidad de los niños para hacer frente al flujo no fue estudiada, pero un niño no debería nunca intentar hacer frente al flujo sin ayuda. Las condiciones del flujo y ambiente se dividieron en tres categorías: pobre, normal y buena.

En buenas condiciones un adulto es capaz de maniobrar si:

$$v \cdot y < 0.006 \cdot H \cdot P + 0.3 \tag{II-5}$$

donde,

- $v$  es la velocidad del flujo [m/s]
- $y$  es el calado [m]
- $H$  es la altura del adulto [m]
- $P$  es el peso del adulto [kg]

Si las condiciones son pobres, el límite de maniobrabilidad es:

$$v \cdot y < 0.002 \cdot H \cdot P + 0.1 \tag{II-6}$$

Para resumir los resultados del proyecto europeo RESCDAM (Karvonen *et al.*, 2000), se muestra la Tabla I-4:

**Tabla II-3** Daño potencial ante inundaciones (Karvonen *et al.*, 2000)

Daño para:	Parámetro de daño ( $v \cdot y$ ) (m <sup>2</sup> /s)		
	Leve	Medio	Alto
Niños	<0.1	0.1-0.25	>0.25
Adultos	<0.3	0.3-0.7	>0.7
Coches	<0.9	0.9-1.5	>1.5
Casas ligeras	1.3	1.3-2.5	>2.5
Casas de madera bien construidas	<2.0; v>2.0 m/s	2.0-5.0; v>2.0 m/s	>5.0
Casas de ladrillo	<3.0; v>2.0 m/s	3.0-7.0; v>2.0 m/s	>7.0

### II.3.2.10. Criterio de Estabilidad al Vuelco de Gómez (2001)

En el estudio realizado por Gómez (2001), para analizar el espaciamiento entre imbornales de la ciudad de Barcelona, se ha considerado la estabilidad al vuelco de un peatón para obtener un criterio de seguridad. Considerando al peatón como un sólido rígido, hipótesis que se cumple sólo en forma aproximada, el momento volcador ( $M_0$ ) será el provocado por la fuerza dinámica del flujo sobre el peatón, definida anteriormente como  $F_D$ , aplicada a una altura de la mitad del calado.

$$M_0 = F_D \cdot \frac{y}{2} = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho_w \cdot A \cdot v^2 \cdot \frac{y}{2} \tag{II-7}$$

Por otra parte, el momento estabilizador ( $M_e$ ) está constituido por el peso de la persona, aplicado en su centro de gravedad, por lo que tendrá un brazo de palanca igual a la mitad del diámetro de las piernas, es decir,  $b/4$  (Figura II-19).

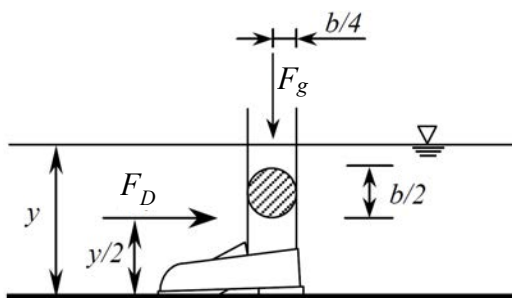
$$M_e = F_g \cdot \frac{b}{4} = P g \cdot \frac{b}{4} \quad \text{[II-8]}$$

Efectuando el análisis de estabilidad de un peatón tal como el considerado para el criterio de estabilidad al deslizamiento, y aplicando aquí también un coeficiente de seguridad de 2 para considerar el efecto del empuje y una posible variación de los parámetros aplicados, podemos llegar a las siguientes desigualdades:

$$\frac{1}{2} M_e \geq M_0 \quad \text{[II-9]}$$

$$(v^2 \cdot y^2) \leq \frac{P g \cdot b / 4}{C_d \rho_w b 2} = \frac{50 \cdot 9.81 \cdot 0.05}{1.2 \cdot 1000 \cdot 0.2 \cdot 2} \frac{m^4}{s^2} = 0.204 \frac{m^4}{s^2} \quad \text{[II-10]}$$

Que proporciona un valor de  $(v \cdot y) \leq 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$ .



**Figura II-19.** Esquema de las fuerzas actuantes sobre las piernas de una persona, para evaluar su estabilidad al vuelco producido por la acción de la escorrentía

### II.3.2.11. Criterio propuesto en la tesis doctoral de Kelman (2002)

En su tesis doctoral, Kelman (2002) proporciona un análisis detallado de los impactos del calado y la velocidad en las propiedades residenciales del este de Inglaterra. La investigación propone una escala de daños (DS: Damage Scale) desde DS0 hasta DS5 según se indica en la Tabla I-6.

Kelman proporciona también unos gráficos muy útiles en relación al impacto del calado y la velocidad sobre los edificios. Las líneas representan los límites inferiores para cada nivel de daño: DS2, DS3, etc. (Figura II-20).

**Tabla II-4** Escala de daños propuesta por Kelman (2002)

Daño	Descripción
DS0	El agua no toca los edificios
DS1	El agua toca los edificios pero no entra en ellos
DS2	El agua se infiltra en los edificios y genera daños externos
DS3	El agua o escombros entran en los edificios a través de las puertas i ventanas cerradas
DS4	Daños estructurales en las paredes permiten la entrada de agua y/o escombros
DS5	Colapso estructural y posterior reparación

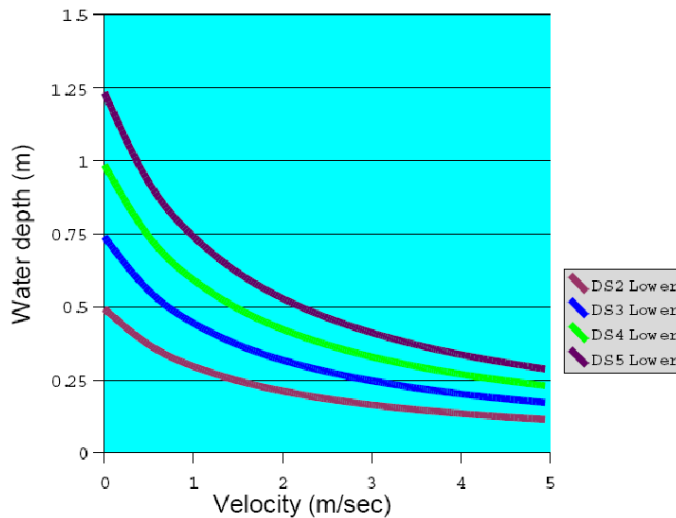


Figura II-20. Daño a los edificios en base a la tesis doctoral de Kelman (2002)

### II.3.2.12. Procedimiento de Ramsbottom *et al.* (2006)

Ramsbottom *et al.* (2006) (Fase 2 del Informe del DEFRA inglés “Riesgo de Inundación para Personas”), consideraron añadir un factor para los escombros arrastrados por el agua para reflejar el incremento de peligrosidad que este hecho conlleva. De acuerdo con este procedimiento, la peligrosidad de inundación se puede representar con la siguiente expresión:

$$HR = y \cdot (v + 0.5) + DF \tag{II-11}$$

donde,

- *HR* es el nivel de peligrosidad por inundación
- *y* es el calado [m]
- *v* es la velocidad del flujo [m/s]
- *DF* es el factor de escombros determinado mediante la Tabla II-5

Tabla II-5 Valores del factor de escombros para diferentes calados de inundación, velocidades y uso del suelo dominante

Calados	Pasto/cultivable	Bosque	Urbano
0 a 0.25 m	0	0	0
0.25 a 0.75 m	0	0.5	1
$y > 0.75 \text{ m}$ y/o $v > 2$	0.5	1	1

De acuerdo con la ecuación [II-11] y con la Tabla II-5, se muestran en la Tabla II-6 los valores críticos de peligrosidad de inundación. Se muestran categorías de peligrosidad en función del peligro a las personas (Ramsbottom *et al.*, 2006).

**Tabla II-6** Peligrosidad referente a las personas como función de velocidad y calado (Ramsbottom *et al.*, 2006)

$y \cdot (v + 0.5) + DF$	Grado de peligrosidad	Descripción
<0.75	Leve	Precaución “La zona de inundación con flujo de agua superficial o más profunda en la que se puede permanecer de pie.”
0.75-1.25	Moderada	Peligro para algunos (Por ejemplo, niños) “Peligro: Zona de inundación con profundidad o alta velocidad de flujo”
1.25-2.5	Significante	Peligro para la mayoría de gente. “Peligro: Zona de inundación con profundidad y alta velocidad de flujo”
>2.5	Extrema	Peligro para todos “Peligro extremo: Zona de inundación con profundidad y alta velocidad de flujo”

El procedimiento llevado a cabo parece muy útil para gestionar la valoración de la peligrosidad del área inundada. Desafortunadamente la expresión [II-11] es el resultado de una revisión de una investigación previa en esta área y no fue conseguida de manera empírica. Tal y como dijo el autor, su estudio recomienda más ensayos de laboratorio basados en los impactos de diferentes aspectos de la calidad del agua, como los escombros contenidos en ella, avalanchas de lodos, y aspectos químicos y biológicos de la calidad del agua que puedan causar serios daños o fatalidades a las personas (Surendran *et al.*, 2008).

### II.3.2.13. Criterio Suizo (2004)

En Suiza se propuso otro criterio para relacionar los parámetros hidráulicos del flujo (velocidad y calado) a los niveles de peligrosidad en base al área de vulnerabilidad. (Tabla II-7 y Tabla II-8) (Belleudy, 2004).

**Tabla II-7** Criterio suizo de peligrosidad relacionado a algunos parámetros hidráulicos

	Calado < 1 m	Calado > 1 m
		
Velocidad de flujo < 0.5 m/s	Peligrosidad baja	Peligrosidad alta
Velocidad de flujo > 0.5 m/s	Peligrosidad alta	Peligrosidad muy alta

Tabla II–8 Criterio de vulnerabilidad (Belleudy, 2004)

Criterio de vulnerabilidad Tipo de uso del suelo	Duración máxima permitida de la inundación	Calado máximo permitido	Frecuencia de inundación permitida	Velocidad máxima de flujo permitida
<b>Centro urbano (Hospital, bomberos, etc.)</b>	Instantáneo	0	1000 años	0.25 m/s
<b>Áreas residenciales</b>	Instantáneo	0.5 a 2 m	10 a 1000 años	0.25 m/s
<b>Zona industrial</b>	Instantáneo	0.3 a 0.6 m	1 a 100 años	
<b>Áreas de compras y negocios</b>	Instantáneo	0.3 a 0.6 m	5 años	
<b>Carreteras, callas urbanas y avenidas</b>	Algunas horas	0.1 a 0.2 m	1 a 10 años	0.5 a 1 m/s
<b>Ferrocarriles</b>	Instantáneo	0.3 m	5 años	
<b>Áreas especiales</b>	Instantáneo	0.1 a 0.6 m	1000 años	
<b>Zonas de camping</b>	Instantáneo	0.5 m	10 años	0.5 m/s
<b>Áreas deportivas</b>	Un día		1 año	

### II.3.2.14. Criterio del Departamento de Infraestructuras, Planificación y Recursos Naturales del Gobierno de Nueva Gales del Sur (Sídney, Australia) (2005)

El Manual para el desarrollo de áreas inundables (La gestión de terrenos propensos a inundaciones) fue desarrollado y publicado el año 2005 por el Departamento de Infraestructuras, Planificación y Recursos Naturales del Gobierno de Nueva Gales del Sur (Australia) (Department of Infrastructure Planning and Natural Resources. New South Wales Government, 2005).

Se trata de un manual cuyo principal objetivo es reducir el impacto de las inundaciones y la afectación a propietarios individuales y ocupantes de zonas inundables, así como reducir las pérdidas privadas y públicas resultantes de las inundaciones.

En el manual se explica desde la evaluación de las inundaciones hasta la gestión de los riesgos que éstas suponen. Dedicó uno de sus 14 anexos a la categorización hidráulica y de la peligrosidad. En éste se reconocen tres categorías hidráulicas de zonas propensas a la inundación (cauce, depósito de inundaciones y franja de inundación) y dos niveles de peligrosidad hidráulica (peligrosidad leve y peligrosidad alta). La división de la zona de inundación sobre la base de estos dos efectos produce las siguientes seis categorías de zonas propensas a inundaciones:

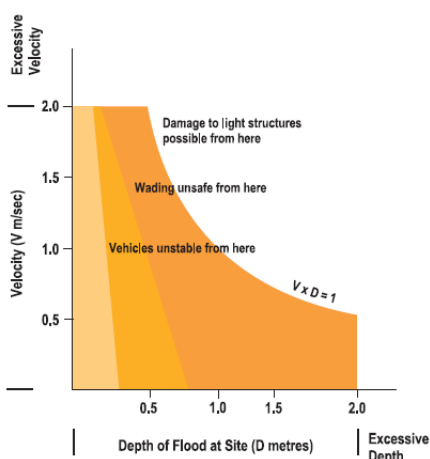
1. Peligrosidad leve - zona de franja de inundación
2. Peligrosidad leve – zona de almacenamiento de inundación
3. Peligrosidad leve – cauce
4. Peligrosidad alta – zona de franja de inundación
5. Peligrosidad alta – zona de almacenamiento de inundación
6. Peligrosidad alta - cauce



Dicho apéndice describe estas categorías, debate los factores significantes que afectan a éstas y proporciona las directrices para su determinación. En cuanto a las categorías sobre peligrosidad propuestas, son definidas de la siguiente manera:

- **Peligrosidad alta:** posible peligro a la seguridad de las personas; la evacuación mediante camiones es complicada; dificultad para los adultos al andar por el agua con seguridad; potencial daño significativo estructural a edificios.
- **Peligrosidad leve:** en caso de que fuera necesario, se usarían camiones para evacuar a personas y sus posesiones; los adultos tendrían poca dificultad en andar por el agua con seguridad.

La Figura II-21 y la Figura II-22 se recogen en el documento y pretenden ofrecer una caracterización inicial de la peligrosidad únicamente bajo consideraciones hidráulicas. La gráfica de la Figura II-21 muestra relaciones aproximadas entre el calado y la velocidad de las inundaciones y la peligrosidad resultante. Esta información se utilizó para definir las *categorías provisionales* de peligrosidades leves y altas.

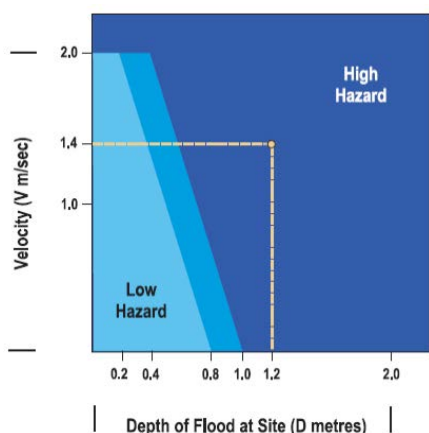


#### Notes

1. At velocities in excess of 2.0 m/s, the stability of foundations and poles can be affected by scour. Also, grass and earth surfaces begin to scour and can become rough and unstable
2. The velocity of floodwaters passing between buildings can produce a hazard, which may not be apparent if only the average velocity is considered. For instance, the velocity of floodwaters in a model test has risen from an average of 1 m/sec to 3 m/sec between houses.
3. Vehicle instability is initially by buoyancy.
4. At floodwater depths in excess of 2.0 meters and even at low velocities, there can be damage to light-framed buildings from water pressure, flotation and debris impact.

Derived from laboratory testing and flood conditions which caused damage.

Figura II-21. Relaciones de velocidad y calado



#### Notes

The degree of hazard may be either -

- reduced by establishment of an effective flood evacuation procedure.
- increased if evacuation difficulties exist.

In the transition zone highlight by the median colour, the degree of hazard is dependant on site conditions and the nature of the proposed development.

#### Example:

If the depth of flood water is 1.2 m and the velocity of floodwater is 1.4 m/sec then the provisional hazard is high

Figura II-22. Relaciones de peligrosidad hidráulica

Así, se considera como peligrosidad leve cuando la velocidad y el calado de agua se encuentran por debajo del umbral de seguridad para personas, con velocidad límite de 2.0 m/s para calados incluso inferiores a 0.2 m, y con un calado límite de 0.8 m incluso a velocidad nula. Se considera también una franja paralela al umbral de seguridad para las personas, denominada como franja de transición hasta un calado límite de 1.0 m. La extensión de la zona de peligrosidad leve se extenderá hasta los límites de dicha franja de transición dependiendo de las condiciones propias del lugar en el que se haya producido la inundación. Más allá del límite de esta franja se considera en cualquier caso peligrosidad alta.

Dichas categorías se asumen como provisionales puesto que “no reflejan los efectos de otros factores que influyen en la peligrosidad”. Se trata por tanto de unos diagramas que ofrecen un punto de inicio para la determinación de las categorías de peligrosidad. Cuando los otros factores que afectan a la peligrosidad son identificados y cualificados (extensión de la inundación, tiempo de aviso, duración, problemas de evacuación, etc), la categoría provisional de peligrosidad obtenida debe ser revisada si es necesario para darle el carácter definitivo a esa peligrosidad. Se aconseja además la preparación de mapas de peligrosidad que sirvan para evaluar las consecuencias de dicha peligrosidad para áreas desarrolladas existentes y futuras situadas en zonas inundables.

### II.3.2.15. Criterio del PICBA06 (Pla Integral de Clavegueram de Barcelona), CLABSA (2006)

El drenaje de superficie es una condición esencial para mantener un buen nivel de servicio de las calles y un buen nivel de seguridad del tráfico. El agua en el pavimento puede interrumpir el tráfico, reduce la resistencia al deslizamiento, e incrementa el posible hidroplaneo o aquaplaning. Las administraciones públicas deben garantizar un buen comportamiento hidráulico en las calles en caso de lluvias (especialmente considerando las avenidas más importantes como vías de emergencia en caso de inundación).

Por estos motivos, es una buena práctica el diseño de los sistemas de drenaje para garantizar de manera adecuada las normas de funcionamiento de las calles durante una lluvia de 10 años de periodo de retorno y garantizar el cumplimiento del criterio de peligrosidad en caso de lluvias con una frecuencia de 100 años (Clavegueram de Barcelona S.A. (CLABSA), 2006).

El municipio de Barcelona, a través de CLABSA, empresa mixta para la gestión del sistema de alcantarillado de la ciudad, que operó en Barcelona desde el año 1992 hasta el 2013 en el que cesó su actividad, recomendaba los siguientes niveles de servicio para las calles urbanas:

- Calado máximo  $y_{max} = 6 \text{ cm}$
- Velocidad máxima  $v_{max} = 1.5 \text{ m/s}$

El primer valor corresponde a la situación de inundación de los carriles laterales, mientras que los carriles centrales permanecen sin inundar, garantizando una circulación segura de vehículos. El segundo valor referente a la velocidad de flujo se dedujo por el procedimiento del ARMC (Agricultural and Resource Management Council of Australia and New Zealand (ARMC), 2000) considerando valores típicos de calados bajos en calles urbanas producidos por sucesos de lluvia. CLABSA requería también el cumplimiento del criterio de vuelco (Gómez, 2001) y de deslizamiento (Nanía, 1999) para una lluvia de periodo de retorno de 100 años.

### II.3.2.16. Criterio propuesto por Russo (2009)

La tesis doctoral de Russo (2009), “Design of surface drainage systems according to hazard criteria related to flooding of urban áreas”, en la que se dedica uno de sus capítulos a tratar el tema de peligrosidad en relación a inundaciones en zonas urbanas, es la base del presente trabajo y por tanto la referencia principal.

El análisis realizado en esta parte de su tesis doctoral respondía a la determinación de los niveles de peligrosidad que afectaban a las personas cuando cruzan una calle y tras o durante un evento de lluvia la escorrentía está circulando por las calles de la ciudad. La base de este estudio fue experimental, utilizando para los ensayos un modelo físico construido en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (ECA) en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universitat Politècnica de Catalunya. Dicho modelo presenta unas dimensiones suficientemente importantes para garantizar que los efectos de escala no se produzcan, con un ancho de 1.6 m, longitud de 5.0 m y pendiente variable desde 0 a 10 %, habiendo elegido unas dimensiones acordes con el espacio disponible en el laboratorio. El modelo, para ofrecer una mayor similitud a una calle y permitir una entrada realista de las persona desde la acera hasta la calzada, presenta una pendiente transversal del 2% y aceras con bordillos, el mayor de ellos con una altura de 15 cm, según se indica en la Figura II-23 con la sección transversal de la plataforma de ensayos utilizada.

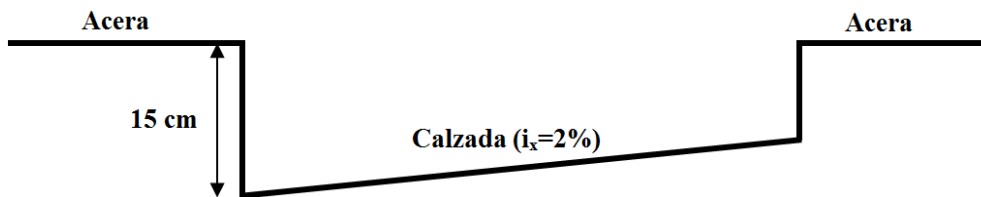


Figura II-23. Sección transversal de la plataforma de ensayos utilizada por Russo (2009)

El modelo presentaba un depósito de cabecera con el objetivo de tranquilizar el agua de entrada para que circulara desde el principio de la calle con la mayor uniformidad posible. En la Figura II-24 se observa, a la izquierda, el depósito de cabecera y a la derecha el trabajo manual para modificar la pendiente de la plataforma. Los caudales utilizados fueron desde 100 l/s hasta 500 l/s aumentando de 100 l/s en 100 l/s y la rugosidad del material fue considerada como un pavimento normal de hormigón con un valor de  $n = 0.016$  (Chow, 1964). Dicha rugosidad fue evaluada para utilizarla en el modelo numérico unidimensional que sirvió como herramienta para dimensionar el modelo físico y determinar las velocidades de circulación de escorrentía para las diferentes combinaciones de caudales y pendientes (2%, 4%, 6%, 8% y 10%).

Las personas ensayadas fueron 23, 15 hombres y 8 mujeres, con pesos comprendidos entre 48 y 100 kg y alturas entre 1.48 m y 1.82 m tal y como se indica en la Tabla II-9. El protocolo de ensayos consistía en caminar a través y a lo largo de la calle tal y como se indica en la Figura II-25. Además, dichos ensayos se realizaron para buenas condiciones de iluminación y para malas, utilizando las personas gafas que restaran visibilidad, para el caso de malas condiciones de iluminación.



Figura II-24. Depósito de cabecera a la izquierda y modificación de la pendiente longitudinal de la plataforma a la derecha

Tabla II-9 Características de las personas ensayadas

Sujeto n°	Edad	Altura (H)	Peso (P)	Peso Total (P')
	Años	m	kg	kg
1	39	1.72	95	99
2	41	1.81	82	86
3	43	1.72	88	92
4	31	1.68	64	68
5	36	1.54	48	52
6	36	1.8	62	66
7	36	1.62	58	62
8	34	1.73	74	78
9	30	1.68	75	79
10	23	1.67	60	64
11	23	1.71	72	76
12	30	1.62	65	69
13	49	1.70	67	71
14	26	1.69	63	67
15	26	1.66	57	61
16	14	1.61	45	49
17	14	1.61	50	54
18	16	1.82	100	104
19	31	1.78	91	95
20	45	1.72	63	67
21	25	1.70	60	64
22	23	1.68	60	64
23	25	1.63	62	66

La peligrosidad se distinguió en base a las variables de velocidad, calado y producto de ambas, y los rangos de peligrosidad propuestos fueron: baja, media y alta. Los criterios de distinción adoptados para estos grados de peligrosidad fueron los siguientes:

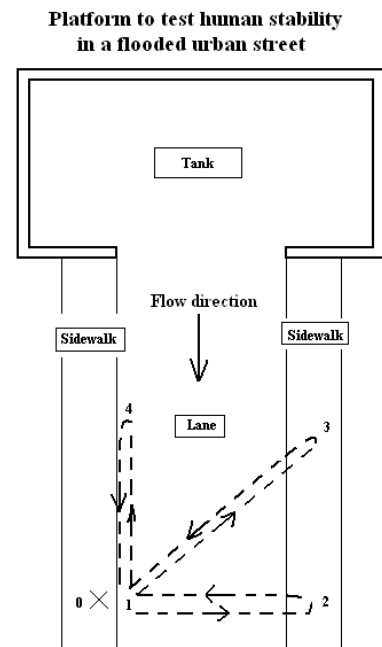
- Peligrosidad alta:
  - La persona presenta una clara pérdida de estabilidad (no puede permanecer estable quieta o caminando o incluso es arrastrada por el flujo)

- La persona indica una clara pérdida de maniobrabilidad (no puede llevar a cabo el protocolo del ensayo correctamente)
- Peligrosidad media:
  - La persona muestra una significativa pérdida de estabilidad (se mueve de manera poco estable y le genera un gran esfuerzo permanecer erguido mientras camina)
  - La persona muestra una significativa pérdida de maniobrabilidad (en estos casos la persona mostraba claras dificultades para llevar a cabo y finalizar el protocolo del ensayo)
- Peligrosidad baja:
  - La persona se agarra en la cuerda de manera no intencionada
  - La persona se plantea o niega a entrar en la plataforma con agua circulando
  - La persona indica pocos problemas de estabilidad y maniobrabilidad



Step by step marked path

- 0: Initial position
- 1: Position in the gutter after the first step
- 2: Position in the sidewalk after crossing the lane perpendicularly to the flow direction
- 1: Position in the gutter after re-crossing the lane perpendicularly to the flow direction
- 3: Position in the sidewalk after crossing the lane obliquely to the flow direction
- 1: Position in the gutter after re-crossing the lane obliquely to the flow direction
- 4: Position in the gutter after walking in line with the sidewalk
- 1: Position in the gutter after re-walking in line with the sidewalk
- 0: Final position. Test finished.



**Figura II-25.** Protocolo de ensayos, mapa de recorrido a la izquierda e imagen de persona realizando el ensayo a la derecha

La campaña experimental tuvo un total de 834 ensayos distribuidos entre 23 personas, teniendo en cuenta que los ensayos con una persona finalizaban al llegar el caso de peligrosidad alta. Los resultados obtenidos para el caso de buenas condiciones de iluminación fueron:

- 54 situaciones de peligrosidad baja
- 28 situaciones de peligrosidad media
- 13 situaciones de peligrosidad alta

En cuanto al caso de malas condiciones de iluminación, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- 77 situaciones de peligrosidad baja
- 40 situaciones de peligrosidad media
- 16 situaciones de peligrosidad alta

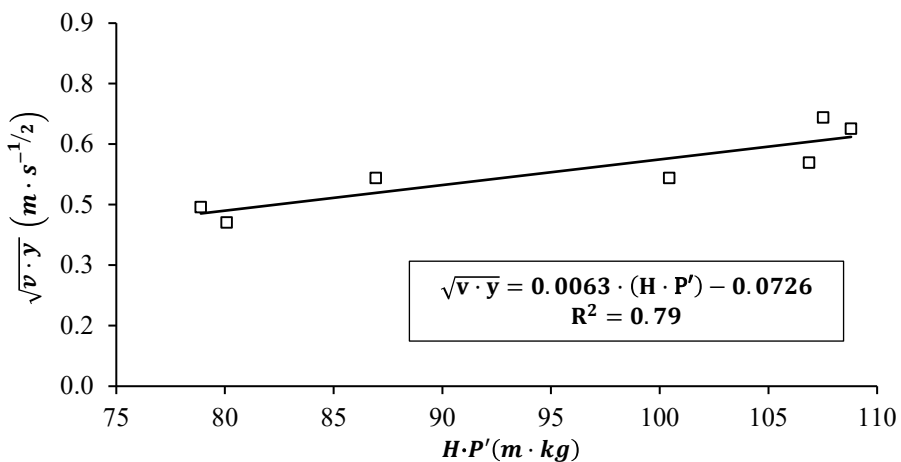
Finalmente se propuso una relación entre las características de las personas y los parámetros de flujo de las situaciones de peligrosidad alta. Tal y como propusieron Abt *et al.* (1989), en este caso se obtuvo una relación, también lineal, entre la raíz cuadrada del producto de velocidad y calado, y el producto del peso y altura de las personas, obteniendo una correlación del 80%, tal y como se observa en la gráfica de la Figura II-26.

De esta manera se propuso la expresión [II-12]:

$$(v \cdot y)^{\frac{1}{2}} = [0.0063 \cdot (H \cdot P')] - 0.0726 \tag{II-12}$$

donde,

- $v$  [m/s] es la velocidad del flujo
- $y$  [m] es el calado
- $P'$  [kg] es el peso total de la persona y cargas
- $H$  [m] es la altura de la persona



**Figura II-26.** Condiciones de peligrosidad alta relacionadas a las condiciones de flujo frente a las características de las personas (Russo, 2009)

La consideración final, para la delimitación de los rangos de peligrosidades, y calados comprendidos entre 9 y 16 cm, fue la siguiente:

- Peligrosidad baja:  $v < 1.5 \text{ m/s}$
- Peligrosidad media:  $1.5 \text{ m/s} \leq v \leq 1.88 \text{ m/s}$
- Peligrosidad alta:  $v \geq 1.88 \text{ m/s}$

### II.3.2.17. Criterio propuesto en la Guía Australian Rainfall and Runoff (2010)

La Guía Australian Rainfall and Runoff (AR&R) fue publicada por Engineers Australia (EA), por primera vez en 1958 y ha sido una referencia en cuanto a directrices relacionadas con la ingeniería del agua en Australia. Tras la versión de la guía del año 1987 se propuso una revisión para responder a las necesidades más actuales. Dicha Guía, actualmente se compone de 21 proyectos que han ido actualizándose y publicándose en diferentes fechas, siendo de especial atención para este trabajo el proyecto n° 10, titulado “Criterios apropiados de seguridad para personas”, y publicado en abril del año 2010 (Cox *et al.*, 2010).

Durante las últimas cuatro décadas se han llevado a cabo diferentes estudios experimentales sobre los límites de estabilidad para diferentes regímenes de flujo, y en la Guía AR&R (Cox *et al.*, 2010) se recogen algunos de ellos y se analizan en detalle, realizando finalmente un análisis conjunto de los resultados obtenidos por los diferentes autores. Las variables hidráulicas que todos tuvieron en cuenta fueron el calado ( $y$ ), la velocidad ( $v$ ) y su producto ( $v \cdot y$ ). Y las características de las personas ensayadas se proponen mediante el producto de su altura por su peso ( $H \cdot P$ ).

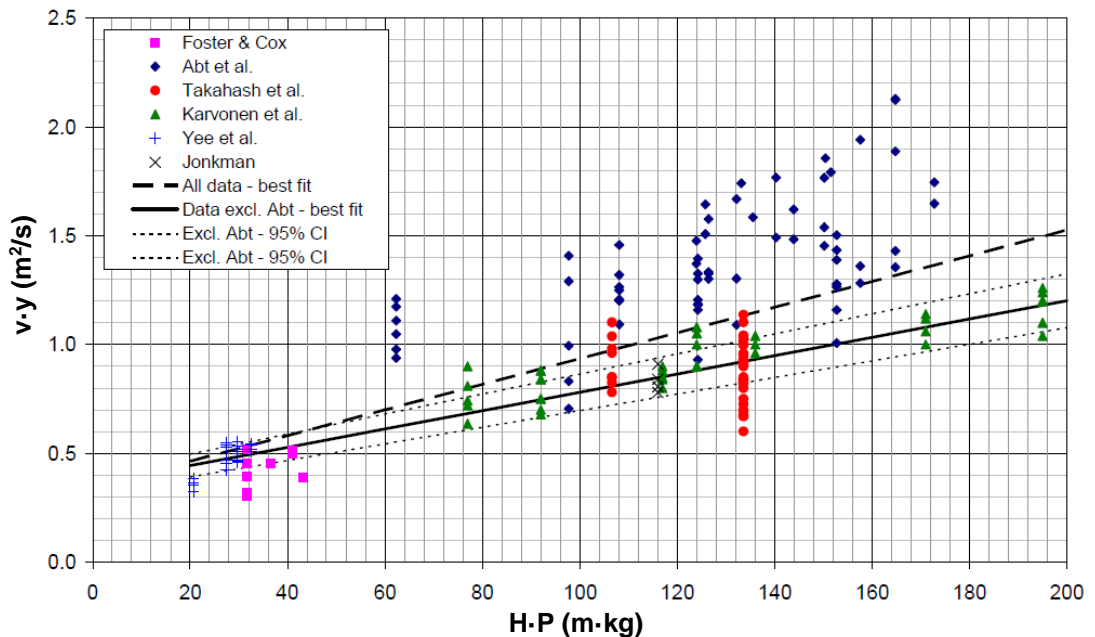
A su vez también recoge las descripciones y datos obtenidos en los estudios realizados por otros autores, para proponer desarrollos teóricos y/o empíricos. En la Tabla II-10 se muestran los diferentes autores que realizaron estudios experimentales.

**Tabla II-10** Comparativa entre los parámetros utilizados por diferentes autores en sus ensayos, Guía AR&R (Cox *et al.*, 2010)

	Foster and Cox (1973)	Abt <i>et al.</i> (1989)	Takahashi <i>et al.</i> (1992)	Karvonen <i>et al.</i> (RESCDAM) (2000)	Yee (2003)	Jonkman (FHRC) (2008)
<b>Año</b>	1973	1989	1992	2001	2003	2008
<b>Instalación</b>	Canal	Canal	Cuenca canalizada	Plataforma móvil a través de una cuenca	Canal	Canal provisto de compuerta
<b>Superficie</b>	Madera pintada	Hormigón con césped. Grabas y acero	Celdas metálicas	Trámex metálico	Madera pintada	Hormigón
<b>Pendiente</b>	Horizontal	1(V):115(H) y 1(V):38(H)	Horizontal	Horizontal	Horizontal	1(V):100(H)
<b>Características de los sujetos</b>	Niños (9-13 años)	Adultos civiles con equipos de seguridad	Adultos	Trabajadores de rescate con equipos de seguridad	Niños	Actores profesionales de riesgo
<b>Acción de los sujetos</b>	Parado, caminar, girar y sentarse	Parado, girarse y sentarse	Parado	Parado, girar y caminar	Parado y caminar	Parado y caminar
<b>Consideración de inestabilidad</b>	Sujeto se siente inestable o pierde punto de	Sujeto pierde punto de apoyo	Sujeto pierde punto de apoyo	Sujeto pierde punto de apoyo	Sujeto se siente inestable o pierde punto de	Sujeto pierde punto de apoyo

	Foster and Cox (1973)	Abt <i>et al.</i> (1989)	Takahashi <i>et al.</i> (1992)	Karvonen <i>et al.</i> (RESCDAM) (2000)	Yee (2003)	Jonkman (FHRC) (2008)
Año	1973	1989	1992	2001	2003	2008
	apoyo			apoyo		
Número de sujetos	6	20	3	7	4	1
Rango de $y$ , (m)	0.09-0.41	0.43-1.2	0.44-0.93	0.4-1.1	0.18-0.53	0.26-0.35
Rango de $v$ , ( $\text{ms}^{-1}$ )	0.76-3.12	0.82-3.05	0.58-2.0	0.6-2.6	0.89-2.12	2.4-3.1
Rango de $(v \cdot y)$ , ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )	0.16-0.52	0.71-2.13	0.64-1.26	0.6-1.3	0.33-0.55	0.78-0.91
Rango de H·P, (mkg)	32-53.2	62.3-172.8	106.6-133.6	77-195	20.8-32.5	116

Los datos experimentales de estos autores fueron representados en una misma gráfica, dando lugar a la Figura II-27, representando así las variables hidráulicas  $(v \cdot y)$  frente a las características de las personas ensayadas  $(H \cdot P)$ . Se indica la diferencia de los datos de Abt. *et al.* (1989) frente a los demás, observando cómo la regresión del conjunto de datos mejora significativamente de  $R^2=0.5$ , con el conjunto total de datos, a  $R^2=0.8$  cuando no se consideran los datos de Abt *et al.* (1989). No se indica un motivo claro, pero se da a entender que el gran número de ensayos realizado proporcionó entrenamiento y aprendizaje a las personas, lo cual les permitió mejorar sus habilidades en el agua y llegar al límite de estabilidad con valores más altos de  $(v \cdot y)$ .



**Figura II-27.** Combinación de los resultados de los diferentes autores, representando el producto  $(v \cdot y)$  frente al producto Altura\*Peso  $(H \cdot P)$  de las personas ensayadas, incluyendo la regresión lineal de todas ellas (línea discontinua), sin considerar los datos de Abt *et al.* (1989) (línea continua) y el 95 % de intervalos de confianza para todos los datos excepto los de Abt *et al.* (1989) (línea punteada)

Existen también otros motivos específicos por los que aparece esta dispersión de datos general, como la propuesta diferente de límites de estabilidad entre todos los estudios, es decir la decisión



sobre el momento en que se llega al límite (cuando cae, cuando empeora la maniobrabilidad...). Además, algunos estudios tenían en cuenta las personas quietas, caminando e incluso sentadas, y otros factores externos como el tipo de ropa y/o calzado utilizados, así como los atributos físicos de las personas (unas personas más en forma que otras).

En base a los resultados experimentales, se han desarrollado modelos empíricos y numéricos para predecir umbrales de seguridad para la estabilidad de personas (Takahashi *et al.*, 1992; Keller R.J. *et al.*, 1993; Lind *et al.*, 2004; Yee M., 2003; Ramsbottom *et al.*, 2006; Ishigaki *et al.*, 2005; Ishigaki *et al.*, 2008a; 2008b). Sin embargo, debido a la simplicidad de los modelos desarrollados, y su falta de incorporación de muchas variables como la experiencia, la ropa o el calzado de las personas, la adecuación con los datos experimentales resulta ser poco adecuada en general.

El uso de características de personas (H·P) como variable independiente en cuanto a definición general de directrices para seguridad ante inundaciones no parece ser práctico, según la Guía AR&R (Cox *et al.*, 2010), debido al amplio rango de características de la población. En este sentido se propone la siguiente división de la población para definir la peligrosidad de manera diferente en cada una de éstas:

- Adultos ( $H \cdot P > 50$  mkg)
- Niños ( $H \cdot P = 25$  hasta 50 mkg)
- Niños muy pequeños ( $H \cdot P < 25$  mkg)

En base a la clasificación de población definida y a los resultados experimentales de los diferentes autores, se presentan los rangos de peligrosidad para los diferentes sectores de la población, Tabla II–11. Se representan además estas zonas de peligrosidad en dos gráficas, la primera muestra la relación ( $v \cdot y$ ) frente a ( $H \cdot P$ ) (Figura II-28) y la segunda muestra la relación ( $y$ ) frente a ( $v$ ) (Figura II-29).

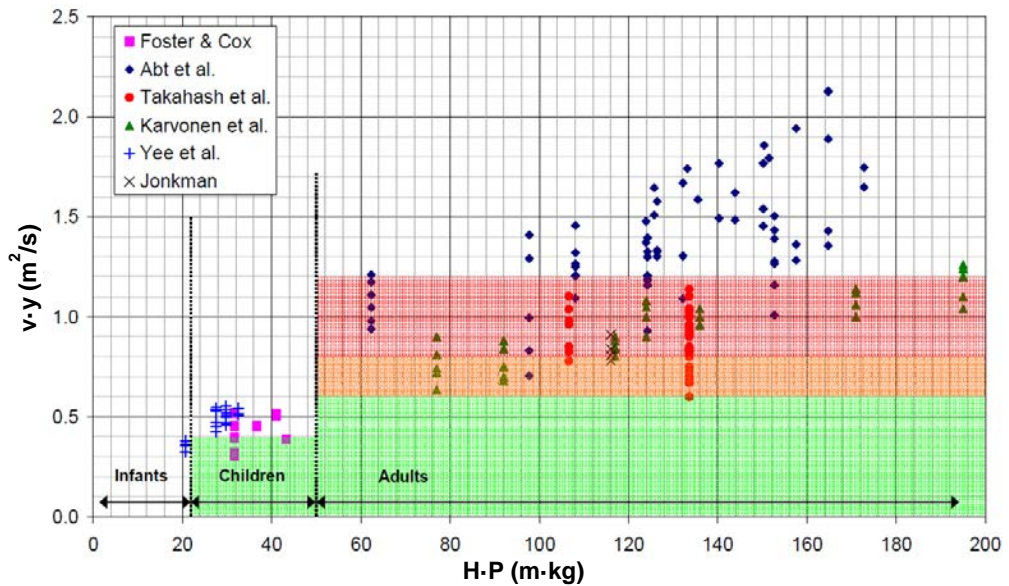
**Tabla II–11.** Rangos de peligrosidad para niños muy pequeños, niños y adultos, según la guía AR&R (Cox *et al.*, 2010)

$(v \cdot y)$ [ $m^2/s$ ]	Bebes, niños muy pequeños y personas frágiles/ancianas ( $H \cdot P \leq 25$ )	Niños ( $H \cdot P = 25$ hasta 50)	Adultos ( $H \cdot P > 50$ )
0	Sin peligrosidad	Sin peligrosidad	Sin peligrosidad
0-0.4		Baja Peligrosidad <sup>1</sup>	
0.4-0.6		Peligrosidad significativa; Peligroso para la mayoría <sup>3</sup>	Baja Peligrosidad <sup>1</sup>
0.6-0.8	Peligrosidad extrema; Peligroso para todos		Peligrosidad moderada; Peligroso para algunos <sup>2</sup>
0.8-1.2		Peligrosidad extrema; Peligroso para todos	Peligrosidad significativa; Peligroso para la mayoría <sup>3</sup>
>1.2			Peligrosidad extrema; Peligroso para todos

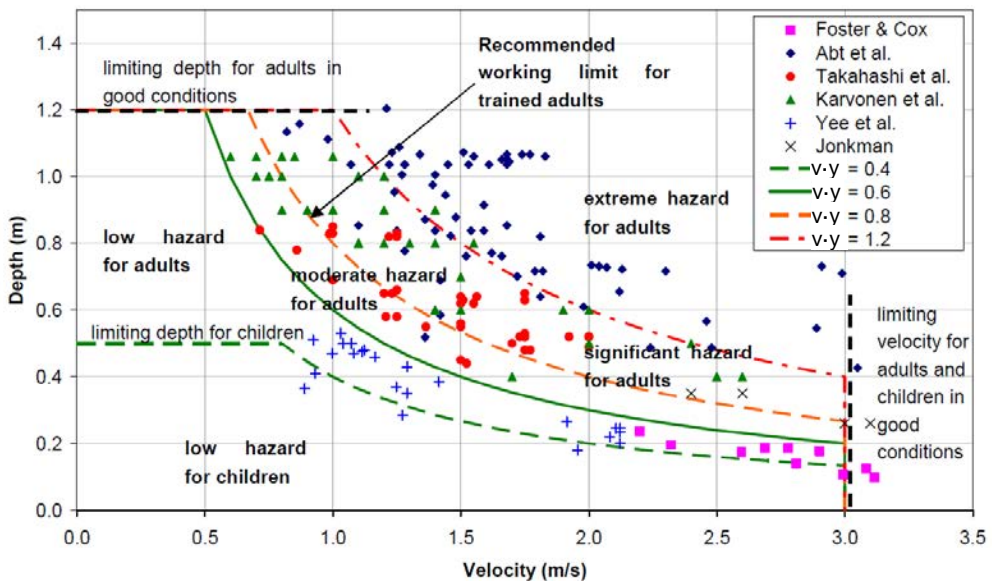
<sup>1</sup> La estabilidad no se ve comprometida para personas dentro del programa de ensayos para tales flujos (calado máximo de 0.5 m para niños y 1.2 m para adultos y una velocidad máxima de 3 m/s para bajos calados)

<sup>2</sup> Límite de trabajo para trabajadores de emergencias o personas experimentadas y bien equipadas ( $(v \cdot y) < 0.8$ )

<sup>3</sup> Límite superior de estabilidad observado para la mayoría de investigaciones ( $(v \cdot y) < 1.2$ )



**Figura II-28.** Valores de flujo ( $v \cdot y$ ) indicando el nivel de peligrosidad como función de la altura (H) y peso (P) de la persona ensayada para todas las fuentes de datos experimentales. Una zona de peligrosidad baja (■) se indica para niños ( $H \cdot P = 25$  hasta  $50 \text{ mkg}$ ) y adultos ( $H \cdot P > 50 \text{ mkg}$ ). Una zona de peligrosidad moderada (■) la cual es peligrosa para algunos adultos, indicada con  $v \cdot y = 0.8$  como límite superior para adultos experimentados. Una zona de peligrosidad significativa (■) la cual es peligrosa para la mayoría de adultos, con valores de ( $v \cdot y$ ) más altos ( $v \cdot y > 1.2 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ) delimitando la zona de peligrosidad extrema, peligrosa para todos los adultos (Cox *et al.*, 2010)



**Figura II-29.** Rangos de peligrosidad propuestos como una función de calado y velocidad, comparados con los datos experimentales disponibles (Cox *et al.*, 2010)

La Guía concluye haciendo referencia a que la pérdida de estabilidad podría ocurrir incluso para flujos débiles cuando existan condiciones adversas como las siguientes:

- **Condiciones de fondo:** irregularidades, zonas resbaladizas, obstáculos.
- **Condiciones del flujo:** escombros flotantes, baja temperatura, mala visibilidad y flujo no permanente.
- **Situación de las personas:** Quietas o moviéndose, con experiencia, tipo de ropa y calzado. Atributos físicos diferentes a la altura y al peso, como puede ser el desarrollo muscular, factores psicológicos.
- **Otros:** fuerte viento, poca iluminación, definición del límite de estabilidad (por ejemplo sentimiento de inseguridad o completa pérdida del equilibrio).

### II.3.3. Criterios de evaluación de peligrosidad en zonas subterráneas, según el tiempo de evacuación de las personas

Ante sucesos de lluvias extremas el agua se puede introducir en áreas subterráneas, tales como zonas comerciales subterráneas, estaciones de metro o sótanos de edificios. La gente, en estas situaciones, debe ser evacuada de estas zonas lo antes posible. Para realizar un plan de evacuación se debe determinar primero el criterio de evacuación para que se realice de manera segura.



**Figura II-30.** Inundación de un parquín subterráneo en Barcelona (izquierda) e inundación de metro en Caracas (centro) e inundación en un centro comercial en Escocia (derecha)

Ishigaki *et al.* (2005) estudiaron dichos criterios de evacuación y obtuvieron resultados a partir de un modelo de escalera y pasillo a escala real y una apropiada campaña de ensayos. Para simular el flujo real sobre la escalera, la mejor manera era hacer un modelo a escala real tal y como se muestra en la Figura II-31. Se trata de una escalera de 20 escalones de 30 cm de ancho y 15 cm de alto, y asciende un total de 3 m. El pasillo tiene una longitud de 10 m y su ancho es de 1 m. El caudal utilizado es de hasta 0.8 m<sup>3</sup>/s, con calados inferiores a 0.5 m. Los ensayos de evacuación se llevaron a cabo con 47 mujeres y 257 hombres. La media de edad de ellas fue de 30.2 y de ellos de 25.8 años.

La estabilidad de las personas no se ensayaba hasta el fallo, sino que se valoraba el tiempo de recorrido necesario para proponer el criterio de evacuación.

En base a los resultados de la campaña experimental, en este estudio se asumió que el criterio para una evacuación segura incluía el calado ( $y$ ) y velocidad del agua ( $v$ ). Se obtuvieron tres criterios en relación al calado máximo, al momento por unidad de ancho y la fuerza específica por unidad de ancho, mostrados en las expresiones [II-13], [II-14] y [II-15].

$$y_{max} = 30 \tag{II-13}$$

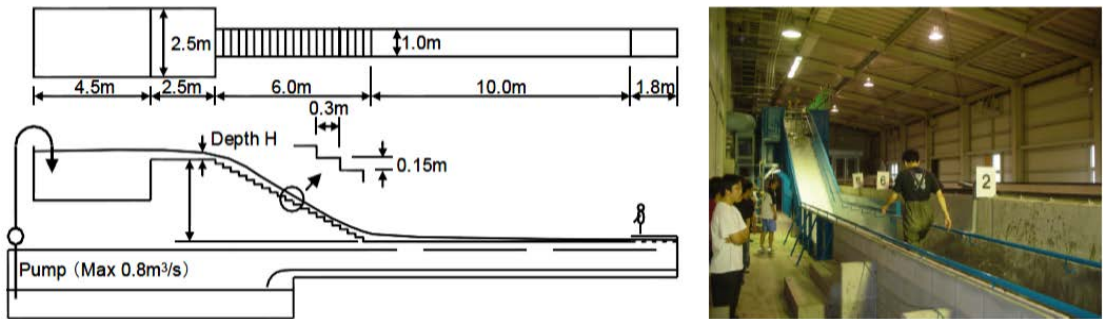
$$v^2 \cdot y = 1.2 \tag{II-14}$$

$$\frac{v^2 \cdot y}{g} + \frac{y^2}{2} = 0.125 \tag{II-15}$$

donde,

- $v$  es la velocidad del flujo [m/s]
- $y$  es el calado de agua [m]
- $g$  es la aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

La conclusión del estudio fue que a partir de los límites propuestos y mediante la realización de modelos hidráulicos bidimensionales, se podían realizar planes de evacuación en estas zonas subterráneas. Más tarde Ishigaki *et al.* (2008a; 2008b; 2009) realizaron ensayos a partir de personas jóvenes (media de edad de 25.8) con pesos en los tobillos y muñecas, para simular el comportamiento de ancianos. Mediante este método estimaron que personas de unos 70 años caminaban con un 80% de la velocidad de una persona joven.



**Figura II-31.** Modelo a escala real de una escalera de 20 escalones y un pasillo de 10 metros de longitud (izquierda). Fotografía de un ensayo por la ruta de evacuación (derecha)

### II.3.4. Resumen de los criterios de peligrosidad para personas ante inundaciones

**Tabla II-12** Resumen de los criterios de evaluación de peligrosidad basados en un calado máximo admisible del flujo

Id	Fuente	Ref.	$y_{max}$ [m]	$v_{max}$ [m/s]	Expresión	Aplicabilidad
1	Urban Storm Drainage Criteria Manual. Urban Drainage and Flood Control District. Denver, Colorado (USA)	(Wright-Mc Laughlin Engineers, 1969)	0.45	-	-	Cuencas urbanas
2	Road Drainage Manual, National Transport Commission (Republic of South Africa)	(Rooseboom <i>et al.</i> , 1986)	0.3 – 0.7	-	-	Cuencas rurales
3	Criterio de Mendoza	(Nanía, 1999)	0.3	-	-	Cuencas urbanas

**Tabla II–13** Resumen de los criterios de evaluación de peligrosidad basados en la consideración conjunta de los calados y velocidades del flujo

Id	Fuente	Ref.	$y_{max}$ [m]	$v_{max}$ [m/s]	Expresión	Aplicabilidad
1	FEMA. The floodway: a guide for community permit officials. (USA)	(Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1979)	0.91	0.61	$v \cdot y \leq 0.56$	Cuencas urbanas y rurales
2	Human Stability in a High Flood Hazard Zone. AWRA Water Resources Bulletin. (USA)	(Abt <i>et al.</i> , 1989)	1.2	3.05	$0.71 \leq v \cdot y \leq 2.13$	Cuencas urbanas y rurales
3	Control del desarrollo urbano en las zonas inundables (España)	(Témez, 1992)	1.00	1.00	$v \cdot y \leq 0.5$	Cuencas rurales
4	Basin Plan for the hydraulic and hydrogeological protection of the land (Italia)	(Regione Liguria, 1993)	0.30-0.70	1.00 – 2.00	-	Cuencas rurales
5	Clasificación de presas en función del riesgo potencial (España)	(Ministerio de Medio Ambiente de España, 1996)	0.00 – 1.75	0.00 – 7.00	-	Cuencas rurales
6	Clark County Regional Flood Control District (CCRFCD). Hydrological criteria and drainage design manual. Clark County (USA)	(Clark County Regional Flood Control District (CCRFCD), 1999)	0.45	-	$v \cdot y \leq 0.55$	Cuencas urbanas
7	Tesis Doctoral de Nanía, 1999. Universitat Politècnica de Catalunya.	(Nanía, 1999)	0.3 según ciudad	1.00	-	Cuencas urbanas
8	ARMC. Floodplain Management in Australia (Australia and New Zealand).	(Agricultural and Resource Management Council of Australia and New Zealand (ARMC), 2000)	1.20 – 1.50	1.5	-	Cuencas urbanas
9	EU-Project RESCDAM. Helsinki PR Water Consulting (Finland)	(Reiter, 2000)	-	-	$0.25 \leq v \cdot y \leq 0.7$	Cuencas rurales
10	Informe preparado para CLABSA. Definición de Criterios de Riesgo para el Flujo en Calles.	(Gómez, 2001)	-	-	$v \cdot y \leq 0.45$	Cuencas urbanas
11	Tesis Doctoral de Kelman. University of Cambridge	(Kelman, 2002)	1.25	5.00	-	Cuencas urbanas
12	DEFRA. Flood risks to people: Phase 1 and 2.	(Ramsbottom <i>et al.</i> , 2006)	-	-	$HR = y \cdot (v + 0.5) + DF$	Cuencas urbanas
13	Risques Hydro-météorologiques, crues et inondations/ risqué, aléa et vulnérabilité/ DDS-TUE364/9 (Switzerland)	(Belleudy, 2004)	0.00 – 1.00	0.25 – 1.00	-	Cuencas urbanas y rurales
14	Floodplain Development Manual. The management of flood liable land	(Department of Infrastructure Planning and Natural Resources, 2005)	2.00	2.00	-	Cuencas urbanas y rurales
15	PICBA06: Pla Integral de Clavegueram de Barcelona 2006 (España)	(Clavegueram de Barcelona S.A. (CLABSA), 2006)	0.06	1.5	-	Cuencas urbanas
16	Tesis Doctoral de Russo. Universitat Politècnica de Catalunya.	(Russo, 2009)	0.16	1.88	$(v \cdot y)^{\frac{1}{2}} = [0.0063 \cdot (H \cdot P')] - 0.0726$	Cuencas urbanas
17	AR&R. Project 10. Report for the Appropriate Safety Criteria for People.	(Cox <i>et al.</i> , 2010)	1.2	3.2	-	Cuencas urbanas y rurales

**Tabla II–14** Resumen de los criterios de evaluación de peligrosidad para personas en zonas subterráneas

Id	Fuente	Ref.	$Y_{max}$ [m]	$V_{max}$ [m/s]	Expresión	Aplicabilidad
1	Proc. of 31st IAHR Congress on CD-ROM, Seoul.	(Ishigaki <i>et al.</i> , 2005)				
2	Proc. of 11th ICUD, Scotland, UK.	(Ishigaki <i>et al.</i> , 2008a)			$v^2 \cdot y = 1.2$	
3	Proc. of 16th APD-IAHR, Nanjing, China, 141-146.	(Ishigaki <i>et al.</i> , 2008b)	0.3	-	$\frac{v^2 \cdot y}{g} + \frac{y^2}{2} = 0.125$	Cuencas urbanas
4	Proc. of the 8th International Conference on Urban Drainage Modelling, Tokyo, 2009.	(Ishigaki <i>et al.</i> , 2009)				

## II.4. Criterios de evaluación de la estabilidad de vehículos ante inundaciones

Como se ha comentado anteriormente, las afectaciones ante sucesos de inundación en zonas urbanas se producen principalmente sobre propiedades (viviendas y comercios), vehículos y personas. En el caso de los vehículos, se producen daños tangibles sobre el propio vehículo o sobre otros elementos de la ciudad (directos) o interrupciones del tráfico (indirectos), así como intangibles cuando el o los ocupantes del vehículo y/o los propios transeúntes se ven involucrados en la inundación y pueden sufrir lesiones. Merece la pena estudiar a los vehículos de manera particular, pues se trata de un elemento de la ciudad que siempre está presente, ya sea en movimiento o estacionado, y sobretodo porque las personas están involucradas en el comportamiento del vehículo ante eventos de inundación. Los vehículos tienden a ser inestables por pérdida de resistencia de rozamiento (deslizamiento), vuelco o flotación ante inundaciones repentinas. Estos movimientos de los vehículos pueden incluso agudizar los efectos de la inundación mediante el bloqueo de estructuras hidráulicas como puentes o los propios imbornales.

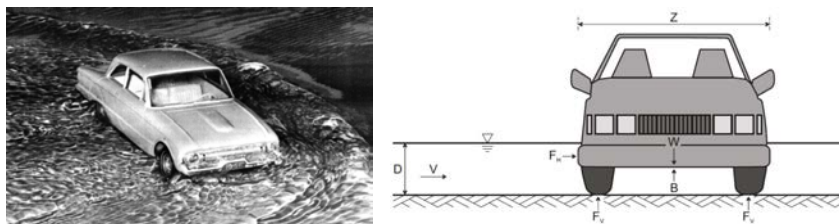
En este apartado se describen los estudios realizados por diferentes autores sobre la estabilidad de los vehículos cuando se ven inmersos en eventos de inundación. Se han encontrado, por un lado, estudios experimentales y teóricos, y por otro, criterios de inestabilidad de vehículos en diferentes directrices o recomendaciones. Pero en todos los casos el análisis de la inestabilidad se ha llevado a cabo para vehículos estacionados, debido a la gran complejidad que supondría un análisis del comportamiento del vehículo en movimiento. Los primeros estudios que se han encontrado son de los años 60 realizados de manera experimental por Bonham y Hattersley (1967) hasta trabajos más actuales como los de Toda *et. al* (2013), que estudian experimentalmente la estabilidad de los vehículos ante inundaciones a partir de modelos a escala de dos tipos de vehículos distintos.

### II.4.1. Criterios experimentales y analíticos

#### II.4.1.1. Bonham y Hattersley (1967)

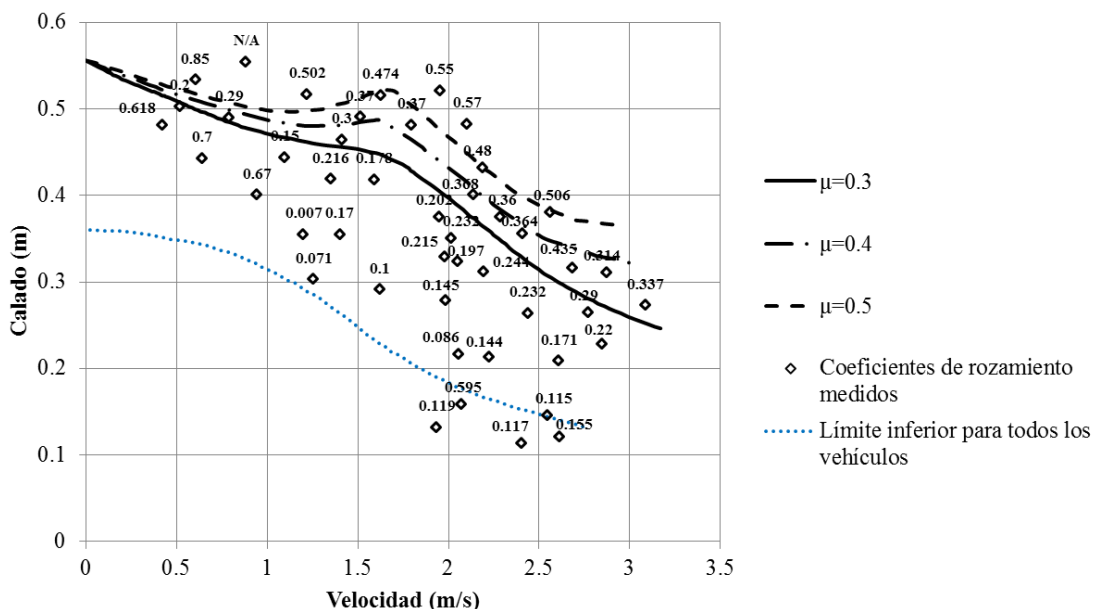
Bonham y Hattersley (1967) llevaron a cabo ensayos de laboratorio sobre la estabilidad de una maqueta del modelo de vehículo Ford Falcon (Figura II-58) expuesta a un flujo de agua perpendicular al lateral del vehículo, y situada sobre una calzada. Se trataba de una maqueta de

escala 1:25 que se sujetaba mediante hilos finos en la dirección horizontal y vertical, de manera que se medían las tensiones ejercidas en estos hilos. Se realizaron 46 combinaciones diferentes de calados y velocidades, con rangos de calado comprendidos entre 0.11 y 0.57 m y velocidades comprendidas entre 0.48 y 3.9 m/s (datos según escala de prototipo).



**Figura II-32.** Maqueta de vehículo Ford Falcon a escala 1:25 (izquierda) y esquema conceptual del ensayo y variables que intervienen (derecha)

La fuerza horizontal ( $F_H$ ) consiste en la presión y cantidad de movimiento actuando en el lateral del vehículo, y la fuerza de reacción vertical ( $F_V$ ) consiste en la fuerza ejercida por el peso del vehículo ( $F_g$ ), la fuerza de flotación ( $F_b$ ) menos efectos de aspiración o vacío debidos al paso de agua bajo el vehículo. La pérdida de estabilidad debida a flotación, probablemente por la parte trasera del vehículo, ocurrió para un calado de 0.57 m. Una vez se determinaron las fuerzas horizontales y verticales, se determinó un coeficiente de rozamiento ( $\mu$ ) que generase la pérdida de estabilidad por rozamiento. Como se esperaba, los coeficientes determinados crecían cuando lo hacía el calado y la velocidad.



**Figura II-33.** Resultados de los ensayos de Bonham y Hattersley (1967) indicando diferentes coeficientes de rozamiento requeridos para iniciar el deslizamiento y sus líneas de valoración de rozamiento constante

Las líneas de rozamiento constante se produjeron para  $\mu=0.3$  hasta 0.5, pero para definir los valores de flujo para la estabilidad del vehículo, se necesitó de la especificación de un coeficiente de rozamiento apropiado. Finalmente se propuso un valor conservador de  $\mu=0.3$  y aunque con significativas incertezas se confirmó que era adecuado para casi todas las superficies.

Usando los principios de semejanza geométrica, los resultados se usaron para determinar los límites de flotación y estabilidad ante el deslizamiento para un rango de vehículos disponibles al mismo tiempo. Éstos se agruparon en 7 categorías incluyendo, pequeños, medianos y grandes, vehículos con el motor en la parte posterior, deportivos y otros. La estabilidad en cuanto a flotación se superaba en el rango comprendido entre 0.38 m y 0.58 m de calado, y siendo los más pesados los correspondientes a mayores calados.

#### II.4.1.2. Gordon y Stone (1973)

Gordon y Stone (1973) realizaron ensayos de laboratorio sobre la estabilidad de un modelo de vehículo Morris Mini sedan exponiéndolo de manera que la dirección del flujo fuera paralela al lateral del vehículo, en un canal de 1 m de ancho. Se escogió este vehículo por ser considerado el más representativo, entre todos los vehículos que circulaban en ese momento en Australia, en cuanto a su mayor susceptibilidad en pérdida de la estabilidad ante inundaciones.

Se consideraron tres modos de resistencia al movimiento:

1. Vehículo estacionado con la primera marcha: Ruedas delanteras bloqueadas
2. Vehículo estacionado con el freno de mano puesto: Ruedas traseras bloqueadas
3. Las dos opciones anteriores a la vez: Todas las ruedas bloqueadas

El tercer modo se consideró no suficientemente conservador, con lo que los ensayos se realizaron utilizando los dos primeros únicamente. La escala de la maqueta del vehículo era 1:16 y al vehículo se le colocaron unos hilos en la dirección vertical y horizontal para medir la fuerza de reacción horizontal y vertical sobre las ruedas delanteras y traseras. Los coeficientes de rozamiento representan el límite de estabilidad definido por la expresión:

$$\frac{F_H}{\mu F_V} = 1 \quad \text{[II-16]}$$

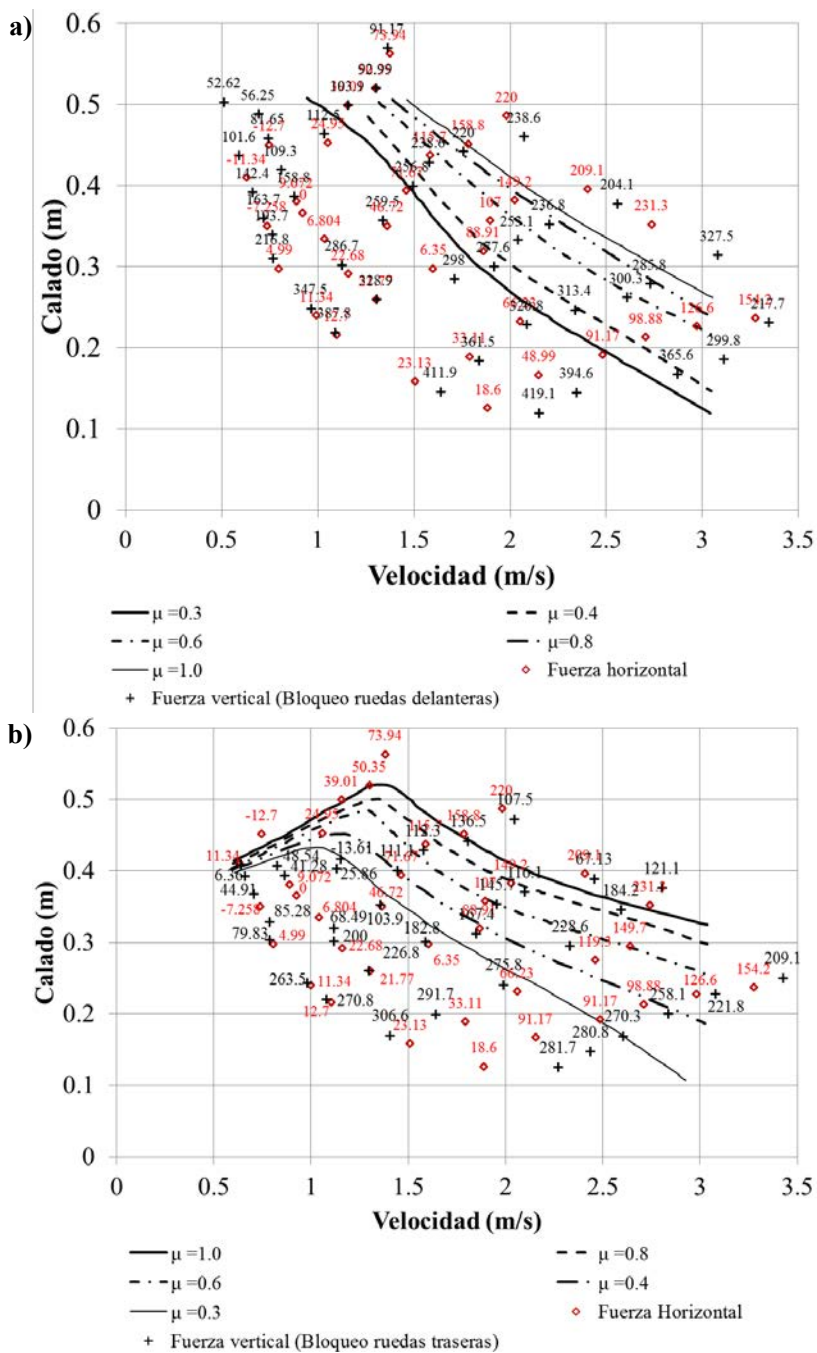
donde,

- $F_H$ : es la reacción horizontal medida
- $F_V$ : es la reacción vertical medida
- $\mu$ : es el coeficiente de rozamiento

Las líneas de rozamiento constante de inicio de movimiento del vehículo como función del calado y velocidad se derivaron de las condiciones de ruedas delanteras bloqueadas y de ruedas traseras bloqueadas. En la Figura II-34 se muestran estas relaciones para un rango de coeficientes comprendidos entre  $\mu=0.3$  y  $\mu=1.0$ . En realidad, los autores no aconsejan unos coeficientes de rozamiento apropiados, sino que se presentan valores de coeficientes estacionarios para neumáticos inundados en carretera según mediciones en Canberra por Yandell (1973) y coeficientes de rozamiento para neumáticos que derrapan en carretera según resultados de Woods *et al.* (1960). Los coeficientes estacionarios presentados se encuentran en un rango comprendido



entre 0.85 y 1.15 y los valores de derrape (a 30 km/h) se encuentran comprendidos entre 0.16 y 0.48. Estos resultados indican que el valor estacionario de  $\mu=0.3$  asumido por Bonham y Hattersley (1967) es probablemente conservador.



**Figura II-34.** Resultados de los ensayos de Gordon y Stone (1973) con las fuerzas horizontales (kg) observadas y las fuerzas (kg) de las reacciones verticales delanteras (a) y traseras (b) indicadas. Se superponen las líneas de rozamiento constante para el inicio de movimiento del vehículo que se evaluaron durante sus estudios

En general, la estabilidad encontrada fue ligeramente superior en la situación en la que las ruedas delanteras estaban bloqueadas frente al bloqueo de las ruedas traseras. Este hecho se atribuye al mayor peso ejercido sobre las ruedas delanteras en el vehículo de tracción delantera ensayado. Se observó también que en algunos casos el aumento de velocidad para un calado constante resultaba en un aumento de la reacción vertical y por tanto en la estabilidad. Esto se atribuye a la formación de ondas frente al vehículo, formando un resalto hidráulico y acelerando el flujo en la parte trasera del vehículo. De esta manera se produce un descenso del nivel de agua en las proximidades de las ruedas traseras incrementando así la estabilidad con estas condiciones de flujo. De forma similar a los estudios de Bonham y Hattersley (1967) se observa cómo se producen algunos efectos de vacío bajo el vehículo, generando fuerzas adicionales verticales e incrementando la estabilidad.

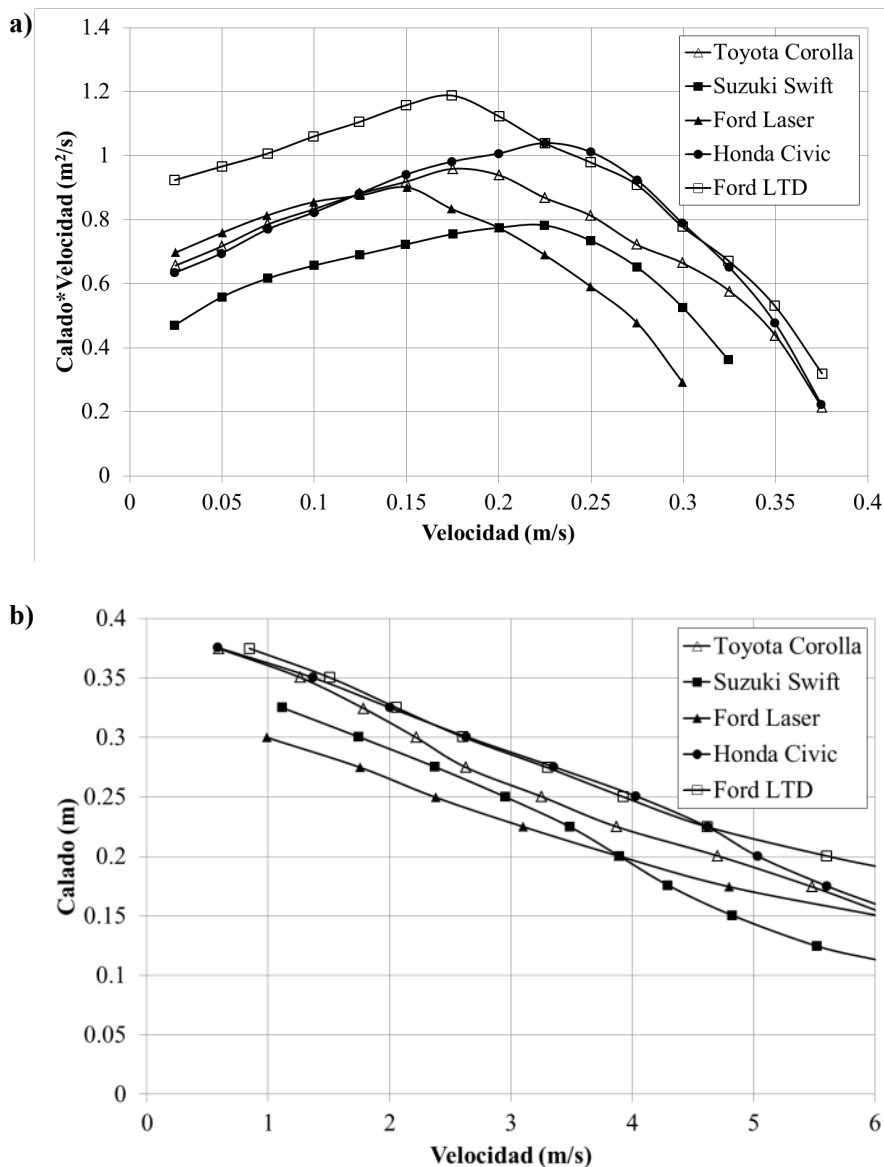
Gordon y Stone (1973) indican que el diseño de las curvas que presentan ha sido obtenido para un vehículo único aparcado en la zona de flujo de agua sin obstrucciones. Algunos factores como la presencia de otros vehículos, cambios en la pendiente de fondo, curvas en el trayecto del agua, obstrucciones y la posibilidad de escombros flotantes no se han considerado.

#### II.4.1.3. Keller y Mitsch (1993)

Keller y Mitsch (1993) realizaron un estudio sobre la estabilidad de vehículos y personas. La parte de su estudio dedicada a los vehículos evaluaba la estabilidad en flujos perpendiculares a éstos, comparando fuerzas verticales ( $F_V$ ) en cada eje del vehículo, teniendo en cuenta la fuerza ejercida por el peso del vehículo ( $F_g$ ) y la fuerza de flotación ( $F_b$ ) con las fuerzas de reacción horizontal ( $F_H$ ) como resultado de la velocidad de flujo ( $v$ ) y la proyección normal al flujo del área sumergida ( $A$ ).

Se obtuvieron las especificaciones del fabricante para cuatro coches pequeños; un Suzuki Swift, Ford Laser, Toyota Corolla y un gran Ford LTD. Los calados se incrementaban desde 0.025 m hasta 0.4 m. Para cada calado, se evaluaron de manera separada las fuerzas de reacción vertical en el eje delantero y trasero para determinar un centro de flotación y la distribución de peso según las especificaciones del fabricante. Las fuerzas de reacción horizontal se determinaron evaluando la fuerza de arrastre que actuaba sobre la parte sumergida del vehículo. La inestabilidad ocurre cuando la fuerza de reacción vertical es menor o igual a cero (el vehículo flota) o cuando la fuerza horizontal es igual a la fuerza estabilizadora vertical, la cual es función del coeficiente de rozamiento asumido y la fuerza de reacción vertical. Los límites de estabilidad propuestos por Keller y Mitsch (1993) se presentan en la Figura II-35a y como una función de calado y velocidad en la Figura II-35b. La Figura II-35a muestra que el valor límite de ( $v \cdot y$ ) no era constante sino que era una función no lineal dependiente del calado y encontrándose los mayores valores comprendidos entre los calados 0.15 y 0.25 m.

El método puramente teórico descrito es, sin embargo, muy dependiente de la elección de los coeficientes de rugosidad y de arrastre. Se asumió un coeficiente de rozamiento de 0.3 según propusieron Bonham y Hattersley (1967) y se adoptaron unos coeficientes de arrastre de 1.1 para las ruedas y de 1.15 para el cuerpo del vehículo sin un análisis de sensibilidad evidente. La elección del coeficiente de rozamiento adoptado por Bonham y Hattersley (1967) no está demasiado justificada y su valor parece ser conservador si se compara con el presentado por Gordon y Stone (1973) basado en los estudios de Yandel (1973).



**Figura II-35.** Relaciones de velocidades inestables de flujo teóricas para los diferentes vehículos ensayados por Keller y Mitsch (1993) asumiendo un coeficiente de rozamiento de 0.3 y un coeficiente de arrastre de 1.1 hasta 1.15

#### II.4.1.4. Teo *et al.* (2010, 2012 y 2013)

Tras prácticamente dos décadas, desde los estudios de Keller y Mitsch (1993), sin aportaciones conocidas en la investigación de la estabilidad de vehículos ante inundaciones, Fang Yenn Teo en el año 2010 realizó estudios sobre este tema, dando lugar al capítulo 5: “Hydrodynamics of urban floodplains with vehicles” de su tesis doctoral titulada “Study of the hydrodynamic processes of rivers and floodplains with obstructions” (Teo, 2010) presentada en la Universidad de Cardiff

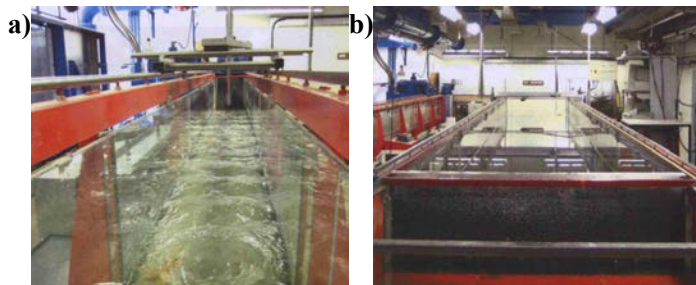
(Reino Unido), así como a otras publicaciones sobre sus resultados (Teo *et al.*, 2012a; 2012b; 2013a; 2013b).

Los estudios de Teo (2010) relacionados con la estabilidad de los vehículos ante inundaciones fueron experimentales, realizando ensayos de laboratorio a partir de modelos de vehículos a escala. Previamente, realizó el análisis de las fuerzas actuantes sobre un vehículo estacionado cuando éste se encuentra en una zona inundada, considerando la fuerza de flotación, la fuerza de arrastre del agua, la fuerza de fricción entre el neumático y la calzada y la fuerza producida por el peso del vehículo. El umbral de inestabilidad propuesto, siguiendo el mismo razonamiento teórico de Keller y Mitsch (1993), es el punto en el que la fuerza de fricción se iguala a la fuerza de arrastre del agua, dando lugar a la expresión [II-17] de velocidad crítica.

$$U_c = 2 \cdot \left( \frac{\mu F_V}{\rho_w C_d A} \right)^{1/2} \quad \text{[II-17]}$$

Para sus experimentos propone la semejanza de Froude, argumentando que las fuerzas gravitatorias son las predominantes en este problema, siendo por tanto la relación  $\lambda = l_m/l_p$ , con  $l_m$  la longitud en el modelo y  $l_p$  la longitud en el prototipo, el factor de escala a tener en cuenta. La relación entre las velocidades obtenidas en el modelo y el prototipo, bajo la semejanza de Froude, será  $v_m = v_p/\lambda^{1/2}$ , con  $v_m$  la velocidad en el modelo y  $v_p$  la velocidad en el prototipo.

Los ensayos experimentales fueron llevados a cabo en el laboratorio de la escuela de ingeniería en la universidad de Cardiff, en el Reino Unido. Los vehículos a escala tenidos en cuenta fueron el Mitsubishi Pajero, el BMW M5 y el Mini Cooper (Figura II-37); y se realizaron ensayos en dos canales diferenciados en sus dimensiones. El primero de los canales, de menores dimensiones, presentaba una disposición horizontal, 10 m de longitud y una sección transversal de 0.3 m de alto por 0.3 m de ancho. El segundo de los canales, de mayores dimensiones, presentaba también una disposición horizontal, 10 m de longitud y una sección transversal de 0.3m de alto por 1.2 m de ancho. Trataba de tener en cuenta la influencia de la proximidad de los cajeros del canal en los resultados obtenidos. Ambos canales eran de cristal y disponían de un vertedero en la sección de más aguas abajo para controlar los niveles de agua a lo largo del canal.



**Figura II-36.** Canales utilizados por Teo (2010) para sus ensayos de estabilidad de vehículos. a) Canal pequeño; b) Canal grande.

Los vehículos utilizados (Figura II-37) fueron escogidos por sus características diferenciales, en tamaño, diseño, forma y peso, con el objetivo de poder observar cómo estas características influyen en la estabilidad de los vehículos. Se utilizaron además dos escalas diferentes, 1:43 y 1:18

para poder validar con la escala superior los resultados obtenidos con la inferior. Las características de estos modelos, así como las de sus homólogos prototipos se encuentran en la Tabla II-15.

Se realizaron algunas modificaciones sobre los modelos, como fijar los ejes de las ruedas con pegamento para simular el freno de mano del vehículo aparcado, de forma que no roten las ruedas con la fuerza del agua. Se taparon las ventanas de los modelos adhiriendo piezas de plástico para evitar que el agua entrase en el vehículo.

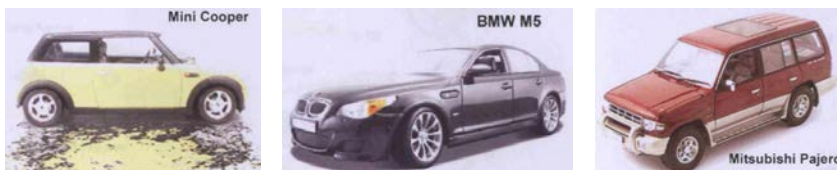


Figura II-37. Vehículos a escala ensayados por Teo (2010)

Tabla II-15 Características de los modelos utilizados y de sus prototipos

Modelo pequeño (1:43)				
Tipo	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Altura (cm)	Peso (g)
Mini Cooper	8.0	3.5	3.2	53.8
BMW M5	11.0	4.2	3.8	82.8
Mitsubishi Pajero	10.5	4.4	4.2	76.6
Modelo grande (1:18)				
Tipo	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Altura (cm)	Peso (g)
Mini Cooper	20.0	9.0	7.8	650
BMW M5	25.5	9.6	8.0	710
Mitsubishi Pajero	26.5	10.0	10.5	920
Prototipo (1:1)				
Tipo	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Altura (cm)	Peso (g)
Mini Cooper	3,635	1,689	1,417	1,132
BMW M5	4,855	1,846	1,512	1,830
Mitsubishi Pajero	4,800	1,875	1,855	2,300

Los objetivos de los ensayos no solo consistían en determinar el umbral de inestabilidad para los vehículos, sino también los efectos de la orientación del vehículo frente al flujo, de la pendiente del terreno y de la influencia de la presencia del vehículo en el flujo de agua. En una primera fase, se realizaron los ensayos con los modelos a escala 1:43 cuyos resultados fueron escalados ( semejanza de Froude) a la escala 1:18, para validar posteriormente con los resultados obtenidos con los vehículos a escala 1:18, ensayados en el canal grande. En estos primeros ensayos se situó el vehículo con la parte posterior enfrentada a la dirección del flujo, según se indica en la Figura II-38.

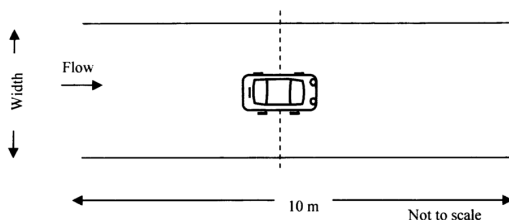


Figura II-38. Esquema de los primeros ensayos llevados a cabo en el canal pequeño (Teo, 2010)

En los resultados obtenidos en esta primera campaña experimental, se distingue una clara tendencia en aquellas situaciones de inestabilidad en las que el calado de agua está por encima de la altura del vehículo (totalmente sumergido) de aquellas en las que el calado es inferior (parcialmente sumergido). En el caso de vehículo totalmente sumergido, la tendencia general es que la velocidad límite crece según crece el calado. En este caso el Mitsubishi Pajero, al tener mayor superficie sobre la que actúa la fuerza del agua y ser menos hidrodinámico, es el que presenta un menor umbral de velocidad de arrastre. Sucede el efecto contrario cuando el vehículo está parcialmente sumergido, decreciendo los valores de velocidad límite según crece el calado. En esta segunda situación el área proyectada afectada por la fuerza de arrastre tiene menor importancia. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla II-16.

**Tabla II-16** Resultados de los primeros ensayos llevados a cabo por Teo (2010)

<b>Vehículo 1: Pajero</b>						
Ensayo	Caudal (l/s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Caudal unitario q (m <sup>2</sup> /s)	Nº Froude	Estado
1	17.50	0.105	0.556	0.058	0.547	1
2	13.60	0.093	0.487	0.045	0.510	1
3	11.70	0.080	0.488	0.039	0.550	1
4	10.55	0.077	0.457	0.035	0.525	1
5	9.41	0.069	0.455	0.031	0.553	1
6	8.57	0.065	0.439	0.029	0.550	1
7	7.20	0.061	0.393	0.024	0.509	1
8	6.33	0.055	0.384	0.021	0.522	1
9	5.75	0.053	0.362	0.019	0.502	1
10	5.38	0.048	0.374	0.018	0.544	1
11	7.50	0.040	0.625	0.025	0.998	2
12	8.70	0.030	0.967	0.029	1.782	2
13	7.50	0.024	1.042	0.025	2.147	2
14	6.20	0.018	1.148	0.021	2.732	2

<b>Vehículo 2: BMW</b>						
Ensayo	Caudal (l/s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Caudal unitario q (m <sup>2</sup> /s)	Nº Froude	Estado
1	21.00	0.105	0.667	0.070	0.657	1
2	18.00	0.098	0.612	0.060	0.624	1
3	11.50	0.070	0.548	0.038	0.661	1
4	8.10	0.050	0.540	0.027	0.771	1
5	7.70	0.040	0.642	0.026	1.024	1
6	6.75	0.030	0.750	0.023	1.383	2
7	6.50	0.025	0.867	0.022	1.750	2
8	5.92	0.020	0.987	0.020	2.228	2
9	4.90	0.015	1.089	0.016	2.839	2

<b>Vehículo 3: MINI</b>						
Ensayo	Caudal (l/s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Caudal unitario q (m <sup>2</sup> /s)	Nº Froude	Estado
1	22.00	0.112	0.655	0.073	0.625	1
2	16.50	0.092	0.598	0.055	0.629	1
3	11.50	0.065	0.590	0.038	0.739	1
4	8.60	0.050	0.573	0.029	0.819	1
5	6.80	0.040	0.567	0.023	0.905	1
6	7.00	0.030	0.778	0.023	1.434	2
7	6.48	0.025	0.864	0.022	1.745	2
8	5.45	0.015	1.211	0.018	3.157	2

Estado 1: Totalmente sumergido; Estado 2: Parcialmente sumergido

En la Figura II-39 se muestra la comparativa de los resultados obtenidos para vehículos a escala 1:43 y a escala 1:18. Se trataba de validar los resultados de los ensayos con los vehículos a escala 1:43 con los obtenidos con otros a escala mayor, 1:18. La conclusión fue que se daban por válidos los resultados de los vehículos 1:43, proponiendo el escalado de los resultados al prototipo. Parece en cualquier caso que observando la Figura II-39 dichas conclusiones podrían ser ciertamente discutibles.

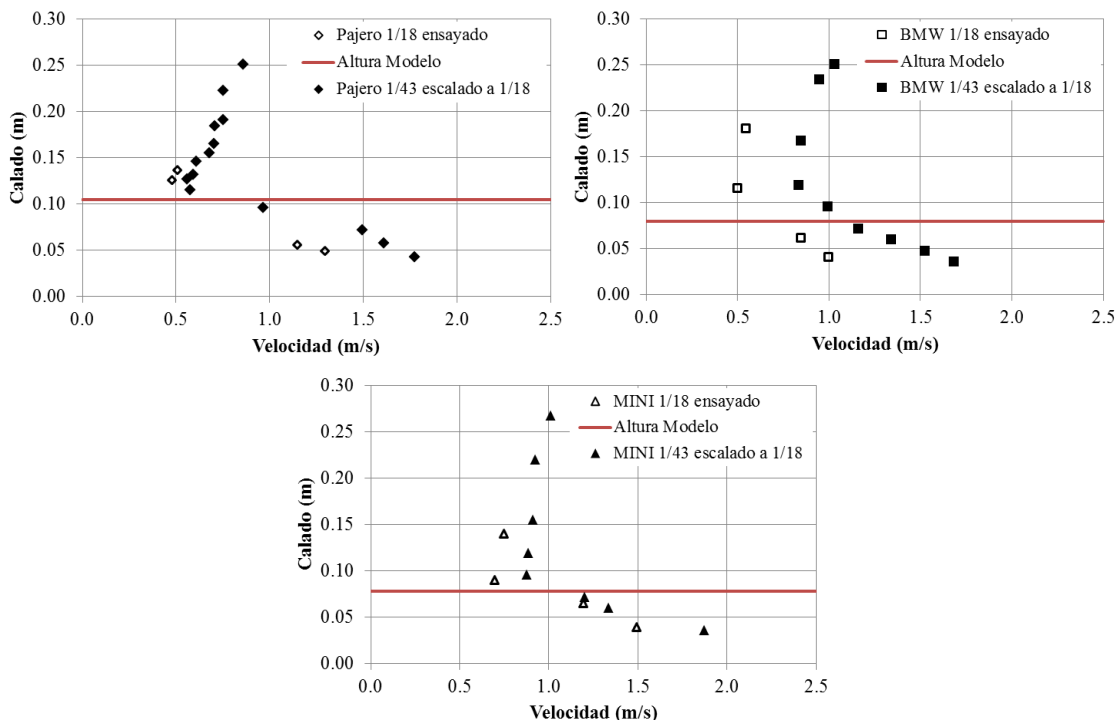


Figura II-39. Validación de los resultados obtenidos con los vehículos a escala 1:43 frente a los obtenidos con los vehículos a escala 1:18 (Teo, 2010)

El efecto de la orientación de los vehículos frente a la dirección del flujo de agua se estudió en el canal pequeño en horizontal y utilizando de nuevo los modelos a escala 1:43. Se ensayaron diferentes orientaciones del vehículo desde 0° hasta 90° y tanto con la parte posterior del vehículo enfrentada al flujo como con la parte delantera, según indica el croquis de la Figura II-40.

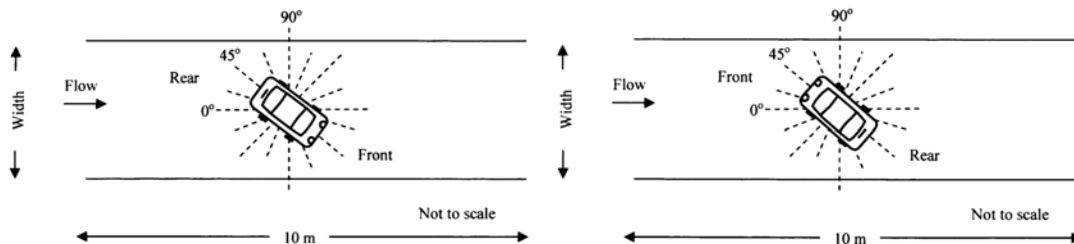


Figura II-40. Configuraciones para el análisis de la influencia de la orientación (Teo, 2010)

Con estos ensayos Teo (2010) trataba de encontrar la orientación que requería unos menores valores de calados y velocidad, para definir, de esa manera, las menores condiciones críticas de

movimiento de los vehículos. Los valores inferiores de calado y velocidad que producían el movimiento del vehículo se daban ante una orientación de 90° (Figura II-41y Figura II-42), lo cual podía ser previsible al ofrecer con esta orientación una mayor área de actuación para la fuerza de arrastre del agua.

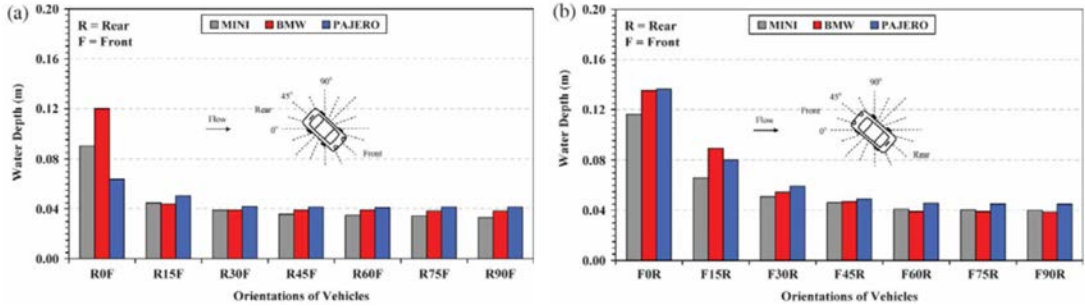


Figura II-41. Variación de calados de inestabilidad según diferentes orientaciones (Teo, 2010)

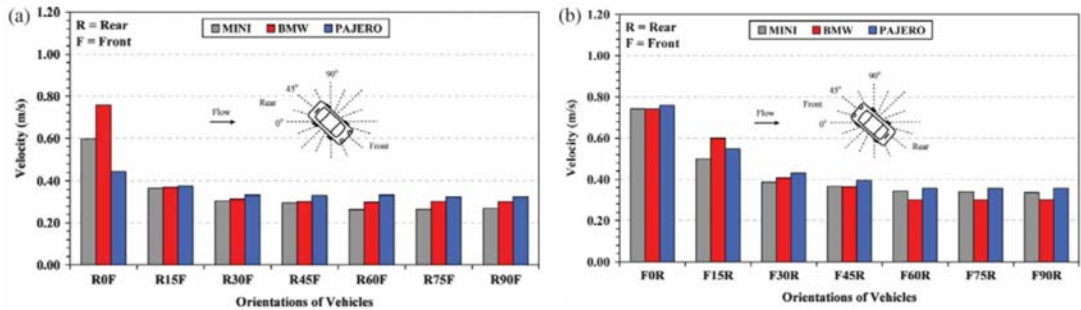


Figura II-42. Variación de velocidades de inestabilidad según diferentes orientaciones (Teo, 2010)

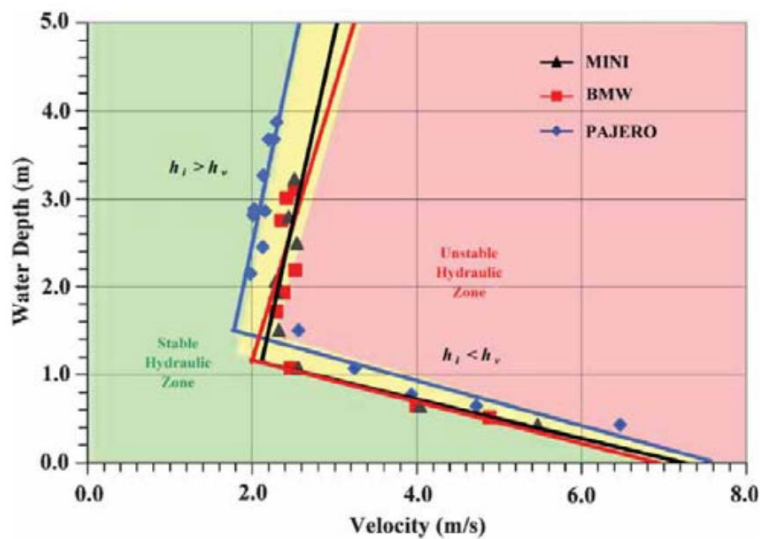


Figura II-43. Límites de estabilidad propuestos para vehículos prototipo (Teo, 2010)



Finalmente, una vez justificado que los valores críticos de velocidad y calados corresponden a una orientación del vehículo perpendicular al flujo, Teo (2010) propone tres zonas, la estable (verde), la inestable (rojo) y la de transición (amarillo). Estas zonas se muestran en la Figura II-43, elaborada a partir del escalado a prototipo de los resultados obtenidos en los ensayos con los vehículos a escala 1:43.

El análisis del gradiente del terreno se llevó a cabo a partir de 4 pendientes, 1:100, 1:200, 1:300 y 1:1000. De la misma forma se utilizaron los modelos de escala menor, validando con el de mayor escala y con incrementos de caudal hasta obtener la situación de inestabilidad.

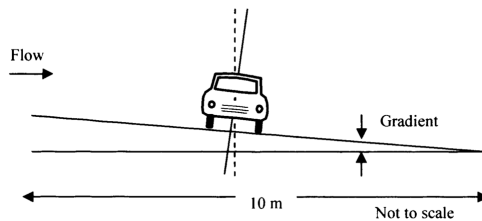


Figura II-44. Configuración para el análisis de la influencia de la pendiente (Teo, 2010)

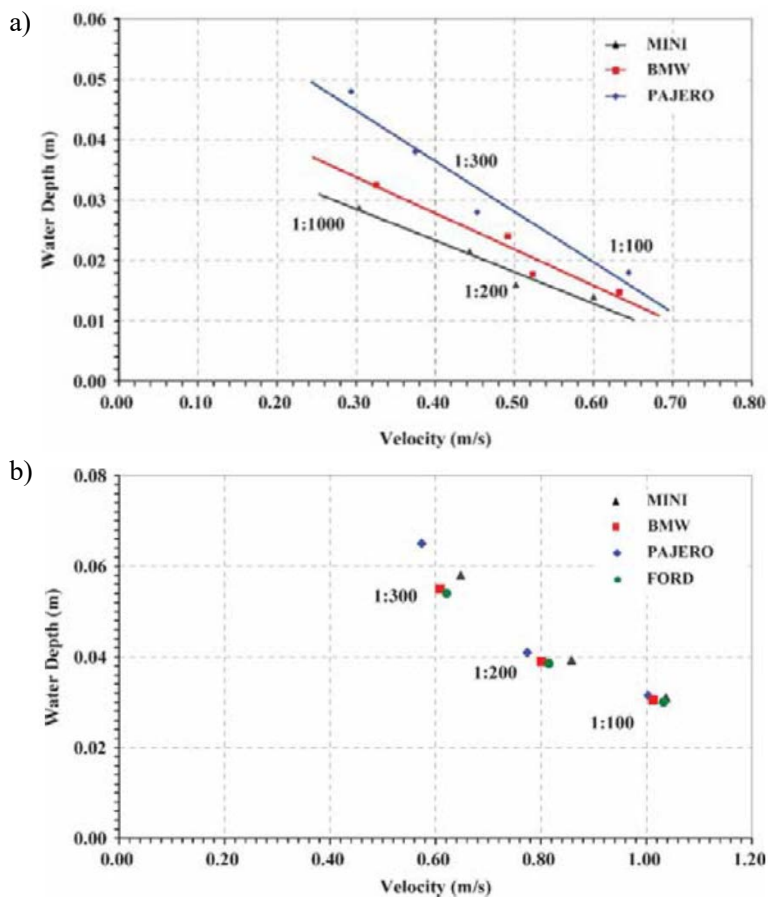


Figura II-45. Variación de calados y velocidades críticas según la pendiente del terreno. a) vehículos a escala 1:43; b) vehículos a escala 1:18. (Teo, 2010)

El aumento de la pendiente del terreno, hace disminuir el valor de la fuerza normal, que corresponde al peso del vehículo cuando se encuentra en un terreno horizontal. La descomposición del peso del vehículo, al añadir pendiente al terreno, hace que la fuerza de arrastre del agua se vea incrementada con la componente del peso correspondiente, en mayor medida cuanto mayor es la pendiente del terreno. Por otro lado se reduce la fuerza de fricción que favorece al movimiento y a obtener valores de velocidad y calado inferiores en el inicio de movimiento del vehículo, según se incrementa la pendiente (Figura II-45).

Por último, el análisis de la influencia de la presencia del vehículo en el flujo de agua se llevó a cabo en el canal grande y mediante los vehículos de escala mayor (1:18), y para las pendientes 1:100, 1:200 y 1:300. En el instante de inestabilidad se tomaron datos de calados y velocidades a lo largo del canal, en ocho puntos ubicados en el eje central del canal (Figura II-47).

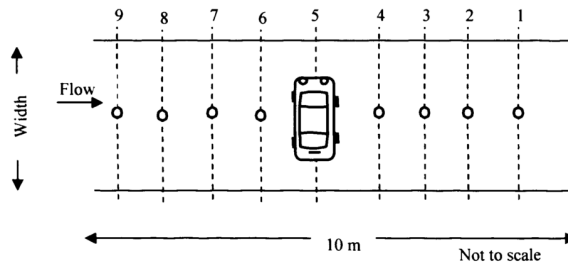


Figura II-46. Localización de los puntos de medidas en el canal grande (Teo, 2010)

Teo (2010) propone una relación de variación [II-18] entre el valor de la variable correspondiente, calado o velocidad, con el vehículo en el flujo de agua ( $M_{WV}$ ) y sin el vehículo ( $M_{W0V}$ ).

$$\text{Relación de variación} = \frac{M_{WV}}{M_{W0V}} \quad \text{[II-18]}$$

Los resultados de este análisis se pueden observar gráficamente en la Figura II-47, para diferentes pendientes. Este valor será la unidad cuando ese punto no se vea influenciado por la presencia del vehículo, mayor que la unidad cuando la influencia del vehículo sea positiva y menor que la unidad cuando la presencia del vehículo sea negativa. Teo (2010) concluye que se produce un impacto significativo en la propagación del flujo y en el proceso hidrodinámico, independientemente del tipo de vehículo.

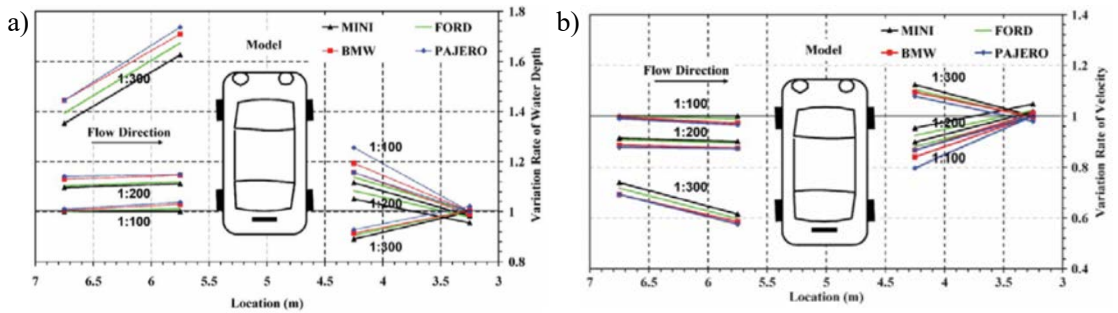


Figura II-47. Relaciones de variación de a) calado, y b) velocidad. (Teo, 2010)

Respecto a la investigación de Teo (2010) cabe comentar sin embargo que un hecho fundamental para estos ensayos hubiera sido la rigurosidad a la hora de seguir la semejanza de Froude, siendo el ajuste del peso del modelo básico para obtener resultados realistas. Tal ajuste no se realizó con lo que sus estudios pueden ser valorados desde un punto de vista cualitativo pero no cuantitativo. Este aspecto es remarcado por Xia *et al.* (2011) en sus primeras investigaciones sobre el estudio de la estabilidad de vehículos.

#### II.4.1.5. Xia *et al.* (2011)

Xia *et al.* (2011) realizaron estudios teóricos sobre la estabilidad de los vehículos ante la influencia del agua. Desarrollaron una fórmula semi-empírica, a partir del análisis de las fuerzas actuantes, para predecir la velocidad de arrastre sobre vehículos inundados a partir de la condición de deslizamiento de equilibrio mecánico. La validación de la fórmula propuesta se llevó a cabo a partir de los resultados experimentales obtenidos por Teo (2010).

Las fuerzas que Xia *et al.* (2011) asumen que se ejercen sobre el vehículo parcialmente inundado son básicamente la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) y la fuerza de flotación ( $F_b$ ), y aunque en su esquema de fuerzas indican también una fuerza de ascensión ( $F_L$ ) en su análisis no la contemplan. Asumieron que el vehículo estaba aparcado, y por tanto con las ruedas bloqueadas, así que también se produciría una fuerza de rozamiento que evitaría el deslizamiento, por el contacto entre el neumático y la carretera al verse aplicada la fuerza de arrastre del agua. La estabilidad del vehículo será por tanto controlada por las fuerzas mencionadas más la fuerza de gravedad. Puesto que la fuerza de gravedad y flotación actúan en la misma dirección, pueden ser tenidas en cuenta en una única fuerza, el peso sumergido del vehículo ( $F_G$ ). Asimilaron un vehículo a las grandes partículas erosionables del lecho de un río, pues se ven sometidas a un sistema de fuerzas análogo. Por tanto, el inicio de movimiento de un vehículo podría ser obtenido en base a una metodología similar a la que se aplica a dichas partículas. La fórmula propuesta fue la que se indica en la expresión [II-19].

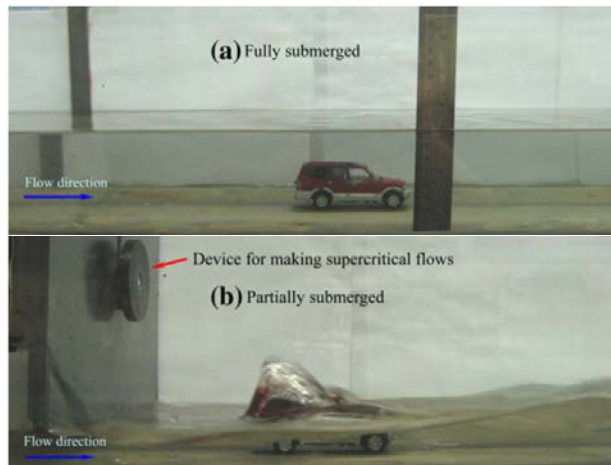
$$U_c = \alpha \left( \frac{y}{h_c} \right)^\beta \times \sqrt{2g \left( \frac{\rho_c - \rho_w}{\rho_w} \right) h_c} \quad \text{[II-19]}$$

Donde  $y$  y  $h_c$  son la profundidad de agua y altura del vehículo, respectivamente;  $\rho_c$  y  $\rho_w$  son la densidad del vehículo y del agua, respectivamente;  $g$  es la aceleración de la gravedad; y  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros relacionados con la forma del vehículo, el tipo de neumáticos y la rugosidad de la superficie de la carretera, que fueron determinados a partir de los resultados experimentales obtenidos por Teo (2010), en aquella situación en que la parte trasera del vehículo está enfrentada a la dirección del flujo.

**Tabla II–17** Diferentes valores de parámetros en la fórmula de velocidad de arrastre [II-19]

Grado de inundación	Parcialmente sumergido $y < h_c$		Totalmente sumergido $y > h_c$	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
Pajero Jeep	1.492	-0.731	0.737	0.532
BMW M5	1.116	-0.558	0.816	0.264
Mini Cooper	1.225	-0.708	0.932	0.121

En el caso de los vehículos parcialmente sumergidos, la distribución de velocidades y nivel de agua alrededor del vehículo es mucho más compleja. Se producía un resalto hidráulico sobre el vehículo como consecuencia del sistema que se construyó para obtener flujos en régimen supercrítico (Figura II-48). La utilización de la compuerta tenía la función de obtener bajos calados y altas velocidades de flujo.



**Figura II-48.** Vehículos totalmente y parcialmente sumergidos en el canal

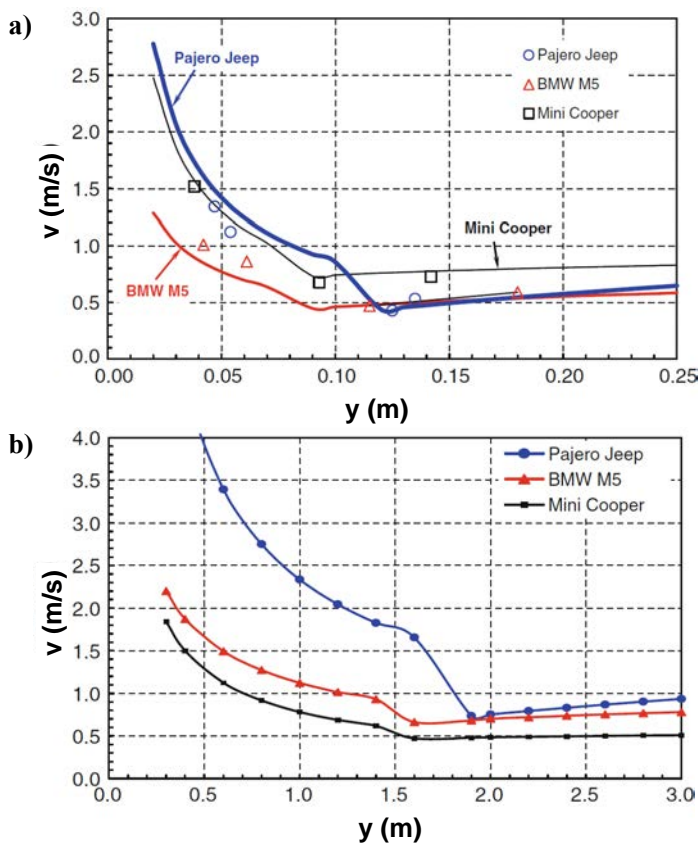
Dicho comportamiento del flujo para situaciones de vehículo parcialmente sumergido no permitía obtener una expresión de velocidad de arrastre mediante el sistema de fuerzas propuestas. En cualquier caso, los autores propusieron la misma expresión para situación de vehículo parcialmente sumergido pero utilizando diferentes parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ . Dichos parámetros serán positivos para vehículos sumergidos y negativos para la situación de vehículos parcialmente sumergidos.

Xia *et al.* (2011) hacen mención a que en los ensayos de Teo (2010) la densidad de los vehículos era significativamente mayor a la correspondiente en prototipo, con lo que siendo así quedaría invalidada su propuesta de límites de inestabilidad para vehículos. Xia *et al.* (2011) afirman que en la expresión analítica propuesta [II-19]: *este efecto es tenido en cuenta al incorporar el término de densidad relativa. Los ensayos experimentales, por tanto, no pueden ser escalados a partir de la semejanza de Froude pero pueden ser tenidos en cuenta en la formula, utilizando la densidad de los modelos ensayados.* El objetivo de los ensayos con los modelos era determinar los dos parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  de la formula [II-19].

La validación de esta ecuación se realizó a partir de los datos experimentales de los modelos de mayor tamaño a escala 1:18, según se muestra en la Figura II-49a. Por último, en la Figura II-49b se muestra una gráfica donde se recogen diferentes velocidades de arrastre correspondientes a varias profundidades entrantes, para los tres prototipos de vehículos según aplicación de la ecuación [II-19].

Por lo tanto, la gráfica de la Figura II-49b puede ser utilizada para estimar el grado de estabilidad de tres tipologías de vehículos aparcados sometidos a la acción del agua, como primera valoración de la peligrosidad para vehículos (Xia *et al.*, 2011). Los autores apuntan, como

consideraciones finales, que el estudio fue llevado a cabo según circunstancias ideales y en todo caso con la parte trasera del vehículo enfrentada al sentido del flujo y sin pendiente del terreno transversal ni longitudinal. Además, proponen como estudios futuros el análisis del efecto producido en el vehículo según la orientación de éste con respecto al sentido del flujo, así como el estudio del comportamiento de un vehículo prototipo (de desguace) situado aguas abajo de una presa.



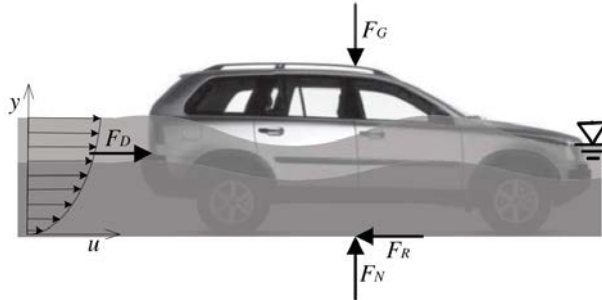
**Figura II-49.** a) Validación de la ecuación [II-19], utilizando los datos experimentales para vehículos a escala 1:18; y b) aplicación de la ecuación [II-19] en el cálculo de las velocidades de arrastre para prototipos

#### II.4.1.6. Shu *et al.* (2011)

Shu *et al.* (2011) continuaron la investigación de la inestabilidad de los vehículos, pero en este caso centrándose en situaciones en las que el vehículo aparcado está parcialmente sumergido. Propusieron una expresión semi-empírica de nuevo, pero validada en este caso con nuevos resultados obtenidos de los ensayos de tres modelos de vehículos a escala 1:18.

Las fuerzas analizadas para esta configuración son la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) y la fuerza de flotación ( $F_b$ ) por parte del agua y la fuerza de reacción normal ( $F_N$ ) y de rozamiento ( $F_R$ ) por parte del suelo (Figura II-50). Las fuerzas de flotación y la debida al peso pueden combinarse en la fuerza de peso efectivo ( $F_G$ ). Se realizaron también algunas hipótesis previas para el desarrollo de la fórmula, como que el vehículo presenta las cuatro ruedas bloqueadas (produciendo

deslizamiento y no rotación de éstas), que el terreno donde se encuentra el vehículo es regular y horizontal y que la capacidad de sellado de éste es suficiente para garantizar que no se produce un llenado rápido de agua. Bajo estas hipótesis el vehículo flotará dado un cierto calado de agua, cuando  $F_G$  tienda a cero.



**Figura II-50.** Esquema de fuerzas actuantes sobre un vehículo parcialmente sumergido

Los autores asumieron valores del coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) constantes, pero diferenciando cuando el calado de agua fuera inferior a la altura del chasis del vehículo ( $C_d$ : 1.15) o cuando fuera superior ( $C_d$ : 1.10), tal y como procedieron Keller y Mitsch (1993). Respecto al coeficiente de rozamiento ( $\mu$ ), consideran que debe ser un parámetro clave en la determinación de la velocidad crítica de inicio de movimiento y debe ser tenido en cuenta como un rango de potenciales valores (0.25-0.75), tal como propuso Gerard (2006). En cualquier caso, realizaron los ensayos para determinar el coeficiente de cada uno de los modelos (Tabla II-18).

Con estas consideraciones y el sistema de fuerzas propuesto, Shu *et al.* (2011) desarrollaron la formula [II-20], para vehículos parcialmente sumergidos. Se trata de una expresión muy similar a la [II-19] propuesta por Xia *et al.* (2011).

$$U_c = \alpha \left(\frac{y}{h_c}\right)^\beta x \sqrt{2gl_c \left(\frac{\rho_c h_c}{\rho_w y} - R_f\right)} \quad \text{con } R_f = \frac{h_c \rho_c}{h_b \rho_w} \quad \text{[II-20]}$$

siendo  $y$  y  $h_c$  la profundidad de agua y altura del vehículo, respectivamente;  $h_b$  el calado de flotación;  $\rho_c$  y  $\rho_w$  la densidad del vehículo y del agua, respectivamente;  $l_c$  la longitud del vehículo,  $g$  la fuerza de gravedad; y  $\alpha$  y  $\beta$  parámetros relacionados con la forma del vehículo, el tipo de neumáticos y la rugosidad de la superficie de la carretera, que fueron determinados a partir de resultados experimentales en este mismo estudio.

Los ensayos experimentales realizados por Shu *et al.* (2011) fueron llevados a cabo en el mismo lugar que los de Teo (2010), en el laboratorio de la escuela de ingeniería en la universidad de Cardiff, en el Reino Unido. En este caso sin embargo, los vehículos a escala tenidos en cuenta fueron el Ford Focus, el Ford Transit y el Volvo XC90 (Figura II-51); y los ensayos se realizaron en un canal de cristal de 15 m de largo, 1.2 m de ancho y 1.0 m de altura, presentando una disposición horizontal y una alfombra de plástico en el fondo.

A diferencia de los estudios experimentales de Teo (2010), en este estudio se cumplieron rigurosamente los principios de semejanza de Froude, asegurando que se cumplieran todas las escalas (geométrica  $\lambda$ , velocidades  $\lambda^{1/2}$ , tiempo  $\lambda^{1/2}$ , caudales  $\lambda^{5/2}$  y fuerzas  $\lambda^3$ ), lo cual permitía escalar los resultados obtenidos a las condiciones en prototipo. Se aseguraron de que la densidad

del modelo fuera lo más parecida posible a la del prototipo, de manera que se cumpliera la escala de fuerzas  $\lambda_F$ , para la fuerza debida al peso  $\lambda_F = \lambda_{Fg}$  y para la fuerza de flotación  $\lambda_F = \lambda_{F_b}$ . La diferencia de la posición del centro de gravedad entre el modelo y el prototipo no se tuvo en cuenta, aún y admitiendo que un centro de gravedad más próximo a la parte delantera del vehículo puede provocar que la trasera comience a flotar antes y el rozamiento de éstas ruedas deje de contribuir a la estabilidad.



Figura II-51. Vehículos a escala 1:18 ensayados por Shu *et al.* (2011)

Tabla II-18 Características de los modelos ensayados por Shu *et al.* (2011) y de sus prototipos

Vehículo	Escala	Long. [mm]	Ancho [mm]	Alto [mm]	Vol. [m <sup>3</sup> ]	Peso en vacío	Densidad $\rho_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Coef. Roz. $\mu$
Ford	1:1	4,337	1,839	1,500	11.964	1,392 kg	116.35	0.25-0.75
Focus	1:18	240	99	82	0.00195	238.8 g	122.46	0.5
Ford	1:1	4,863	1,974	1,997	19.170	1,708 kg	89.10	0.25-0.75
Transit	1:18	270	110	109	0.00324	310.2 g	95.74	0.39
Volvo	1:1	4,808	1,897	1,783	16.262	2,155 kg	132.52	0.25-0.75
XC90	1:18	267	105	99	0.00278	369.2 g	132.81	0.68

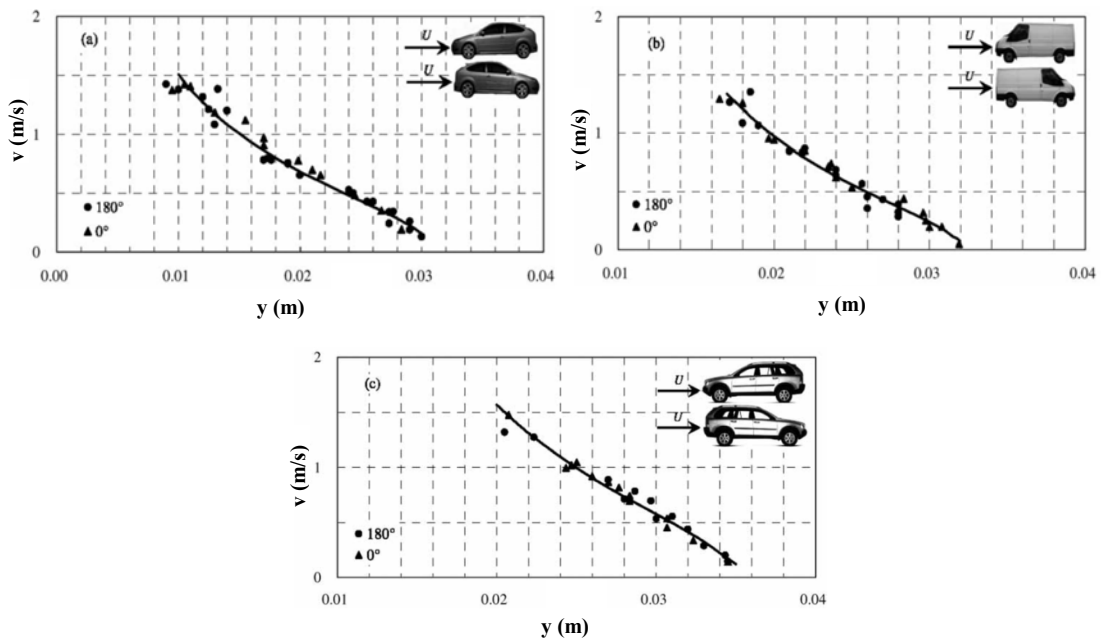


Figura II-52. Resultados de los puntos de inestabilidad para los tres modelos de vehículos ensayados por Shu *et al.* (2011). a) Ford Focus; b) Ford Transit y c) Volvo XC90.

Los ensayos realizados con los modelos de vehículos tuvieron en cuenta dos orientaciones, con la parte delantera enfrentada al sentido del agua y también con la parte trasera enfrentada. Atendiendo a los resultados experimentales obtenidos por Shu *et al.* (2011) (Figura II-52), los autores observaron que la velocidad de inestabilidad crecía al decrecer el calado de inestabilidad para cada vehículo. Además, no se observaba una diferencia sustancial en la relación calado-velocidad para estas dos orientaciones estudiadas. En cuanto al inicio de flotación, para una misma velocidad de inestabilidad, en el modelo Volvo XC90 el calado necesario es superior que en el modelo Ford Focus o el Ford Transit. Se presentan por tanto diferencias significativas en las condiciones hidráulicas de inicio de movimiento para diferentes tipos de vehículos.

Los parámetros ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) de la fórmula de velocidad de arrastre para vehículos parcialmente sumergidos [II-20], fueron resultado de aplicar el método de transformación logarítmica y regresión lineal a dicha expresión [II-20], y se muestran en la Tabla II-23.

**Tabla II-19** Parámetros obtenidos para los vehículo para formula de velocidad de arrastre

Vehiculo	Parámetros	
	$\alpha$	$\beta$
Ford Focus	0.500	-0.178
Ford Transit	0.227	-0.764
Volvo XC90	0.394	-0.630

Los resultados de velocidades de inestabilidad obtenidos a partir de la fórmula se correlacionaban muy bien con los obtenidos experimentalmente, dando un valor de  $R^2=0.97$ . Puesto que se habían seguido estrictamente los principios de semejanza de Froude, tanto la formulación como los resultados experimentales podían ser escalados a nivel de prototipo; y realizaron de este modo la validación de sus resultados comparando con dos eventos de inundación (Figura II-53) producidos en Europa (Boscastle (Reino Unido) (2004) y Var (Francia) (2010)). A partir de grabaciones de estos eventos, y centrándose únicamente en un vehículo, observaron el calado y velocidad que producía el movimiento de dicho vehículo. El calado de agua se estimó comparando la altura del vehículo con el nivel de agua alrededor de éste. La velocidad del agua se obtuvo a partir de la relación del ancho de un edificio y el tiempo que los objetos flotantes tardaban en superar esa distancia. Puesto que el vehículo ya se encontraba en movimiento en la grabación, la velocidad que observaron era superior a la velocidad crítica de inicio del movimiento.

Para el primer evento (Boscastle, 2004), se observó un vehículo pequeño, similar al Ford Focus ensayado, que estaba siendo arrastrado con un calado de aproximadamente 0.4-0.5 m y una velocidad de aproximadamente 2.1 m/s. La velocidad crítica calculada para el Ford Focus era de 2.0 m/s y un calado de agua de 0.45 m, siendo por tanto el valor real superior al calculado, motivo por el cual el vehículo estaba siendo arrastrado.

Para el segundo de los eventos (Var, 2010), se observó un vehículo grande similar al modelo Volvo ensayado. Los valores de calado observados fueron de 0.50 m aproximadamente y una velocidad estimada de 3.6 m/s, que era ligeramente superior a la velocidad crítica calculada de 3.3 m/s para el modelo Volvo.



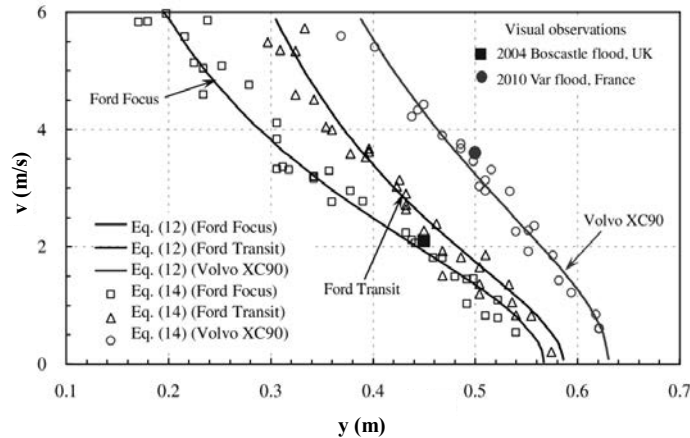


Figura II-53. Validación de la formulación propuesta por Shu *et al.* (2011)

#### II.4.1.7. FRMRC: Flood Risk Management Research Consortium (2012)

El Flood Risk Management Research Consortium (FRMRC) es el mayor consorcio de universidades y otras organizaciones del Reino Unido realizando investigación sobre el riesgo de inundaciones. Este consorcio fue creado para abordar temas clave en la ciencia e ingeniería de inundaciones y su cartera de investigación incluye la entrega a corto plazo de las herramientas y técnicas para apoyar la predicción más precisa y alerta de inundaciones, mejoras para infraestructuras de gestión de inundaciones y reducción de los riesgos de inundación a las personas, bienes y medio ambiente. (FRMRC) fue patrocinado por el Consejo de Investigación de Ingeniería y Física (EPSRC) bajo la Subvención EP/FO20511/1, con fondos adicionales de la EA / Defra (Joint Defra / EA Flood and Coastal Erosion Management R&D Programme), la Agencia de ríos de Irlanda del Norte (DARDNI) y la Oficina de Obras Públicas (OPW), Irlanda.

El FRMRC, en el año 2012, publicó un informe titulado “2D Hydrodynamic Modelling: Mobile Beds, Vehicle Stability and Severn Estuary Barrage” (Falconer *et al.*, 2012), cuyos autores fueron Roger A. Falconer, Binliang Lin y Junqiang Xia, de la Universidad de Cardiff. Este proyecto de investigación se creó para que, a partir de un modelo 2D existente, se pudiera permitir la predicción de las fuerzas hidrodinámicas sobre obstáculos estáticos y móviles y desarrollar y validar un modelo 2D con el que poder predecir los sedimentos en suspensión y la contaminación por inundaciones. Los tres aspectos de la gestión del riesgo de inundación abarcados por esta investigación, fueron los métodos numéricos para la predicción de las rutas de inundación sobre lechos móviles, el criterio de estabilidad de los vehículos arrastrados, y el efecto de la construcción de presas en la inundación de las costas en el estuario del Severn.

En dicho informe se resumen las investigaciones de Xia *et al.* (2011) y de Shu *et al.* (2011), en lo que se refiere al estudio de la inestabilidad de vehículos totalmente sumergidos y parcialmente inundados respectivamente. Además, en este proyecto realizado por el Flood Risk Management Research Consortium (FRMRC), se introdujo un algoritmo para evaluar el grado de seguridad de las personas y los vehículos durante las inundaciones repentinas utilizando un modelo numérico hidrodinámico bidimensional. Los algoritmos referentes a la peligrosidad de personas y vehículos se aplicaron a tres casos de estudio: las inundaciones de Glasgow y Boscastle en el Reino Unido, y la rotura de la presa de Malpasset en Francia. Dichos casos de estudio se describen

superficialmente en este texto, y se pueden encontrar con más detalle en los trabajos de Xia *et al.* (2011), donde se explican estos casos en detalle, así como los algoritmos tenidos en cuenta en el modelo numérico hidráulico bidimensional.

#### II.4.1.8. Xia *et al.* (2013)

Xia *et al.* (2013) continuaron los estudios de inestabilidad de vehículos ante inundaciones. En este caso, centrándose en vehículos parcialmente sumergidos (Shu *et al.*, 2011), analizando los efectos de la orientación del vehículo con respecto al sentido del flujo de agua y los efectos de las pendientes del terreno sobre el que se encuentra el vehículo. Se trata de un estudio analítico y experimental. En primer lugar, propusieron una variación de la expresión de la velocidad de arrastre [II-20] para vehículos parcialmente sumergidos, para tener en cuenta el efecto de la orientación del vehículo. Desde el punto de vista experimental, realizaron unos 200 ensayos con dos modelos de vehículos a escala 1:14 y 1:24, con tres diferentes orientaciones del vehículo con respecto el sentido del flujo y tres pendientes diferentes del terreno. De igual forma que en estudios anteriores (Xia, *et al.*, 2011a; 2011b; 2013; Shu *et al.*, 2011), se respetó estrictamente el principio de semejanza de Froude, con lo que los resultados podían ser escalados a nivel de prototipo directamente.

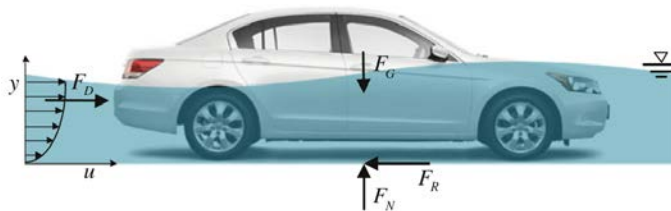


Figura II-54. Sistema de fuerzas considerado por Xia *et al.* (2013)

El análisis de fuerzas tenido en cuenta es el mismo que el llevado a cabo por Shu *et al.* (2011) para vehículos parcialmente sumergidos. De la misma forma, se consideró que las cuatro ruedas del vehículo aparcado estaban bloqueadas y no permitían la rotación, únicamente el rozamiento del neumático con el terreno al verse sometido a una fuerza. Se consideró también que el vehículo era lo suficientemente estanco como para que no se llenara de agua rápidamente, cuando el nivel de ésta estuviera por encima del nivel más bajo del chasis. Se indicó también que una de las posibles inestabilidades de los vehículos podría ser el vuelco, pero dicha situación se produciría en condiciones extremas de flujo supercrítico que difícilmente sucederían en zonas urbanas, por lo tanto, quedaron fuera del estudio.

Las expresiones propuestas para vehículos parcialmente sumergidos, orientados en paralelo al flujo [II-21] y en perpendicular [II-22] se distinguen únicamente en la longitud en la dirección del sentido del agua, la longitud del coche ( $l_c$ ) en el caso paralelo y el ancho del coche ( $b_c$ ) en el caso perpendicular.

$$U_c = \alpha \left( \frac{y}{h_c} \right)^\beta x \sqrt{2gl_c \left( \frac{\rho_c h_c}{\rho_w y} - \frac{h_c \rho_c}{h_b \rho_w} \right)} \quad (\text{paralelo}) \quad \text{[II-21]}$$

$$U_c = \alpha \left( \frac{y}{h_c} \right)^\beta x \sqrt{2gb_c \left( \frac{\rho_c h_c}{\rho_w y} - \frac{h_c \rho_c}{h_b \rho_w} \right)} \quad (\text{perpendicular}) \quad \text{[II-22]}$$

Siendo  $y$  y  $h_c$  la profundidad de agua y altura del vehículo, respectivamente;  $h_b$  el calado de flotación;  $\rho_c$  y  $\rho_w$  la densidad del vehículo y del agua, respectivamente;  $l_c$  y  $b_c$  la longitud y ancho del vehículo,  $g$  la fuerza de gravedad;  $\alpha$  y  $\beta$  parámetros relacionados con la forma del vehículo, el tipo de neumáticos y la rugosidad de la superficie de la carretera, que fueron determinados a partir de resultados experimentales en este mismo estudio (Tabla II–21). Se debe tener en cuenta que el coeficiente de rozamiento  $\mu$  puede ser diferente entre ambas situaciones, siendo en general un valor inferior para el caso paralelo y mayor para el perpendicular.

Los ensayos experimentales fueron llevados a cabo en un canal de la sala experimental para ingeniería de sedimentos y control de inundaciones de la universidad de Wuhan (China), para investigar las condiciones de inestabilidad de vehículos para tres diferentes orientaciones. El canal estaba dispuesto horizontalmente y tenía 60 m de longitud y 1.2 m de ancho, con el fondo cubierto con una fina capa de cemento y los cajeros de cristal. Se ensayaron dos tipos de vehículos (Honda Accord y Audi Q7) y, para cada modelo, dos escalas diferentes, la mayor 1:14 y la menor 1:24. Los detalles de los vehículos ensayados se muestran en la Tabla II–20.

**Tabla II–20** Características de los modelos ensayados por Xia *et al.* (2013) y de sus prototipos

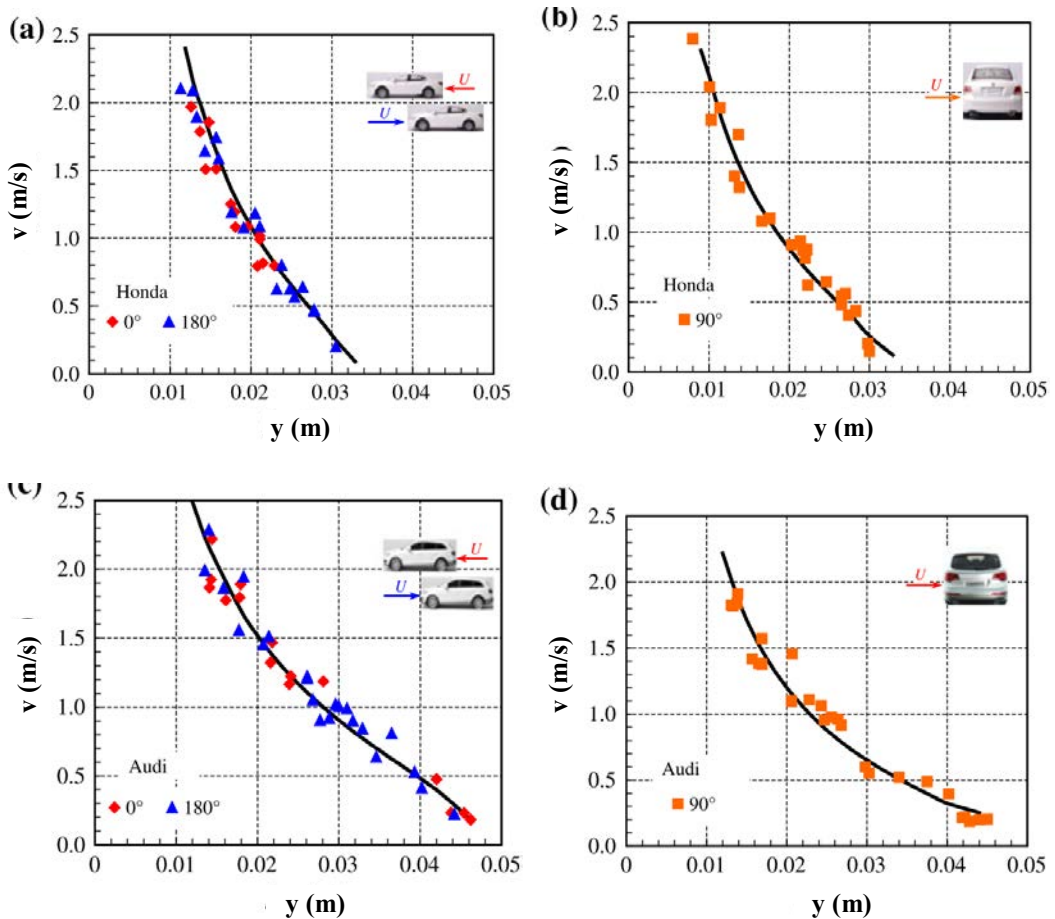
Vehículos	Escala	Longitud (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Peso en vacío (kg)
Honda (Accord)	1:1	4.945	1.845	1.480	1,631
	1:14	0.353	0.134	0.107	0.597
	1:24	0.205	0.078	0.062	0.126
Audi (Q7)	1:1	5.089	1.983	1.737	2,345
	1:14	0.365	0.140	0.123	0.855
	1:24	0.213	0.082	0.070	0.166

Los coeficientes de rozamiento fueron ensayados para los dos vehículos, obteniendo unos valores de 0.25 para el caso de orientación del vehículo paralela y 0.75 para el caso de orientación perpendicular. Se asumió que los valores de rozamiento obtenidos se encontraban en los rangos habituales de los vehículos prototipo. Para asegurar la estanqueidad de los vehículos se rellenó el interior de los modelos con espuma ligera.

Los resultados experimentales de los modelos a escala mayor (1:14) (Figura II-55) llevaron a las siguientes conclusiones: 1) la velocidad de inestabilidad decrece cuando aumenta el calado para cada vehículo y orientación; 2) resultados muy similares para orientaciones de  $0^\circ$  (parte trasera del vehículo enfrentada al sentido del agua) y de  $180^\circ$  (parte delantera enfrentada al sentido del agua); 3) para una misma velocidad, el calado para el cual el modelo de Audi empieza a flotar es superior al del modelo de Honda; y 4) para el mismo calado de inestabilidad, la velocidad para  $90^\circ$  (orientado perpendicularmente al sentido del agua) es menor que para  $0^\circ$  o  $180^\circ$  para ambos modelos estudiados.

La validación de las formulas propuestas (Figura II-56) se llevó a cabo a partir de los resultados obtenidos con los modelos de vehículos de escala menor (1:24), los cuales fueron escalados directamente a prototipo y comparados con las funciones propuestas, introduciendo los datos de

los prototipos, para orientación paralela (0° y 180°) [II-21] y para orientación perpendicular (90°) [II-22].



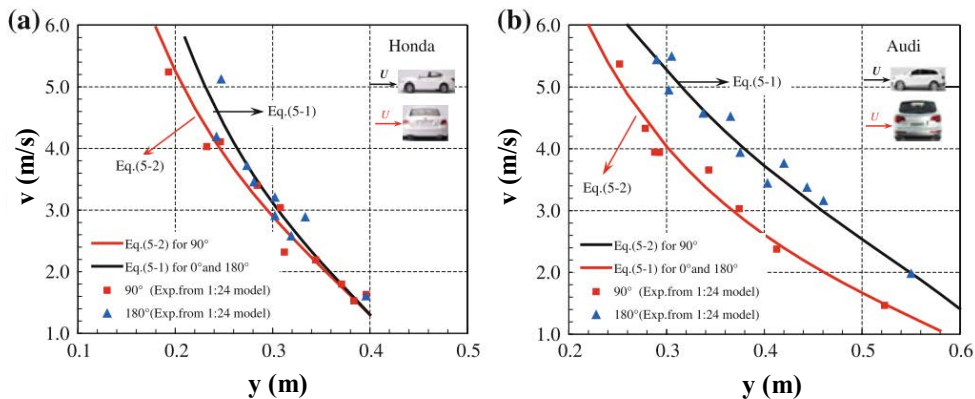
**Figura II-55.** Resultados de los puntos de inestabilidad para los tres modelos de vehículos (escala 1:14) ensayados por Xia *et al.* (2013). a) Honda 0° y 180°; b) Honda 90°; c) Audi 0° y 180°; y d) Audi 90°

**Tabla II-21** Parámetros obtenidos en cada vehículo para la fórmula de velocidad de arrastre según orientaciones del vehículo

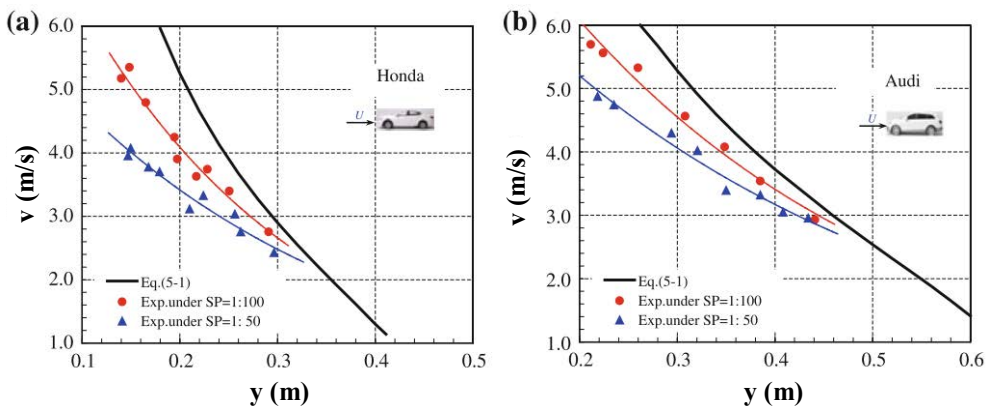
Vehículos	Orientación	Parámetros		$h_b(m)$	$R_f = \frac{h_c \rho_c}{h_b \rho_w}$	$\mu$
		$\alpha$	$\beta$			
Honda (Accord)	0° y 180°	0.212	-0.562	0.45	0.650	0.25
	90°	0.492	-0.344			0.75
Audi (Q7)	0° y 180°	0.438	-0.219	0.67	0.551	0.25
	90°	0.367	-0.451			0.75

Atendiendo a las gráficas de la Figura II-56, se puede observar que un incremento del calado va acompañado de un decremento de la velocidad de inestabilidad, principalmente debido a un crecimiento del área normal proyectada en la dirección del flujo y un decremento de la fuerza de rozamiento (por aumento de la fuerza de flotación). Para un mismo calado de inestabilidad para orientaciones de 0° y 180° las velocidades de inestabilidad son levemente superiores que para una

orientación de  $90^\circ$  en el caso de un vehículo tipo Honda, pero para el vehículo tipo Audi el incremento es sensiblemente superior. Ante una orientación de  $90^\circ$  del vehículo, el agua ejerce una mayor fuerza de arrastre por actuar sobre una mayor superficie proyectada, pero el coeficiente de rozamiento en esta orientación es mucho mayor que para una orientación de  $180^\circ$ . Por este motivo, no se dan velocidades muy diferentes con el cambio de orientación, al verse compensada la mayor fuerza de arrastre con una mayor fuerza de rozamiento. Cuando el calado se aproxima al calado de flotación, la orientación del vehículo puede considerarse despreciable; este efecto se observa con más claridad para el caso del modelo Honda (Figura II-57a). El modelo Honda presenta un menor peso en vacío y una menor distancia desde el terreno hasta el chasis, lo cual hace que las variables hidráulicas críticas sean inferiores que en el caso del modelo Audi Q7.



**Figura II-56.** Comparativa de la velocidad de arrastre estimada para vehículos prototipo, para orientaciones de  $90^\circ$  y  $180^\circ$ . Formulaciones y resultados experimentales de modelos 1:24 escalados a prototipo



**Figura II-57.** Efecto de las diferentes pendientes analizadas para prototipo a) Honda y b) Audi

En relación al efecto de la pendiente del terreno en la inestabilidad de vehículos, se llevaron a cabo ensayos en el canal de laboratorio con dos pendientes 1: 100 y 1:50, teniendo en cuenta únicamente una orientación del vehículo de  $180^\circ$  (parte delantera enfrentada al sentido del flujo). Las conclusiones fueron evidentes: para un mismo calado, la velocidad de arrastre disminuye cuando aumenta la pendiente (Figura II-57). Es obvio pensar que cuando el terreno presenta una

inclinación con un ángulo  $\theta$ , el valor de la fuerza normal será reducida “ $\cos\theta$ ” veces y de manera análoga también la fuerza de rozamiento. Al mismo tiempo, la fuerza de arrastre del agua se verá incrementada con una componente de peso, siendo  $F_D + F_g \text{sen}\theta$ . Estos efectos en la variación de fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras explican la reducción de la velocidad de inestabilidad del vehículo para vehículos aparcados en terrenos con pendientes.

#### II.4.1.9. Toda *et al.* (2013)

En Japón, en la inundación de Nagasaki en julio del 1982, se produjeron 116 fallecimientos muchos de los cuales debidos a accidentes relacionados con los vehículos (Takahasi *et al.*, 1987). También en el distrito de Tohoku en marzo de 2011 se produjo un enorme Tsunami que ocasionó el arrastre de un gran número de vehículos y con ello infinidad de daños y pérdida de vidas humanas. Con estos antecedentes Toda *et al.* (2013) argumentaron la importancia de estudiar los problemas relacionados con los vehículos en caso de inundaciones desde el punto de vista hidráulico y de la reducción de desastres ocasionados por éstos. Sus estudios se basaron en el comportamiento de los vehículos antes inundaciones, determinando la condición crítica de inicio de flotación de los mismos.

Para sus ensayos experimentales, los autores utilizaron el canal horizontal que formaba parte de los experimentos realizados por Ishigaki *et al.* (2005) para la determinación de planes de rutas de evacuación ante inundaciones en zonas subterráneas (Figura II-31 y Figura II-59). Se trata de un canal de mortero de 1.0 m de ancho, 10 m de longitud y 1.5 m de profundidad. Toda *et al.* (2013) utilizaron dos tipos de coches: a) tipo sedán (escala 1/10) y b) tipo furgoneta (escala 1/18), tal y como se observan en la Figura II-58.



**Figura II-58.** Maquetas de vehículos usados por Toda *et al.* (2013) en sus ensayos. Tipo sedán a la izquierda y tipo furgoneta a la derecha



**Figura II-59.** Ensayo con la maqueta del vehículo tipo sedán. (Toda *et al.*, 2013)

El peso de los vehículos se ajustó mediante una pequeña placa de acero para adaptar el peso escalado según el peso real del prototipo. El coche tipo sedán tiene 0.47 m de longitud, 0.20 m de ancho, 0.15 m de altura y un peso de 1.350 kg, mientras que el coche tipo furgoneta presenta 0.26 m de longitud, 0.10 m de ancho, 0.12 m de altura y un peso de 0.384 kg. En los ensayos se consideró el efecto producido por el freno de mano, añadiendo cinta adhesiva a las ruedas.

Realizaron un balance de fuerzas, entre la Fuerza de arrastre ( $F = F_D$ ) y la Fuerza de rozamiento ( $S = F_R$ ) para la condición inicial de inestabilidad tal y como se indica en la Figura II-60 y en las ecuaciones [II-23], [II-24] y [II-25].

$$F_D = F_R \quad [II-23]$$

$$F_R = \mu(M_c g - F_b - F_L) \quad [II-24]$$

con  $F_b = \rho g V_n$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w C_d v^2 A \quad [II-25]$$

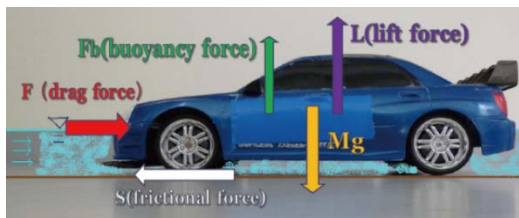


Figura II-60. Esquema de fuerzas sobre vehículo tipo sedán parcialmente sumergido. (Toda *et al.*, 2013)

Donde,

- $\mu$ : es el coeficiente de rozamiento estático
- $M_c$ : es el peso del coche
- $F_b$ : fuerza de flotación
- $F_L$ : fuerza de ascensión (no se consideró)
- $\rho_w$ : densidad del agua
- $g$ : aceleración de la gravedad

- $V_n$ : volumen neto del coche parcialmente sumergido
- $V_n = (1 - p)V$ , con  $p$ : porcentaje de espacio vacío del vehículo y  $V$  volumen parcialmente sumergido
- $C_d$ : coeficiente de arrastre
- $v$ : velocidad del flujo
- $A$ : área proyectada en la dirección del flujo

Se consideró el descenso de la flotación según el coche se iba llenando de agua, obteniéndose las relaciones  $V(y)$  a partir de mediciones. Se midieron los coeficientes de rozamiento estático de los modelos de coches y la fuerza de ascensión, para simplificar, no se tuvo en cuenta más allá de representarla en el sistema de fuerzas actuantes. Por último se obtuvieron relaciones experimentales del coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) en función del cociente entre el calado y la altura del vehículo ( $y/h_c$ ), y se compararon con las obtenidas por Oshikawa *et al.* (2011) (Figura II-61), los cuales consideraron el vehículo transversal al flujo, ofreciendo resultados muy diferentes a los del estudio de Toda *et al.* (2013).

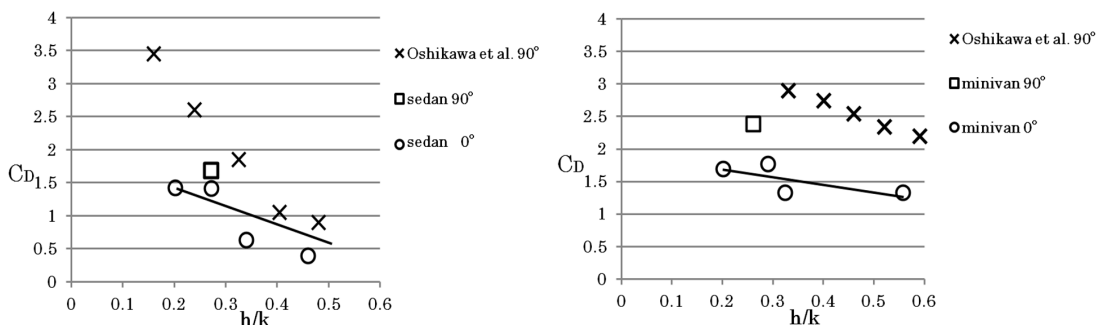


Figura II-61. Relaciones experimentales  $C_D=f(h/k)$ , siendo  $C_D$  el coeficiente de arrastre,  $h$  el calado y  $k$  la altura del vehículo. Sedan a la izquierda y minivan a la derecha. (Toda *et al.*, 2013)

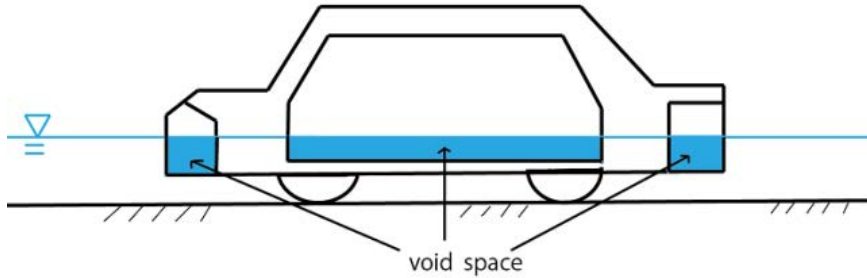


Figura II-62. Espacio vacío en un coche (Toda *et al.*, 2013)

Se representaron diagramas de condiciones críticas iniciales de flotación para vehículos reales en función de la relación  $v(y)$ , donde  $v$  es la velocidad e  $y$  es el calado, según se observa en la Figura II-63. Para la obtención de estas relaciones se tuvo en consideración el coeficiente de rozamiento estático ( $\mu$ ), el porcentaje de espacio vacío del vehículo ( $p$ ) y un peso adicional ( $M'$ ) de 100 kg que puede proporcionar el pasaje del vehículo.

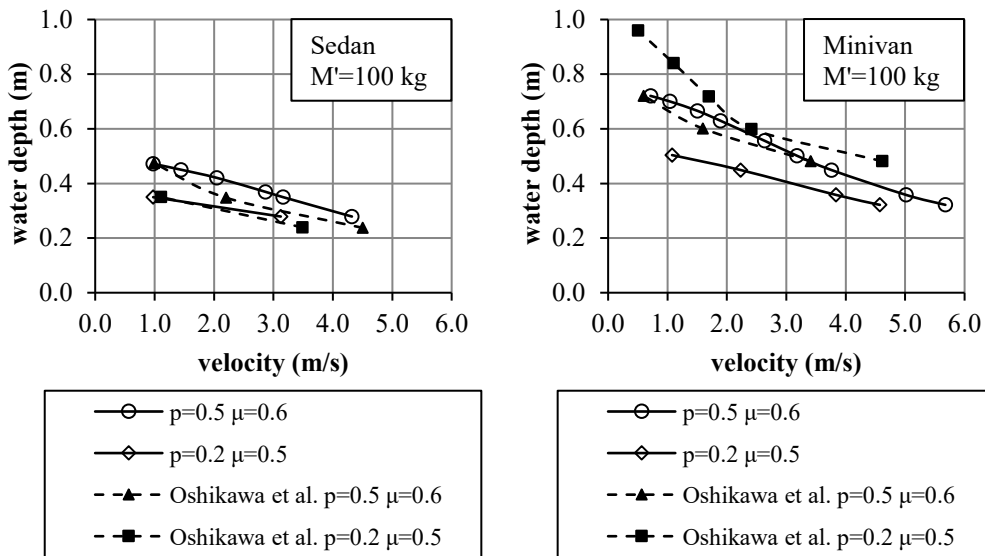


Figura II-63. Diagrama de condiciones de flotación. Vehículo tipo sedán con una sobrecarga  $M'=100$  kg a la izquierda, y tipo furgoneta con sobrecarga  $M'=100$  kg a la derecha. (Toda *et al.*, 2013)

Aunque los autores afirman que el porcentaje de espacio vacío del vehículo ( $p$ ) es función del calado, en la práctica lo asumieron constante por simplicidad. Además en las gráficas se representaron los resultados de Oshikawa *et al.* (2011) que presentaban la diferencia sustancial de que el vehículo estaba colocado en dirección transversal a la dirección del flujo.

Estas gráficas indican que sobre la línea que une los puntos, el vehículo en cuestión probablemente flotará y por tanto esa línea define el límite de la zona segura de la no segura.



#### II.4.1.10. Kramer *et al.* (2016)

En el marco del proyecto de investigación EvaSim (Evacuation Simulation), con el propósito de desarrollar planes de evacuación efectivos, Kramer *et al.* (2016) llevaron a cabo ensayos experimentales para determinar criterios de seguridad en cuanto a la transitabilidad de vehículos en calles inundadas. Puesto que estos estudios consideran vehículos en circulación, distinguen inicialmente dos aspectos: la estabilidad de los vehículos y la aptitud para la circulación. EL primer concepto es el estudiado en el presente trabajo, por el que un coche permanece en su posición sin flotar y sin ser arrastrado por un flujo de agua. El segundo hace referencia a la posible entrada de agua en el motor o en los aparatos eléctricos de los vehículos, que no desestabilizan al vehículo pero puede producir la irrupción de la circulación de un vehículo que circula por una calle inundada. Por lo tanto, los autores pretenden garantizar ambos conceptos cuando proponen sus umbrales de seguridad. Afirman que en muchos casos en las fichas técnicas de los vehículos se presenta el característica “fording o wading depth”, que sería el calado máximo de agua que puede haber alrededor del vehículo sin que ésta se introduzca en el motor. Estos calados máximos, para turismos suelen estar comprendidos entre 30 y 50 cm, y para vehículos de emergencias se comprenden entre 60 y 120 cm. Parece claro, por tanto, que tales calados exceden los calados límite de estabilidad de un vehículo siendo así necesario determinar los criterios de seguridad para la circulación de vehículos en base a su estabilidad y no a la entrada de agua en el motor.

Los experimentos llevados a cabo por Kramer *et al.* (2016) se basaron en dos tipologías de vehículos: turismos y vehículos de emergencias. Para ello realizaron ensayos en un canal con pendiente variable de 20 m de longitud, 1 m de ancho y 60 cm de alto. Estas investigaciones se realizaron en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Stuttgart (Alemania), de manera que los modelos de vehículos considerados fueron el Volkswagen Golf III (e: 1/9.8), como tipo turismo, y el LF 10/6 (e: 1/13.1), como tipo vehículo de emergencias, afirmando los autores que éstos eran los más representativos del país (Figura II-64). El primero fue construido de polvo sintetizado mediante laser y el segundo se construyó con la forma del cuerpo de Ahmed (1984) y las dimensiones del LF 10/6.



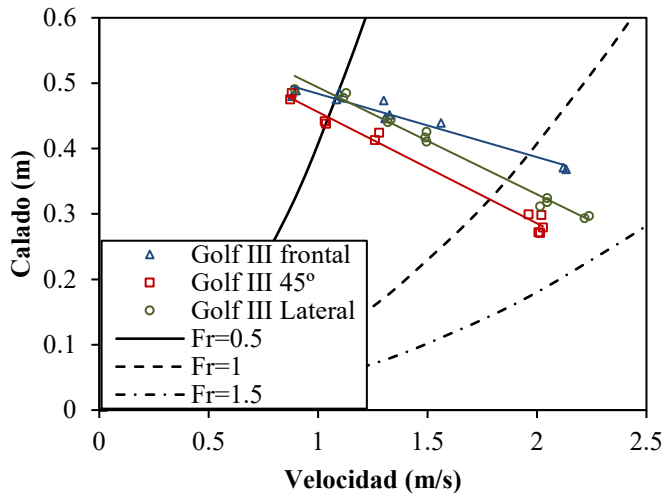
**Figura II-64.** Vehículos ensayados por Kramer *et al.* (2016). Volkswagen Golf III (arriba) y vehículo de emergencias LF 10/6. Prototipos a la izquierda y modelo a la derecha

Para garantizar la semejanza Froude, los autores ajustaron los pesos hasta que la relación de densidades entre el modelo y su prototipo fuera de 1. Se aseguró la estanqueidad de los modelos ensayados, afirmando que hoy en día los vehículos modernos presentan mejoras que los hacen más estancos. Se determinaron los coeficientes de rozamiento para ambos modelos mediante ensayos previos, en los que colocaron el modelo en un tubo de acero con agua y ejerciendo una fuerza horizontal hasta que se producía el movimiento. La relación de la fuerza ejercida con respecto a la fuerza gravitatoria de cada coche resultó en un valor de coeficiente de rozamiento de 0.3 para ambos modelos. Las características de los modelos, así como de sus prototipos se recogen en la Tabla II–22.

**Tabla II–22** Características de los modelos ensayados por kramer *et al.* (2016) y de sus prototipos

Vehículo	Escala	Long. [mm]	Ancho [mm]	Alto [mm]	Peso en Vacío	Calado Flotación $h_b$ [m]	Coef. Roz. $\mu$
VW Golf III	1:1	4,020	1,410	1,710	1,380 kg	0.59	-
	1:9.8	410	140	170	1.47 kg	0.45	0.3
LF 10/6	1:1	6,830	2,540	1,880	4,784 kg	-	-
	1:13.1	520	190	140	2,13 kg	0.73	0.3

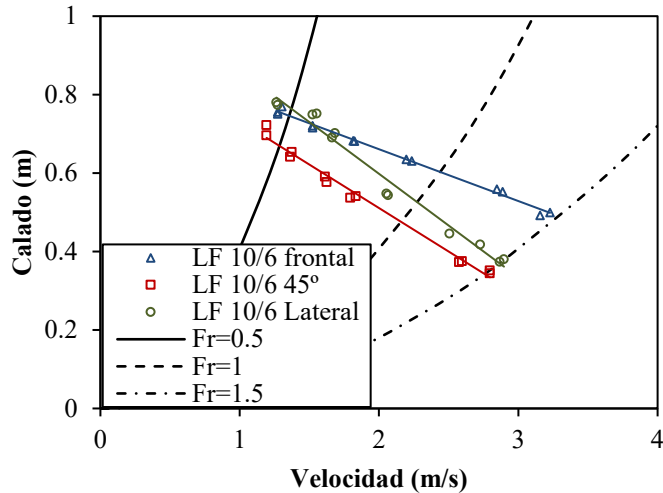
Los modelos fueron ensayados según tres orientaciones con el flujo: 0° (enfrentado al flujo), 45° y 90° (lateral). Los autores afirmaron que la inclinación del canal era tan pequeña que la componente del peso del vehículo que favorecía su inestabilidad era despreciable. En la Figura II-65 y Figura II-66 se presenta la representación de los puntos de inestabilidad para el modelo Golf III y LF 10/6 respectivamente.



**Figura II-65.** Resultados de puntos de inestabilidad del modelo Golf III para tres orientaciones con respecto al flujo: 0°, 45° y 90°. (Kramer *et al.*, 2016)

El vehículo se colocaba en una cierta posición del canal y para cambiar las condiciones hidráulicas que incidían sobre él se aumentaba el caudal de circulación y se variaba la pendiente

del canal hasta  $0.3^\circ$ . Más allá de considerar este último aspecto relevante o no, el hecho de considerar poca pendiente al canal supuso no alcanzar velocidades elevadas. El rango de velocidades (escaladas a prototipo) que generó inestabilidades fue de 0.87 hasta 3.23 m/s, y el de calados desde 0.27 hasta 0.75 m.



**Figura II-66.** Resultados de puntos de inestabilidad del modelo LF 10/6 (cuerpo Ahmed) para tres orientaciones con respecto al flujo:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ . (Kramer *et al.*, 2016)

Los autores afirmaron que, dados los resultados, la inestabilidad por flotación se producía para ambos modelos cuando el número de Froude era inferior a 0.5. En la Figura II-65 y Figura II-66 se observan también las funciones  $Fr=0.5$ ,  $Fr=1$  y  $Fr=1.5$ , de manera que puede identificarse en qué rango de números de Froude se encuentran los puntos de inestabilidad. Cabe comentar, sin embargo, que varios puntos de inestabilidad presentan valores de calado superiores al calado de flotación, lo cual no parece demasiado comprensible y los autores no explican nada al respecto. Parece lógico pensar que la inestabilidad de un vehículo expuesto a un flujo de agua con una cierta velocidad (existe fuerza de arrastre) se producirá para un calado igual o inferior al que produce su inestabilidad sin que el agua presente velocidad (no existe fuerza de arrastre). Se asumen dichos resultados a errores de medición en laboratorio.

Los resultados ofrecieron una inequívoca orientación preferente a la inestabilidad,  $45^\circ$ , produciéndose en todo caso la inestabilidad para menores calados y velocidades que para orientación paralela ( $0^\circ$ ) y perpendicular ( $90^\circ$ ) al flujo. Se trata por tanto de una nueva aportación en cuanto a la orientación menos estable para vehículos, cuando investigadores precedentes afirmaban que una orientación perpendicular al flujo era claramente la más inestable (Teo, 2010).

Por primera vez en este tipo de estudios, Kramer *et al.* (2016) llevaron a cabo ensayos con un vehículo real, modelo Volkswagen Golf III. EL objetivo de dicho estudio era evaluar el calado de flotación de un coche real y que no fuera estanco, así como fueron considerados los modelos a escala reducida estudiados. Al utilizar el mismo modelo a escala real que a escala reducida se compararon los calados de flotación, resultando en 45 cm para el modelo y 59 cm para el prototipo. Se trata de resultados coherentes puesto que en ensayo del prototipo se producía una

cierta entrada de agua, lo que aumentaba el peso del vehículo y por tanto se producía un mayor calado de flotación. Sin embargo, los autores no presentan detalles de las medidas de las alturas libres del modelo y del prototipo, de manera que si hubiera una diferencia significativa en este valor, también lo habría en el calado de flotación. Para poder hacer una comparativa entre ambos se debe garantizar que dicha medida sea equivalente al escalarse de modelo a prototipo.

Los autores evaluaron además la variación del calado de flotación según la velocidad de ascensión del agua. Para altas velocidades de ascensión del agua el calado de flotación disminuye considerablemente (Figura II-68). Los resultados indicaron que la consideración de un vehículo estanco al agua no se aleja de la realidad cuando se producen inundaciones repentinas en las que el tiempo de ascensión del calado de agua es muy bajo.



Figura II-67. Ensayo experimental para evaluar el calado de flotación de un vehículo real. (Kramer *et al.*, 2016)

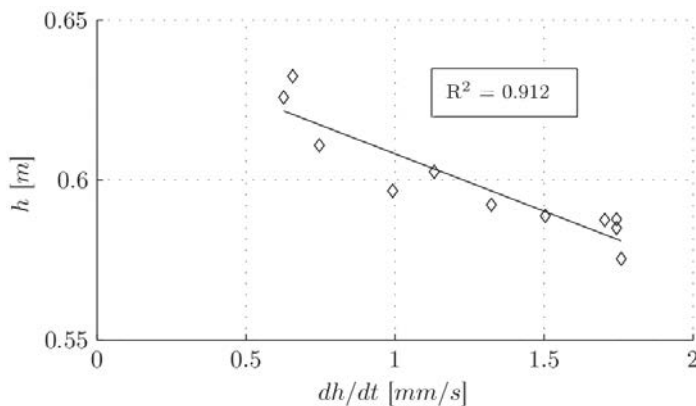
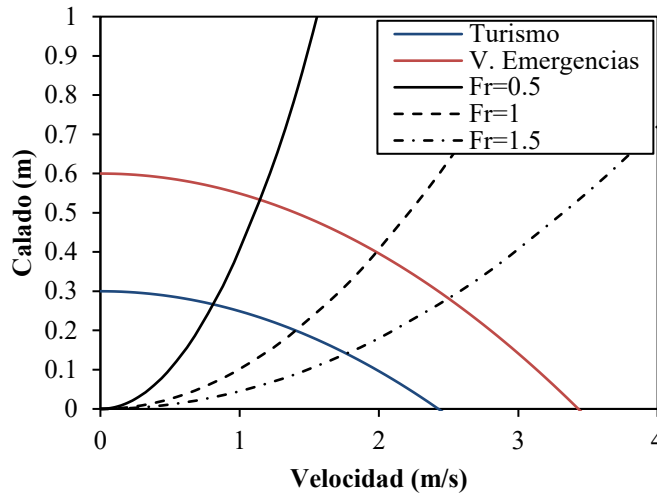


Figura II-68. Tendencia del calado de flotación según la velocidad de ascensión del agua para vehículo Volkswagen Golf III. (Kramer *et al.*, 2016)

Finalmente como criterio de seguridad para la estabilidad de los vehículos, los autores proponen un valor constante de la energía específica [II-26] ( $h_E$ ) de 0.3 m para turismos y de 0.6 para vehículos de emergencias.

$$h_E = y + \frac{v^2}{2g} \quad \text{[II-26]}$$

siendo  $y$  el calado de agua,  $v$  la velocidad del flujo y  $g$  la aceleración de la gravedad.



**Figura II-69.** Umbrales de estabilidad propuestos por Kramer *et al.* (2016) para un turismo ( $h_E=0.3$  m) y vehículo de emergencias ( $h_E=0.6$  m)

## II.4.2. Criterios propuestos en directrices o recomendaciones en Australia y Nueva Zelanda

### II.4.2.1. Criterios previos a la Guía Australian Rainfall & Runoff (2011)

En este apartado se presenta una breve revisión de diferentes criterios propuestos por directrices o recomendaciones, los cuales fueron analizados por Shand *et al.* (2011) en el Proyecto de revisión 10: “Un criterio apropiado para la seguridad de vehículos” de la Guía AR&R. La totalidad de los criterios recogidos en este apartado se basa en documentos desarrollados en Australia y/o Nueva Zelanda, siendo los únicos que presentan propuestas cuantitativas con base teórica y/o experimental.

La **Guía Australiana AR&R** del 1987 (Institution of Engineers Australia, 1987) estipulaba que “donde los vehículos aislados se vean afectados, es apropiado un mayor producto de calado por velocidad,  $0.6$  ó  $0.7$   $\text{m}^2/\text{s}$  dependiendo del tamaño”. Este hecho implica que para vehículos se aplica un mayor umbral ( $v \cdot y$ ) que para peatones, para los que la misma Guía recomendaba un producto de  $0.4$   $\text{m}^2/\text{s}$ .

Por otro lado, las relaciones de inestabilidad del vehículo de velocidad-calado que se presentan en el **NSW Floodplain Development Manual** (Department of Infrastructure Planning and Natural Resources. New South Wales Government, 2005; Department of Public Works, 1986) no indican relaciones calado-velocidad constantes, sino que se trata de una relación lineal con un calado máximo de  $0.3$  m y una velocidad máxima de  $2$  m/s para que los vehículos permanezcan

estables. El calado límite para la estabilidad de peatones se propone en 0.7 m, por lo tanto los límites propuestos para vehículos son más restrictivos que para peatones.

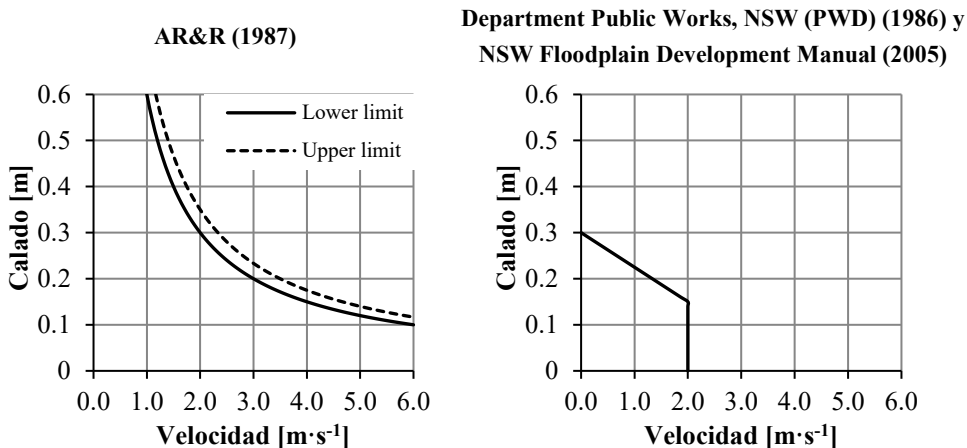


Figura II-70. Criterios propuestos por la Guía AR&R (1987) y por el Department Public Works, NSW (PWD) (1986) y NSW Floodplain Development Manual (2005)

El **Melbourne Water Land Development Manual** (1996) define los límites de seguridad según productos calado-velocidad constantes, determinándose cada uno en función del calado de agua. Estos resultados se basan en los estudios de Keller y Mitsch (Keller R.J. *et al.*, 1993).

La asociación de transporte por carreteras y agencias de tráfico de Australasia (región del suroeste de Oceanía comprendida por Australia, Melanesia y Nueva Zelanda) **Austrroads** Inc, en su guía para el diseño de carreteras (Parte 5: Diseño del drenaje) (Austrroads, 2008), manifiesta que “dependiendo de la velocidad del flujo y la envergadura del curso del agua, calados de agua hasta 300 mm se consideran transitables para coches con pasajeros”. Además, se sugiere el cierre de la carretera en caso que la energía total (termino de calado y cinético) en la carretera supere los 300 mm”.

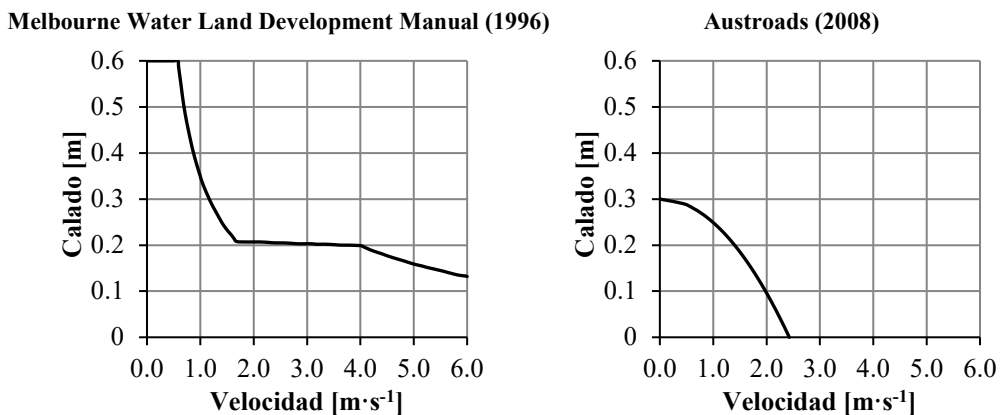
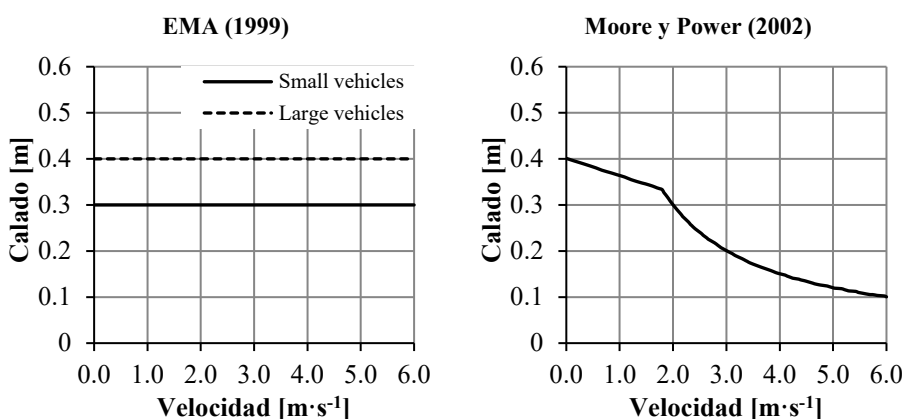


Figura II-71. Criterios propuestos por el Melbourne Water Land Development Manual (1996) y Austrroads (2008)

Otras recomendaciones se centran en definir límites de seguridad para trabajadores de los equipos de rescate, los cuales frecuentemente se encuentran en situaciones de peligrosidad. Es el caso de la **Emergency Management Australia (EMA)** (1997), agencia nacional del gobierno cuya función es la gestión de situaciones de desastres. La EMA ha publicado una serie de manuales para asistir a otras agencias y gobiernos locales para el planeamiento de situaciones de emergencias debidas a inundaciones. Referente a peligrosidad por inundaciones, la EMA aconseja que “pequeños vehículos de motor cruzando un curso de agua pueden llegar a sufrir inestabilidades cuando el calado de agua supera los 30 cm. La evacuación de vehículos altos y grandes, advierte también la EMA, será generalmente solo posible y seguro para calados de agua menores de 40 cm. Por último, referente a vehículos de rescate con tracción a las cuatro ruedas cruzando flujos de agua, la EMA afirma que “si el agua alcanza el parachoques o lo supera, se debe acelerar el vehículo hasta que se forme una ola frente al vehículo. Dicha ola se debe mantener a toda costa, para evitar que el agua entre en el motor”. Para calados de agua superiores a 75 cm, se sugiere equipar el vehículo para asegurar que el aire entre en el motor.

**Moore y Power** (2002) evaluaron resultados de investigaciones previas experimentales y numéricas, y presentaron un límite de estabilidad para vehículos que cambia en función de si las fuerzas que dominan el sistema son las de flotación (grandes calados y bajas velocidades) o las de arrastre (pequeños calados y altas velocidades). Este cambio se define en base a la transición de flujo rápido a lento, o cuando el número de Froude es la unidad. Un valor constante del producto calado-velocidad se asume para régimen rápido (el arrastre domina y se asume para velocidad superior a 1.81 m/s) y una relación lineal para régimen lento (la flotación domina y se asume para velocidad inferior a 1.81 m/s).

Estas directrices y recomendaciones no definen en ningún caso si los límites de estabilidad que proponen se refieren a vehículos estacionados o en movimiento. Aunque, teniendo en cuenta que la mayoría de estos criterios propuestos se basan en resultados previos experimentales para vehículos estacionados, se asume que tales criterios puedan ser aplicados únicamente en esa condición.

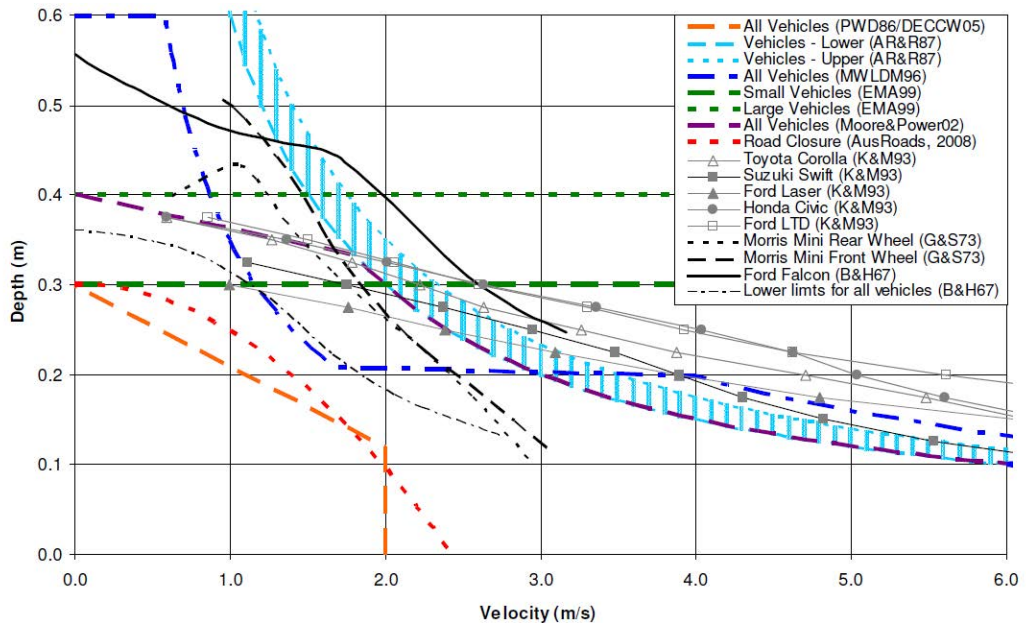


**Figura II-72.** Criterios propuestos por la la EMA (1999) y Moore y Power (2002)

Existen otras recomendaciones y directrices de otros países como Inglaterra, Japón, Canadá y Estados Unidos que ya fueron revisadas por Keller y Mitsch (1993), y que únicamente proponen límites no cuantitativos o arbitrarios sin ninguna base teórica o experimental.

### II.4.2.2. Criterio propuesto por la Guía Australian Rainfall & Runoff (2011)

La Guía Australian Rainfall & Runoff (AR&R), en su “Proyecto de revisión 10: Un criterio apropiado para la seguridad de vehículos” (Shand *et al.*, 2011) compara los resultados experimentales de Bonham y Hattersley (1967), Gordon y Stone (1973) y los analíticos de Keller y Mitsch (1993) con varias recomendaciones y directrices australianas descritas en el apartado anterior, según la gráfica que muestra la Figura II-73.



**Figura II-73.** Comparación de directrices y recomendaciones para el límite de la estabilidad de vehículos con resultados experimentales y numéricos

En general, con la excepción de los criterios del Public Works Department (1986)/ NSW Floodplain Development Manual (2005) y la AustRoads (2008), los criterios de las diferentes directrices y recomendaciones no son conservadores cuando se comparan con los resultados experimentales y analíticos. Su propuesta de un coeficiente de rozamiento de  $\mu = 0.3$  es probablemente conservadora, pero asumen que la actual falta de datos disponibles y un amplio rango de condiciones de superficies de carreteras y neumáticos hacen que no sea adecuado proponer un coeficiente más ajustado.

Un análisis de los diferentes modelos populares de vehículos en el tiempo (Toyota Corolla, Ford Falcon y Toyota Landcruiser) revela una tendencia en varios aspectos como en una mayor altura, longitud, ancho y peso, así como una menor altura libre sobre el suelo.

En base a los nuevos diseños de los coches modernos, la limitada naturaleza de los últimos trabajos experimentales y la falta de calibración de los mismos, nos lleva a pensar que es improbable que los últimos resultados sean directamente aplicables y del lado de la seguridad cuando se apliquen a vehículos modernos.

El criterio provisional de estabilidad propuesto asume un valor máximo de velocidad de 3 m/s. Este límite se propone para proporcionar un dato acorde con la estabilidad de las personas



presentado en esta propia Guía (Shand *et al.*, 2011) y definido anteriormente en los criterios de evaluación de la peligrosidad para personas ante inundaciones, de manera que se asegure, en caso de fallo del vehículo, que la seguridad no está comprometida una vez los pasajeros abandonen el coche.

En la Tabla II–23 se muestra el criterio de estabilidad provisional y los rangos aproximados de dimensiones para diferentes clases de vehículos (pequeños, grandes y todoterrenos). Bajo las relaciones del producto ( $v \cdot y$ ) elegido (Figura II-74B), el criterio de estabilidad propuesto permanece bajo el límite de peligrosidad baja para adultos (Según la propia AR&R (Cox *et al.*, 2010; Shand *et al.*, 2011)) para todas las condiciones de flujo y todas las clases de vehículos.

**Tabla II–23** Propuesta provisional para criterios de estabilidad de vehículos estacionados. Guía AR&R (Shand *et al.*, 2011)

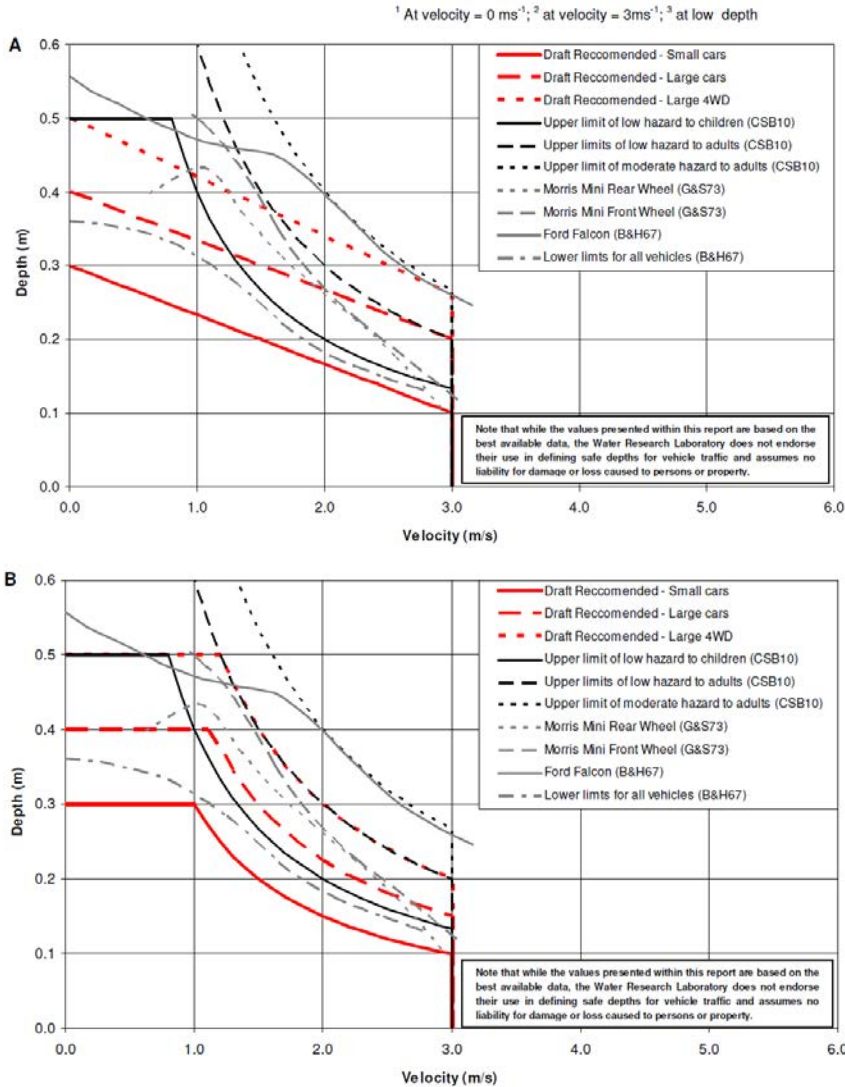
Tipo de vehículo	Longitud (m)	Peso en vacío (kg)	Altura libre (m)	Calado límite (m)	Velocidad mínima de influencia (m/s)	Velocidad máxima (m/s)	Ecuación de estabilidad
Pequeño	<4.3	<1250	<0.12	0.3	0.10	3.0	$(v \cdot y) \leq 0.30$
Grande	>4.3	>1250	>0.12	0.4	0.15	3.0	$(v \cdot y) \leq 0.45$
Todoterreno	>4.5	>2000	>0.22	0.5	0.20	3.0	$(v \cdot y) \leq 0.60$

Los límites superiores de calado proporcionados responden a los límites de flotación. El calado para vehículos pequeños, 0.3 m, se encuentra bajo el límite propuesto por Bonham y Hattersley (1967) y de acuerdo con la propuesta del Public Works Department (1986) y el AustRoads (2008). El calado para vehículos grandes de 0.4 m se encuentra dentro de los límites propuestos por Keller y Mitsch (1993). El calado de flotación para vehículos todoterreno de 0.5 m se encuentra entre los límites proporcionados por Bonham y Hattersley (1967) para el gran Ford Falcon.

En definitiva, la Guía AR&R (Shand *et al.*, 2011) asume que los datos de investigadores previos no son adecuados en cuanto a la valoración de:

- Coeficientes de rozamiento apropiados para usar en situaciones de inundación
- Flotación en vehículos modernos
- El efecto de la orientación del vehículo según la dirección del flujo
- Vehículos en movimiento a través del agua circulando
- Información para categorías adicionales incluyendo vehículos comerciales pequeños y grandes y vehículos de servicios de emergencia.

En cualquier caso, los criterios propuestos por la Guía AR&R (Shand *et al.*, 2011), según se indica en el documento, son provisionales mientras no se propongan otros criterios más contrastados.



**Figura II-74.** Criterios de estabilidad posibles (A) y propuestos (B) para vehículos estacionados en comparación con resultados experimentales y numéricos

### II.4.3. Resumen de los criterios de evaluación de la estabilidad de vehículos ante inundaciones

En este apartado se recoge, por un lado, la Tabla II–24, Tabla II–25 y Tabla II–26 con el resumen de los criterios de estabilidad de vehículos basados en estudios experimentales y teóricos, así como la representación gráfica de todos ellos (Figura II-75). Por otro lado, se recoge también el resumen de los criterios propuestos en las diferentes recomendaciones y normativas descritas en apartados anteriores (Tabla II–27) y sus representaciones gráficas (Figura II-76).

Tabla II-24 Resumen de los criterios de evaluación de peligrosidad para los vehículos (experimentales y teóricos) (1 de 3)

Referencia	Bonham y Hattersley (1967)	Gordon y Stone (1973)	Keller y Mitsch (1993)
Tipo de estudio	Experimental	Experimental	Teórico
Vehículos ensayados	* Ford Falcon * Resultados escalados a otros modelos	* Morris Mini Sedan	* Toyota Corolla * Suzuki Swift * Ford Laser * Honda Civic * Ford LTD
Época de los vehículos	Mediados hasta finales de los 60	Principios de los 70	Principios de los 90
Altura hasta chasis (m)	0.18	0.15	0.155; 0.17; 0.15; 0.10; 0.16
Escala	1:25	1:16	-
Orientación del vehículo	Perpendicular al flujo	Paralelo al flujo	Perpendicular al flujo
Rango de calados ensayados (m) (escalado a prototipo)	0.11 a 0.57	0.12 a 0.57	0.025 a 0.375
Rango de velocidades ensayadas (m/s) (escalado a prototipo)	0.48 a 3.09	0.5 a 3.69	0.6 a >3.5
Calado crítico de flotación (m) (escalado a prototipo)	0.57	0.42 (parte trasera) y 0.5 (parte delantera)	Entre 0.34 y 0.4 para diferentes modelos
Ecuación de estabilidad	$\frac{F_H}{\mu F_V} = 1$	$\frac{F_H}{\mu F_V} = 1$	$U_c = 2 \cdot \left( \frac{\mu F_V}{\rho_w C_d A} \right)^{1/2}$ Nota: $F_v$ y por lo tanto $U_c$ son evaluadas de forma independiente para el eje delantero y trasero
Coefficiente de rozamiento asumido	Diferentes, pero se recomienda el valor de 0.3	Varios	0.3

Tabla II-25 Resumen de los criterios de evaluación de peligrosidad para los vehículos (experimentales y teóricos) (2 de 3)

Referencia	Teo <i>et al.</i> (2010)	Xia <i>et al.</i> (2011)	Shu <i>et al.</i> (2011)
Tipo de estudio	Experimental	Teórico	Experimental y teórico
Vehículos ensayados	*MINI Cooper *BMW M5 *Mitsubishi Pajero	Valida sus fórmulas a partir de los experimentos de Teo (2010)	* Ford Focus * Ford transit * Volvo XC90
Epoca de los vehículos	Actuales	Actuales	Actuales
Altura hasta chasis (m)	0.149; 0.117; 0.225	0.149; 0.117; 0.225	0.101; 0.166; 0.218
Escala	1:43 y 1:18	-	1:18
Orientación del vehículo	Paralelo en primera instancia. Estudio del efecto de la orientación. Perpendicular en última instancia.	Paralelo a flujo	Paralelo al flujo
Rango de calados ensayados (m) (escalado a prototipo)	0.645 a 4.816	0.3 a 3.0	0.16 a 0.62
Rango de velocidades ensayadas (m/s) (escalado a prototipo)	2.37 a 7.94	4.0 a 0.5	0.18 a 6.24
Calado crítico de flotación (m) (escalado a prototipo)	No disponible	No disponible	No disponible
	$U_c = 2 \cdot \left( \frac{\mu F_V}{\rho_w C_d A} \right)^{1/2}$	$U_c = \alpha \times \left( \frac{y}{h_c} \right)^\beta \times \sqrt{2g \left( \frac{\rho_c - \rho_w}{\rho_w} \right) h_c}$	$U_c = \alpha \times \left( \frac{y}{h_c} \right)^\beta \times \sqrt{2g l_c \left( \frac{\rho_c}{\rho_w} \frac{h_c}{y} - \frac{h_c \rho_c}{h_b \rho_w} \right)}$
Ecuación de estabilidad	Nota: En este caso fija los dos ejes en los ensayos. El rozamiento se reparte en las 4 ruedas	Siendo, $\alpha, \beta$ : parámetros propios de cada vehículo $y, h_c$ : calado y altura del vehículo $\rho_c, \rho_w$ : densidad del vehículo y del agua $h_b$ : calado de flotación $l_c$ : longitud del vehículo	Siendo, $\alpha, \beta$ : parámetros propios de cada vehículo $y, h_c$ : calado y altura del vehículo $\rho_c, \rho_w$ : densidad del vehículo y del agua $h_b$ : calado de flotación $l_c$ : longitud del vehículo
Coefficiente de rozamiento asumido	-	-	0.39 (Transit); 0.5 (Focus) 0.68 (Volvo)

Tabla II-26 Resumen de los criterios de evaluación de peligrosidad para los vehículos (experimentales y teóricos) (3 de 3)

Referencia	Toda <i>et al.</i> (2013)	Xia <i>et al.</i> (2013)	Kramer <i>et al.</i> (2016)
<b>Tipo de estudio</b>	Experimental	Experimental y teórico	Experimental
<b>Vehículos ensayados</b>	* Tipo Sedan * Tipo Minivan	* Honda Accord * Audi Q7	*Volkswagen Golf III * LF 10/6
<b>Epoca de los vehículos</b>	Actuales	Actuales	Actuales
<b>Altura hasta chasis (m)</b>	-	0.155; 0.206	-
<b>Escala</b>	1:10 (Sedan) 1:18 (Minivan)	1:14	1:9.8 1:13.1
<b>Orientación del vehículo</b>	Paralelo al flujo	Paralelo y perpendicular	0°, 45° y 90°
<b>Rango de calados ensayados (m) (escalado a prototipo)</b>	0.28 a 0.72	0.11 a 0.65	0.27 a 0.75
<b>Rango de velocidades ensayadas (m/s) (escalado a prototipo)</b>	0.71 a 5.68	0.55 a 8.93	0.87 a 3.23
<b>Calado crítico de flotación (m) (escalado a prototipo)</b>	Según diferentes casos	0.45 (Honda) 0.67 (Audi)	0.45 (Golf modelo) 0.59 (Golf prototipo) 0.73 (LF 10/6)
<b>Ecuación de estabilidad</b>	$\frac{F_b}{\mu(M_c g - F_b - F_L)} = 1$ Siendo, F <sub>b</sub> : fuerza de arrastre del agua M <sub>c</sub> : peso del vehículo F <sub>b</sub> : fuerza de flotación F <sub>L</sub> : fuerza de ascensión	$U_c(\text{paralelo}) = \alpha \times \left(\frac{y}{h_c}\right)^\beta \times \sqrt{2g l_c \left(\frac{\rho_c h_c}{\rho_w y} - \frac{h_c \rho_c}{h_b \rho_w}\right)}$ $U_c(\text{perpendicular}) = \alpha \times \left(\frac{y}{h_c}\right)^\beta \times \sqrt{2g b_c \left(\frac{\rho_c h_c}{\rho_w y} - \frac{h_c \rho_c}{h_b \rho_w}\right)}$ Siendo, α, β: parámetros propios de cada vehículo y, h <sub>c</sub> : calado y altura del vehículo ρ <sub>c</sub> , ρ <sub>w</sub> : densidad del vehículo y del fluido h <sub>b</sub> : calado de flotación l <sub>c</sub> , b <sub>c</sub> : longitud y ancho del vehículo	$\frac{\text{Turismos}}{v^2} = y + \frac{2g}{v^2}$ $0.30 = y + \frac{2g}{v^2}$ $\frac{\text{Vehículos de emergencias}}{v^2} = y + \frac{2g}{v^2}$ $0.60 = y + \frac{2g}{v^2}$ Siendo, y, v: calado y velocidad g: aceleración de la gravedad
<b>Coefficiente de rozamiento asumido</b>	0.26 (Sedan); 0.42 (Minivan)	0.25 (paralelo) 0.75 (perpendicular)	0.30

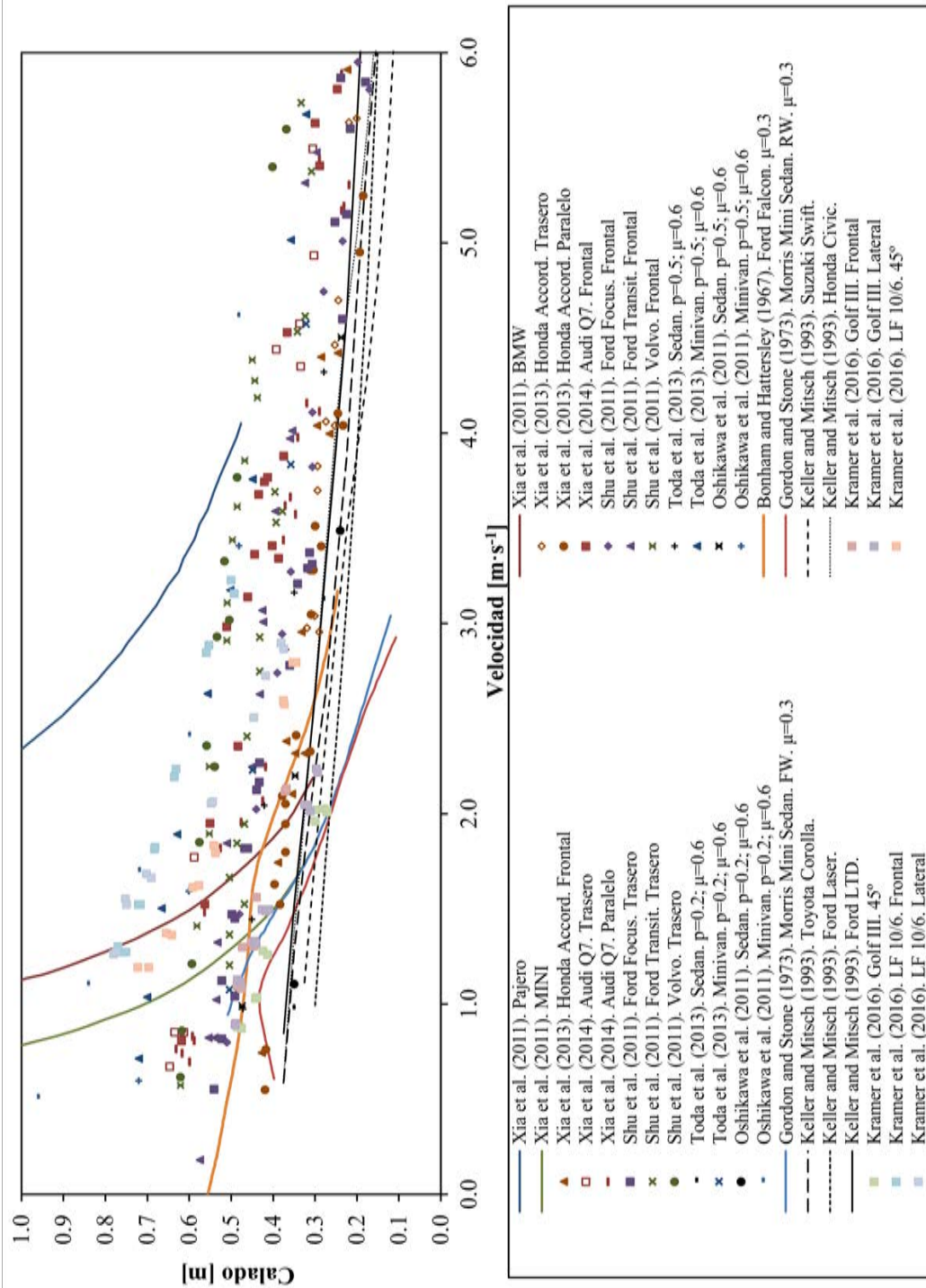


Figura II-75. Representación gráfica de los criterios de evaluación de peligrosidad para los vehículos (experimentales y teóricos)

Tabla II-27. Resumen de los criterios de evaluación de peligrosidad para los vehículos (directrices y recomendaciones)

Directriz/Recomendación	Año	Calado Máximo (y; m)	Velocidad Máxima (v; m/s)	Producto (v·y) (m <sup>2</sup> /s)	Otro
Department Public Works, NSW (PWD)	1986	0.3	2.0		$\frac{-11 \cdot v + 3.3}{v} < 1$
Australian Rainfall and Runoff (I.F. Austr)	1987	-	-	0.6-0.7 según el tamaño del vehículo	-
Melbourne Water Land Development Manual: Floodway Safety Criteria	1996	0.6	-	≤ 0.6 para $y_{av} \leq 0.1$ m; ≤ 0.80 para $y_{av} = 0.2$ m; ≤ 0.35 para $y_{av} \geq 0.3$ m	-
Emergency Management Manual (EMA)	1997	-	-	-	No detener el vehículo cuando el calado supere la altura del parachoques. Para calados >750mm equipar al vehículo para proteger el motor
Emergency Management Manual (EMA)	1999	0.3 (coches pequeños y ligeros) 0.4 (coches grandes)	-	-	-
Moore and Power	2002	-	-	-	$y \leq (0.4-0.0376v)$ para $[v \leq 1.81 \text{ m/s}]$ ; $v \cdot y \leq 0.6$ para $[v > 1.81 \text{ m/s}]$
Floodplain Development Manual (DIPNR)	2005	0.3	2.0	-	$\frac{-11 \cdot v + 3.3}{v} < 1$
Austrroads Guide to Road Design - Part 5: Drainage Design	2009	-	-	-	$y + \frac{v^2}{2g} \leq 0.3m$
Australian Rainfall & Runoff. Project 10: Appropriate Safety Criteria for Vehicles	2011	0.3 (coches pequeños) 0.4 (coches grandes) 0.5 (coches 4x4)	3.0	≤ 0.3 coches pequeños; ≤ 0.45 coches grandes; ≤ 0.6 coches 4x4	-

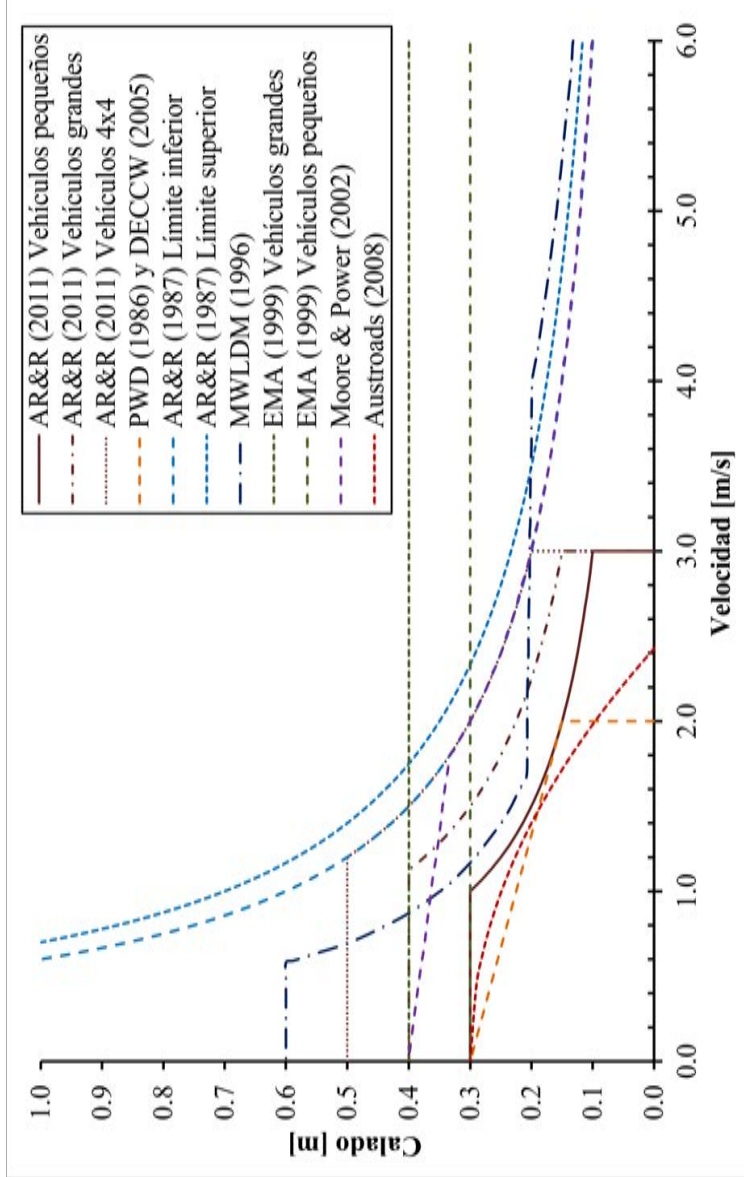


Figura II-76. Representación gráfica de los criterios de evaluación de peligrosidad para los vehículos (directrices y recomendaciones)



## II.5. Criterios de evaluación de daños directos ocasionados por inundaciones

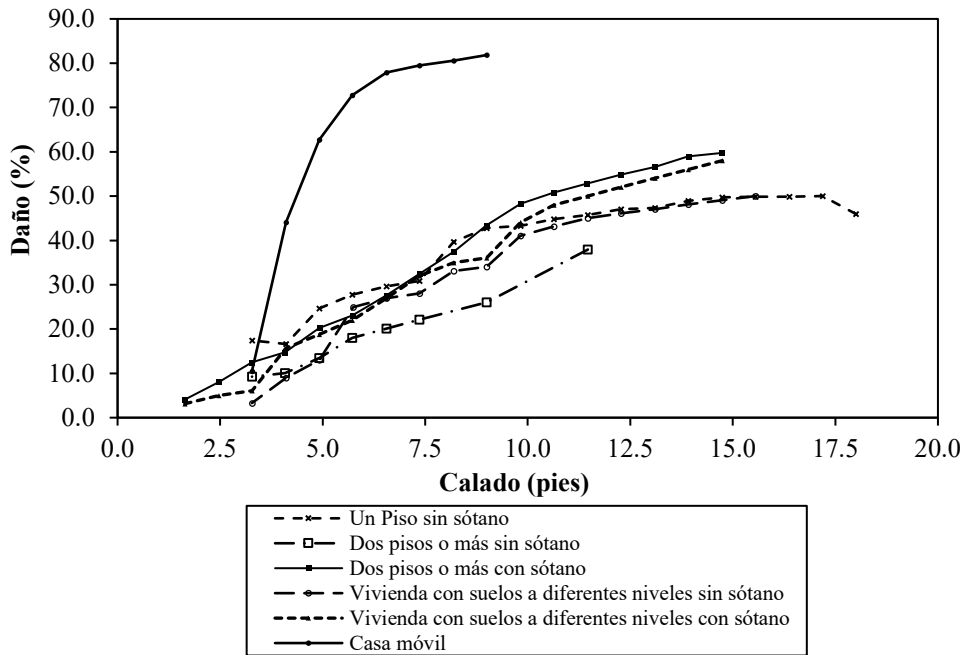
Otro tipo de afectaciones ante sucesos de inundación son aquellas que se dan sobre propiedades (viviendas y comercios principalmente). Se trata en este caso de la afectación más fácilmente estimable económicamente de entre las que se tratan en esta tesis, y según el estado de la cuestión estudiado a partir de referencias de diferentes países de todo el mundo desde años pasados hasta la actualidad, la herramienta básica propuesta por los diferentes autores son las curvas de daños, denominadas en ocasiones por algunos autores como curvas de vulnerabilidad.

El primer autor que trató el tema de daños a propiedades fue Gilbert F. White (1945) en su tesis doctoral “Human Adjustment to Floods: A Geographical Approach to the Flood Problem in the United States” en el año 1945. Entre otros aspectos definió con gran detalle los tipos de pérdidas que se daban cuando se producía una inundación, describiendo entre otros las pérdidas en viviendas y en comercios en zonas urbanas. Las pérdidas en zonas residenciales podían ser cimentaciones y estructura de la vivienda, garajes y otros edificios, así como coches y otros vehículos, daños al terreno y otro tipo de daños como la pérdida de la renta de la vivienda. Aunque sin definir daños directos e indirectos propiamente, ya incluía pérdidas que actualmente se recogen en ambos grupos.

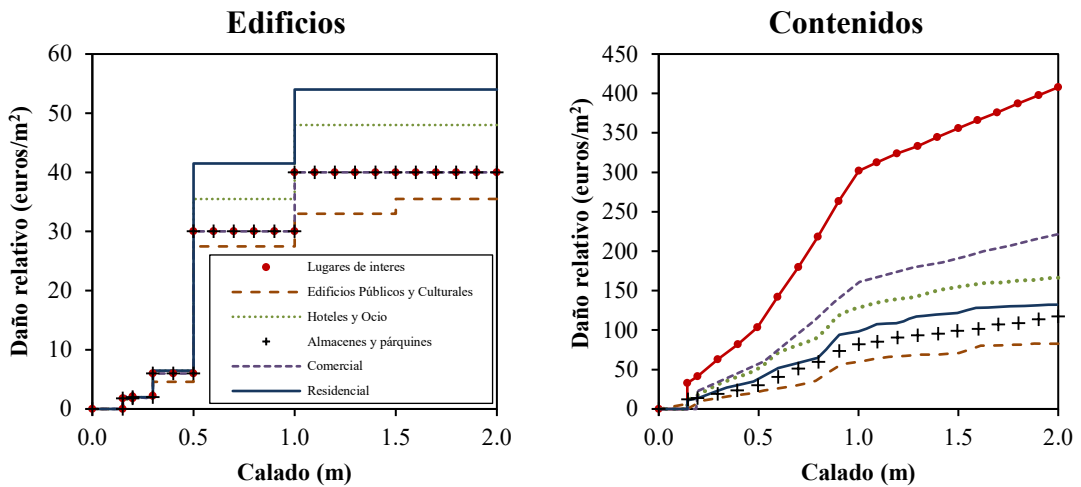
También afirmó que el calado y la velocidad del agua determinan el grado de severidad del daño a la cimentación y a la estructura de la vivienda. Encuestas llevadas a cabo determinaban ya que los daños a la estructura eran mucho menores que los debidos al contenido de las viviendas (muebles y efectos personales). Para viviendas de baja calidad tales pérdidas rondaban el 50% de las pérdidas y en viviendas de alta calidad éstas rondaban el 70% del total. El calado de agua es la condición más limitante para dichas pérdidas. Cuanto mayor es la velocidad, afirmaba White (1945), mayor es la peligrosidad ante el golpeo de objetos a las ventanas, pudiendo así romperlas y dejar salir otros elementos como pueden ser puertas por ejemplo, que terminaban siendo escombros arrastrados por el agua. Respecto a los daños a comercios, afirmó que los tres elementos más afectados son decoraciones, mobiliario y stocks de mercancías.

La toma de decisiones (medidas de resiliencia) en la gestión del riesgo de inundaciones en general y en particular en zona urbana, requiere del análisis coste-beneficio, ya que las medidas a tomar en las soluciones de drenaje irán de la mano del nivel de riesgo que un evento de lluvia pueda producir. Para ello, entre otros análisis intangibles, se llevan a cabo habitualmente estimaciones de los daños directos (valoración monetaria) que se puedan producir para diferentes escenarios de lluvias-inundaciones. Los daños directos a propiedades varían de acuerdo al tipo de propiedad, su valor, y el coste de restitución al estado inicial (Grigg *et al.*, 1975).

A partir de las tipologías de edificios y usos del suelo el grado de daño potencial a una estructura puede ser medido a través de las curvas de daños, las cuales pueden medir porcentajes de daños para diferentes niveles de intensidades del evento, según se muestra en la curva de daños ejemplo para un evento de inundación en la Figura II-77. También se pueden representar estas curvas mediante el daño en base a unidades monetarias relativas a una unidad de superficie afectada [ $\text{€}/\text{m}^2$ ] frente al calado, cuando el evento producido es una inundación, según se muestra en la curva de daños para un evento de inundación de la Figura II-78.



**Figura II-77.** Curvas FIA Credibility-Weighted Calado-Daños para edificios a partir de 12/31/1998. Incluidas en el Software HAZUS-MH (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2015)



**Figura II-78.** Curvas de daño sintéticas propuestas para estructuras de edificios (izquierda) y contenidos de los edificios (derecha) teniendo en cuenta las condiciones locales del barrio del Raval (Velasco *et al.*, 2016; Russo *et al.*, 2013)

Usando la tipología de edificios y las curvas de daños asociadas en combinación con los datos de peligrosidad y exposición, se puede elaborar un mapa de riesgo con mayor o menor detalle (escala de trabajo), y estimar las pérdidas económicas globales en la zona de estudio. En el caso de eventos de inundaciones se requieren las curvas de daños en función del calado para cada tipo de

suelo o edificio, el mapa de calados y el mapa de usos del suelo; tratándolos mediante herramientas SIG se representan espacialmente los daños a edificios y por tanto se detectan las zonas más vulnerables en la zona de estudio. La estimación del riesgo, en términos de daños, resulta importante en la toma de decisiones cuando se presenta la cantidad total del Daño Anual Esperado (DAE) considerando más de un evento de inundación (diferentes periodos de retorno), lo que permite construir curvas daño-probabilidad de ocurrencia para una zona o región. El DAE se calcula con la integración del área bajo la curva (Figura II-79) que se forma al graficar la probabilidad de ocurrencia del daño respecto de la cantidad económica de daños, mediante la expresión [II-27] (Meyer *et al.*, 2011).

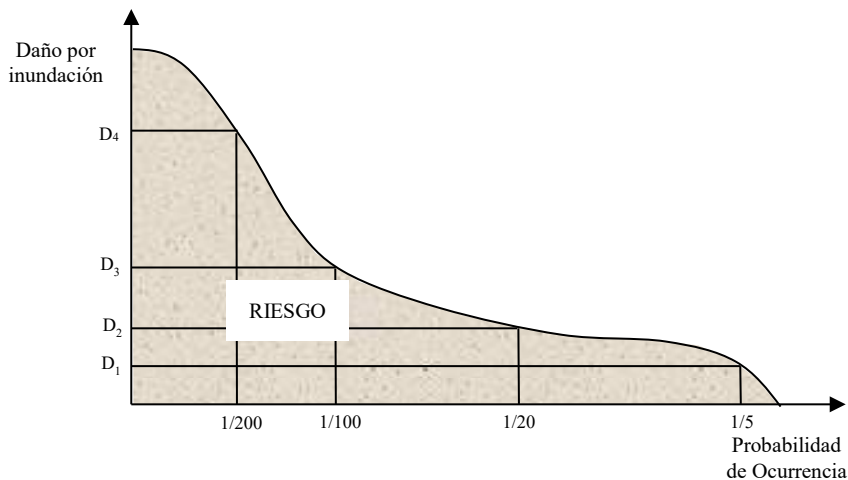


Figura II-79. Curva descriptiva del riesgo de inundación (Meyer *et al.*, 2009)

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^k D[i] \times \Delta P_i \qquad \bar{D} = \text{Daño Anual Esperado} \qquad \text{[II-27]}$$

Donde,

$$D[i] = \frac{D(P_{i-1}) + D(P_i)}{2} \qquad D[i] = \text{media del año de dos eventos de daño } D(P_{i-1}) \text{ y } D(P)$$

$$\Delta P_i = |P_i - P_{i-1}| \qquad \Delta P_i = \text{intervalo de probabilidad entre las probabilidades de excedencia de ambos eventos}$$

La estimación del DAE consiste, entonces, en calcular el daño promedio de dos eventos de probabilidad de excedencia *i*, con un intervalo ( $\Delta P_i$ ) de probabilidad entre las probabilidades de excedencia de ambos eventos. La estimación del DAE se realiza para los periodos de retorno en que se tenga información de calados.

Cabe comentar, sin embargo, que la generalización de curvas de daños presenta una gran incertidumbre, puesto que en realidad el daño ocasionado sobre una propiedad depende de otros factores o variables que pueden llegar a ser muy importantes. En realidad, son muchos tales factores que afectan a los daños entre los que se incluyen el calado de inundación, la época del año de la inundación, la velocidad del flujo de agua, la duración de la inundación, los sedimentos en suspensión y el tiempo de alerta. En los estudios de McBean (1988) se proponen ajustes de las

clásicas curvas de daños para edificios, a partir de otras variables que también puedan afectar a los daños. En su estudio se llevaron a cabo encuestas en casas emplazadas en zonas inundables en Ontario (Canadá). Como conclusiones se descubrió que los daños se incrementarían un 6% para inundaciones de larga duración (superiores a 24 horas). Al producirse una destrucción total debida al hielo o altas velocidades, los contenidos se valoraban en el 66% de los daños totales a 2.4 metros de altura. La destrucción total también incluía la pérdida del valor de la estructura, considerada como el valor de la propiedad menos el valor del terreno o parcela. Otras variables estudiadas como el área en planta, previa exposición a inundaciones, ganancias de la familia, etc, no explicaban ningún porcentaje significativo de los daños potenciales con la suficiente confianza como para ser contemplados en las diferentes categorías de casas consideradas.

Existen dos metodologías generales para la obtención de las curvas de daños. En primer lugar, se pueden obtener curvas empíricas que se basan en datos históricos para desarrollar la relación entre las características de la inundación y el daño. Por otro lado, está el enfoque sintético cuyo significado difiere ligeramente dependiendo del autor. Por un lado, Merz *et al.* (2010) describen este enfoque como el desarrollo de escenarios “Y si...”. Por otro lado, Edmund Penning-Rowsell *et al.* (2005) afirman que un enfoque sintético no indica artificialidad, sino que recoge la síntesis de todos los datos, incluyendo los históricos. Merz *et al.* (2010) argumentan que el enfoque sintético y el empírico pueden ser combinados, mientras que Penning-Rowsell *et al.* (2005) verían esto como un enfoque sintético, siendo ambos excluyentes mutuamente. Si tales datos empíricos existen, deberían ser usados, incluso conjuntamente con un enfoque sintético. Tales datos de daños pueden ser recogidos de agencias oficiales o de compañías de seguros (Hammond *et al.*, 2014).

Las curvas de daños se suelen representar de forma separada, ofreciendo por un lado el daño estructural y por otro el contenido. Los daños estructurales se refieren al propio edificio y a los componentes de éste que no se llevan cuando se realiza una mudanza, como puede ser la caldera, la moqueta, etc. En cambio los daños a contenidos (bienes muebles) se dan a aquellos contenidos que se trasladan cuando una persona se muda del piso en cuestión (McBean *et al.*, 1988).

Algunos de los criterios encontrados en la literatura, referente a curvas de daños a edificios, se presentan en Australia, a partir de Directrices del Gobierno de Queensland (Emergency Management Australia *et al.*, 2002), en Estados Unidos a partir de Directrices propuestas por la Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2015), en España (Valencia) con el criterio propuesto para el Proyecto CRUE (Francés *et al.*, 2008) y en otras ocasiones aplicaciones a casos concretos como el propuesto por el Instituto de Investigación en protección Geo-Hidrológica de Turín (Italia) ante eventos de inundación producidos por el río Boesio (Luino *et al.*, 2009); también en el Reino Unido con el criterio propuesto en el Multi-Coloured Manual (Penning-Rowsell *et al.*, 2005) y por último como propuesta más actual la aplicación en el Proyecto Europeo CORFU (Velasco *et al.*, 2013; Russo *et al.*, 2013) para el Distrito del Raval (Barcelona) ante eventos de inundación urbana producidos por escorrentía de lluvia. Se trata de referencias que tratan las curvas de daños ante situaciones diversas, desde el punto de vista de inundaciones de ríos, con calados elevados, y desde la perspectiva de inundaciones producidas por eventos de lluvia con calados inferiores y velocidades más elevadas.

Por otro lado, en las ciudades se encuentra una gran diversidad de vehículos, siendo los coches los que más predominan. Ante un evento de inundación éstos pueden ser arrastrados, volcados o llegar a flotar y desplazarse con el flujo de agua. La inestabilidad de éstos ha sido estudiada por

diferentes autores tal y como se describe en detalle en el apartado anterior, y esta tesis centra una buena parte de investigación en el estudio de la estabilidad de éstos (Capítulo IV). Sin embargo, los vehículos aunque no lleguen al límite de estabilidad van a recibir el impacto de la inundación traduciéndose en costes económicos que pueden ser nada despreciables. En este sentido se pueden presentar curvas de daños asociadas a coches, con el mismo criterio que se sigue para edificios, de manera que se asocie un coste de daños al vehículo en función del calado que le inunda. Este enfoque se encuentra en la bibliografía aunque se trata de una investigación menos madura que las curvas de daños para edificios y ha sido llevada a cabo por un escaso número de autores. Algunas entidades estadounidenses como la National Auto Auction Association (NAAA) llevan a cabo estudios para detectar cuándo un vehículo que se pone a la venta realmente fue dañado por una inundación (Figura II-80).



**Figura II-80.** Indicadores de que un vehículo ha sido dañado por una inundación. Fuente: National Auto Auction Association

En este apartado se profundiza en las diferentes curvas de daños para vehículos, que se han encontrado en la literatura. Los planteamientos que en adelante se describen son el propuesto en el modelo HAZUS-MH desarrollado por la Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2015) de los Estados Unidos, el criterio propuesto en el proyecto CRUE (Francés *et al.*, 2008), y el propuesto por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE) (2009).

### *II.5.1. Curvas de daños para vehículos*

#### **II.5.1.1. Criterio propuesto por Federal Emergency Management Agency (FEMA) en el proyecto HAZUS-MH (EEUU) (2003)**

La Agencia Federal de Gestión de Emergencias (FEMA) de Estados Unidos desarrolló en el año 2003 el proyecto HAZUS-MH (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2015), cuyo nombre proviene de “Hazard United States-Multiple Hazards”, en el que se combinan las ciencias, ingeniería y matemáticas con la tecnología de Sistemas de Información Geográfica, para poder estimar pérdidas en vidas y propiedades representándolos en un mapa. HAZUS-MH (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2015) estima el impacto físico, social y económico que puede sufrir una comunidad por un terremoto, inundación o huracán. El objetivo del desarrollo de esta herramienta (software y metodología) es ayudar a prepararse para mitigar, responder y recuperarse del efecto de un evento peligroso como un huracán, inundaciones y terremotos. En concreto la parte del proyecto destinada a inundaciones es capaz de valorar los daños producidos por inundaciones de ríos o costeras. Estima daños potenciales causados a edificios, facilidades esenciales, vías y áreas de agricultura, tuinas, refugios y víctimas. Las pérdidas directas serán estimadas basadas en daño físico a la estructura, contenido e interior de los edificios.

Pero el programa HAZUS-HM también ofrece la posibilidad de estimar el daño ocasionado a los vehículos por una inundación (Scawthorn *et al.*, 2006; Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2015). El procedimiento para llevar a cabo dicha evaluación del daño lo divide en 4 partes:

1. Cálculo del inventariado de vehículos en la zona de análisis
2. Localización de los vehículos según hora del día en diferentes posiciones
3. Estimación del valor de los vehículos, y
4. Aplicación de una curva de daños según tipo de vehículo

El sistema propuesto de estimación de la localización de los vehículos pretende obtener el número de vehículos según tipo de parking, edad del vehículo, tipo del vehículo y hora del día.

Además, el programa asocia una ratio de vehículos aparcados por metro cuadrado de categorías de edificios (11 tipos residenciales, 10 comerciales y 6 industriales). En el propio manual (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2015) se pueden encontrar varios ejemplos ilustrativos del proceso de asignación de vehículo a alguna categoría de edificio. De esta manera se determina el número de vehículo potencialmente en riesgo, repartiendo dicha cifra en diferentes tipos de aparcamientos disponibles en la zona de estudio (en la calle, garajes descubiertos o subterráneos...). Por otro lado los vehículos fueron clasificados en tres tipologías: coche, camión pequeño y camión grande. La distribución de la edad de los vehículos y del porcentaje de camiones frente a coches fue realizada por la National Automobile Dealers (NADA).

Tabla II–28 Distribución de vehículos por tipología y antigüedad

Edad	Coches	Camiones pequeños	Camiones grandes	Total
0-2	8.438%	4.631%	0.459%	13.53%
3-6	17.500%	6.703%	1.969%	26.17%
7-10	15.625%	5.241%	0.919%	21.78%
10+	20.938%	7.800%	9.778%	38.52%
Suma	62.500%	24.375%	13.125%	100%

Se proponen precios para estas tres tipologías de vehículos: 22618.47\$ (coches), 20969.21\$ (camiones pequeños) y 76087.67\$ (camiones grandes), resultados de promediar los diferentes valores obtenidos tras consultar a diferentes concesionarios y páginas web. El coste de un vehículo usado se asume que es el 50% del nuevo. Para calcular el valor total de los vehículos en la zona de estudio, el número total de vehículos se multiplicará por el porcentaje de coche/camión pequeño/camión grande, porcentaje de vehículos nuevos/usados y el valor promedio de los vehículos que encajan en ambas categorías. El usuario tiene la opción de estimar los daños sobre los vehículos según los valores por defecto incluidos en el programa, o considerar información local de la flota de vehículos, localización, concesionarios, y otra información disponible para los planificadores.

Las curvas de daño implementadas para la estimación de daños a los vehículos se desarrollaron considerando un daño gradual al vehículo ocasionado por la inundación. Es decir, mientras que para 30 a 60 cm (1 ó 2 pies) de calado es poco probable que se produzcan daños al vehículo, se producirá una pérdida total cuando el compartimento del motor se encuentre completamente sumergido quedando así totalmente dañado los componentes electrónicos y el sistema eléctrico. Se considera además que un sistema temprano de aviso puede evitar completamente el daño del vehículo puesto que puede ser desplazado a una zona que no se vea afectada por la inundación. El desarrollo de las curvas de daños para cada tipo de vehículo fue llevado a cabo con el soporte de un experto en el campo.

La construcción de las curvas de daños se basó en la delimitación de tres niveles de calados: por debajo de las alfombrillas, entre las alfombrillas y el salpicadero y sobre el salpicadero (Tabla II–29). Las curvas de daños completas para las tres tipologías de vehículos implementadas en el programa se muestran en la Figura II-81.

Tabla II–29 Daños al vehículo según niveles de calados. Dimensiones en pies

Nivel de inundación o calado	Coche	Camión pequeño	Camión grande	% Daño
Por debajo de las alfombrillas	<1.5	<2.7	<5	15
Entre las alfombrillas y el salpicadero	1.5-2.4	2.7-3.7	5-7.5	60
Sobre el salpicadero	>2.4	>3.7	>7.5	100

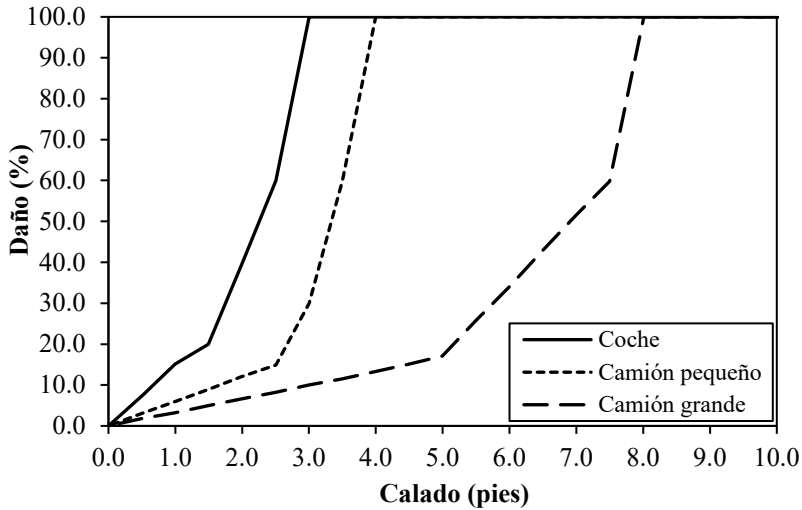


Figura II-81. Curvas de daños para vehículos implementadas en el proyecto HAZUS-MH

### II.5.1.2. Criterio propuesto para el Proyecto CRUE. Effectiveness and Efficiency of Non-structural Flood Risk Management Measures (Valencia, España) (2008)

ERA-Net CRUE (Francés *et al.*, 2008) es una red de departamentos de gobiernos europeos que financian directamente programas de gestión de riesgos de inundación y acciones de investigación relacionadas. Los problemas de gestión del riesgo de inundación transfronterizos cada vez son más importantes, siendo necesaria la suma de investigaciones e iniciativas en este aspecto. La creación e implementación de un área de investigación europea en gestión de riesgo de inundación, como pretende la CRUE ERA-Net, es una contribución muy importante en la investigación relacionada con las inundaciones desde una perspectiva transfronteriza en Europa.

El tema “Risk Assessment and Risk Management: Effectiveness and Efficiency of Non-structural Flood Risk Management Measures” se seleccionó por seis de los países socios de la CRUE mediante un proceso intensivo de consulta. El anuncio fue designado para investigar y evaluar de forma crítica la eficacia y eficiencia de medidas no estructurales en comparación con aquellas estructurales e identificar las barreras de implementación de las llamadas técnicas suaves. El anuncio fue un incentivo para el desarrollo de enfoques metodológicos innovadores. Además, desafiaba a los investigadores por toda Europa para integrar el conocimiento de diferentes disciplinas tales como ciencias naturales y sociales e ingeniería.

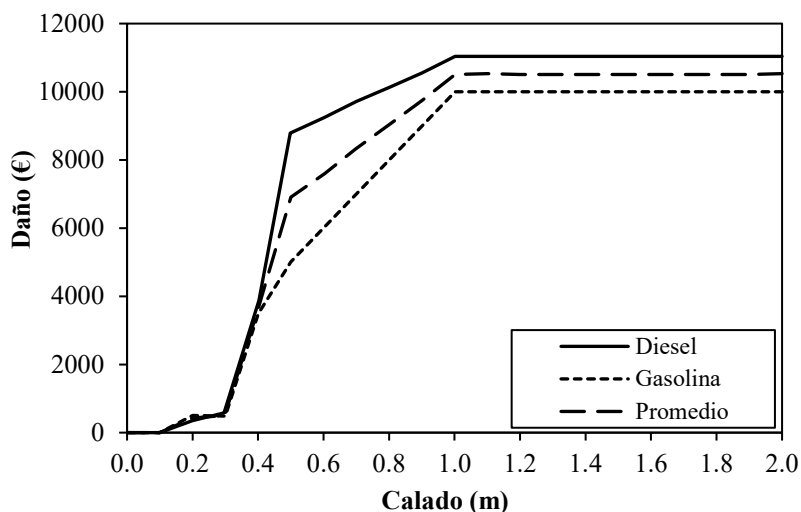
Cada uno de los siete proyectos exitosos de la primera iniciativa de financiación de la CRUE para investigación en gestión del riesgo de inundaciones, se diseñó para entender diferentes enfoques nacionales para el uso y evaluación de medidas no estructurales, explorar aquello que funcionaba correctamente, y qué se puede mejorar en términos de eficiencia y eficacia de tales medidas. Los resultados de la investigación presentados en el informe pretendían proporcionar a los responsables de proponer políticas un mejor entendimiento de cómo la gestión del riesgo de inundación, como parte de la gestión integrada de cuencas, puede proporcionar múltiples beneficios, por ejemplo reducción del riesgo de inundación y mejora de la calidad medioambiental.



Uno de los capítulos del estudio se centra en el análisis del riesgo en la cuenca de la Rambla del Poyo, desarrollando en primer lugar los mapas de peligrosidad, en segundo lugar, estudiando la vulnerabilidad en la zona de inundación y finalmente estimando el riesgo. En la segunda fase (análisis de la vulnerabilidad) se pretende evaluar los daños a bienes muebles (en construcciones residenciales y elementos en áreas públicas) y a edificios (construcciones residenciales). También se estiman daños para mobiliario y estructura para usos industriales, comerciales y de almacenamiento. El propósito final es obtener la curva de vulnerabilidad (terminología usada en el propio informe) asociada a cada uso. La curva refleja el daño en Euros para cada tipo de uso afectado por el nivel de agua.

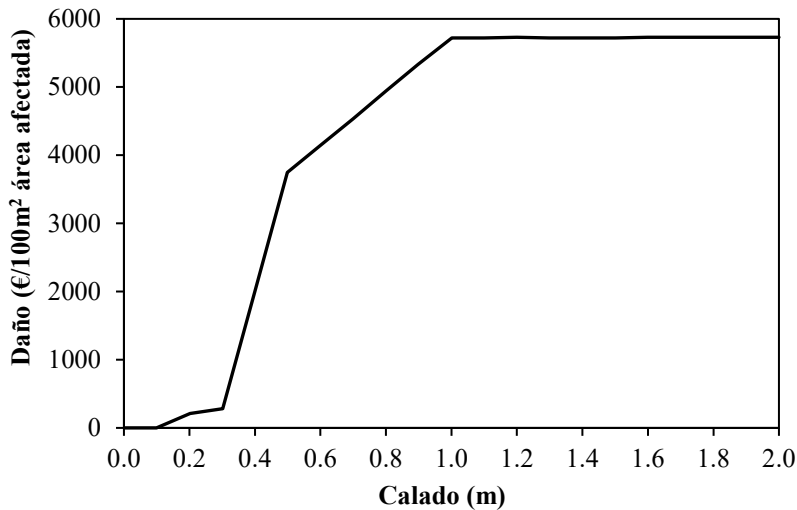
La Rambla del Poyo cubre el área Este de Valencia. Principalmente afecta los municipios de Chiva, Cheste, Loriguilla, Quart de Poblet, Torrent, Picanya, Paiporta y Catarroja. Los municipios analizados para obtener la curva de vulnerabilidad son los siguientes: Alaquás, Aldaia, Alfafar, Catarroja, Massanassa, Mislata, Paiporta, Picanya, Quart de Poblet, Riba-roja del Túria, Torrente, Valencia y Xirrivella.

De la misma forma que se propusieron curvas de daños para diferentes tipologías de edificios, se presentan también curvas de daños para vehículos centrándose en únicamente dos tipologías: diésel o gasolina. En la Figura II-82 se muestran las curvas de daños obtenidas, para vehículos tipo diésel, gasolina y la curva promedio de ambos. La escala de análisis en este caso de estudio para calcular el riesgo de inundación considera el número de coches por metro cuadrado de calle afectada. Tras un análisis de número de coches por área urbanizada se obtuvo un valor de 3.1379.



**Figura II-82.** Curvas de daños para las dos clases de vehículos considerados en el proyecto CRUE

Considerando el reparto de coches por metro cuadrado se obtuvo un valor de 0.5446 coches/m<sup>2</sup> de área afectada, que dio lugar a la Figura II-83 en la que se representa una curva de daño promedio de ambos vehículos ajustada al valor económico del daño en euros por cada 100 m<sup>2</sup> de área afectada. Se incluyó además el coste de limpieza de calles y sistema de drenaje por cada 100 m<sup>2</sup> de área afectada.



**Figura II-83.** Curva de daños promediada para vehículos para 100 m<sup>2</sup> de área afectada






### II.5.1.3. Criterio propuesto por el Cuerpo de Ingenieros del Ejercito de los Estados Unidos (USACE) (2009)

El Cuerpo de Ingenieros del Ejercito los Estados Unidos de América (USACE) llevó a cabo un estudio para el desarrollo de curvas de daños para vehículos expuestos a inundaciones. Dicho estudio está recogido como memorando: Economic Guidance Memorandum, 09-04, Generic Depth-Damage Relationships for Vehicles (U.S. Army Corps of Engineers, 2009). El “Flood Damage Data Collection Program” del instituto de los recursos de agua del USACE, recoge información de inundaciones producidas para estimar de manera fiable los daños económicos derivados de inundaciones. Como parte de las encuestas llevadas a cabo para averiguar las afectaciones de las inundaciones sobre propiedades residenciales, también se recogieron datos referentes a los daños ocasionados a los vehículos aparcados en tales viviendas para las diez comunidades que sufrieron las mayores inundaciones. La información base para el desarrollo de tales curvas era por tanto los datos aportados por los propios afectados en relación a la estimación del vehículo, del daño ocasionado y del calado de agua que afectó al vehículo.

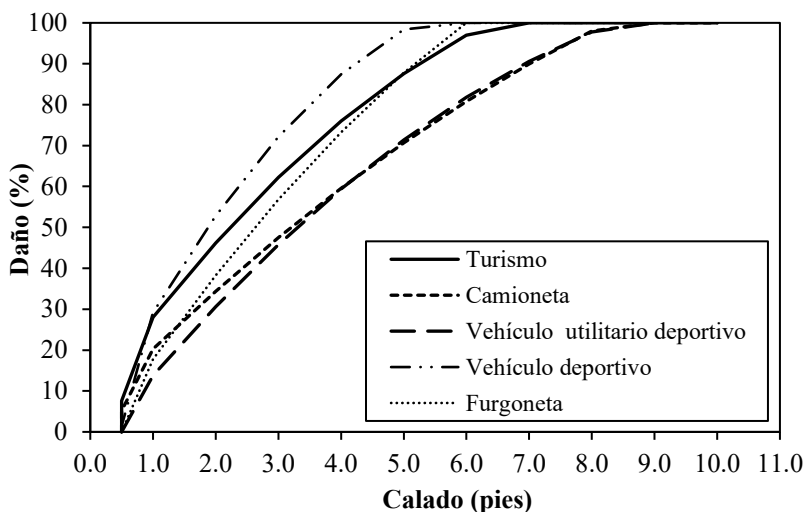
Se elaboraron curvas de daños para cinco tipos de vehículos a partir de una muestra de un total de 640 vehículos. Tales datos fueron tratados estadísticamente para, mediante un análisis de regresión, construir dichas curvas.

En definitiva, el objeto de elaboración del memorando es proporcionar unas directrices para el uso genérico de las curvas de daños desarrolladas para estudios de gestión de riesgo de inundaciones solicitados por el USACE. Afirman que no todos los estudios requieren una curva de daños para vehículos, ya que pueden considerarse como contenidos de las viviendas también. Se trata de curvas que normalmente se usan en estudios para inundaciones urbanas ya que en zonas rurales la densidad de vehículos no es considerable.

**Tabla II-30** Porcentaje de daños según calado de agua para los cinco tipos de vehículos considerados por el USACE

Turismo		Camioneta		Vehículo utilitario deportivo		Vehículo deportivo		Furgoneta	
									
Calado (pies)	Daño (%)	Calado (pies)	Daño (%)	Calado (pies)	Daño (%)	Calado (pies)	Daño (%)	Calado (pies)	Daño (%)
0.5	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0
0.5	7.6	0.5	5.2	0.5	0	0.5	1.4	0.5	0
1	28	1	20.3	1	13.8	1	29.2	1	17.8
2	46.2	2	34.4	2	30.6	2	52.8	2	38.3
3	62.2	3	47.5	3	45.8	3	72.2	3	56.8
4	76	4	59.6	4	59.4	4	87.4	4	73.3
5	87.6	5	70.7	5	71.4	5	98.4	5	87.8
6	97	6	80.8	6	81.8	6	100	6	100
7	100	7	89.9	7	90.6	7	100	7	100
8	100	8	98	8	97.8	8	100	8	100
9	100	9	100	9	100	9	100	9	100
10	100	10	100	10	100	10	100	10	100

Hay dos métodos para aplicar estas curvas, el primero se centra en vehículos aparcados en ubicaciones residenciales y el otro se centra en localizaciones no residenciales. El primero requiere de diferentes datos: la altura del vehículo, que se supone que es la elevación de a propiedad residencial afectada; un promedio de vehículos por propiedad en la zona de estudio; la clasificación de éstos en los diferentes tipos propuestos; y finalmente el porcentaje de vehículos que realmente estarán aparcados en la propiedad cuando la inundación afecte a esa zona. En el memorando se ofrecen diferentes fuentes de información en Estados Unidos para poder obtener los datos requeridos para el estudio de estimación de daños a vehículos.

**Figura II-84.** Curvas de daños para vehículos desarrolladas por el USACE

La aplicación a vehículos que se encuentran aparcados en otros lugares no residenciales es análoga, pero se deben recoger datos más específicos para los que no se ofrecen fuentes en el memorando. La obtención del número de vehículos aparcados en comercios no puede llevarse a cabo a partir del método residencial propuesto. La distribución del número de vehículos y tipología debe ser agrupada por comercio individual para evaluar el daño con exactitud. Sin embargo, las mismas curvas de daño genéricas pueden usarse tanto para vehículos aparcados en zonas residenciales como en zonas comerciales.

### II.5.2. Resumen de los criterios de evaluación de daños a vehículos ocasionados por inundaciones

En este apartado se presenta la Tabla II-31 en la que se recogen, a modo de resumen, las características principales de las curvas de daño para vehículos descritas en este capítulo. Las diferencias en las tipologías de éstas presentan dificultades para ser comparadas mediante representación conjunta. Algunas se proponen como daño relativo, otras como daño total, y otras como daño económico asociado a una superficie afectada. Hasta el momento no se han encontrado trabajos que comparen curvas de daños para vehículos, pero sí en cambio se pueden encontrar comparaciones de curvas de daños para propiedades como el trabajo llevado a cabo por Merz *et al.* (2010) o el de Jongman *et al.* (2012).

**Tabla II-31** Resumen de las características de las curvas de daños para vehículos descritas

Ref.	Modelo	País	Desarrollo	Consideración del daño	Tipos de vehículos	Coste inicial	Enfoque de análisis
(Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2015; Scawthorn <i>et al.</i> , 2006a; 2006b)	HAZUS-MH (FEMA)	EEUU	Sintético	Relativo (%)	Coche Camión pequeño Camión grande	Nuevo o usado aplicando el 50% del nuevo	Objetos individuales
(Francés <i>et al.</i> , 2008)	CRUE	España	Sintético	Absoluto (€)	Gasolina Diesel Promedio	No especificado	Objetos individuales y cada 100 m <sup>2</sup> afectados
(U.S. Army Corps of Engineers, 2009)	USACE	EEUU	Empírico-Sintético	Relativo (%)	Turismo Camioneta Vehículo utilitario deportivo Vehículo deportivo Furgoneta	Valor de mercado	Objetos individuales

## II.6. Discusión sobre el estado de la cuestión y necesidades de investigación

### II.6.1. Criterios de peligrosidad para personas ante inundaciones

La gran parte de los estudios llevados a cabo, proponiendo criterios de peligrosidad para personas, están enfocados a inundaciones fluviales con elevados calados y bajas velocidades, que derivan en una pérdida de estabilidad de la persona. El proyecto RESCDAM (Karvonen *et al.*, 2000) se centró en la determinación de los límites de estabilidad de trabajadores de rescate con equipos de seguridad ante situaciones de roturas de presas, condiciones muy distintas a las originadas por la escorrentía urbana. Algunos de estos estudios se consideran aplicables a cuencas rurales (Témez, 1992; Regione Liguria, 1993; Ministerio de Medio Ambiente de España, 1996; Reiter, 2000) y otros a cuencas urbanas y rurales (FEMA, 1979; Abt *et al.*, 1989; Belleudy, 2004; Department of Infrastructure Planning and Natural Resources. New South Wales Government, 2005; Cox *et al.*, 2010).

Las investigaciones enfocadas únicamente a cuencas urbanas se presentan en un número muy reducido y en ocasiones basan el criterio de seguridad en las calles definiendo umbrales según la posible entrada de agua en los edificios, ya sea solo considerando calado (Wright-Mc Laughlin Engineers, 1969) o la combinación de calado y velocidad (Kelman, 2002). En otros casos el criterio de seguridad no está justificado experimentalmente y se establecía, por ejemplo, un calado de 6 cm (CLABSA, 2006) para asegurar que en una calzada de dos carriles en cada dirección únicamente se inundara el carril más próximo a la acera, dejando despejados los carriles centrales. En el criterio del ARMC (2000), a pesar de considerar aplicación en zona urbana, el calado máximo considerado (hasta 1.5 m para adultos) es más apropiado para inundaciones fluviales y no para pluviales.

Cuando se produce una inundación en una zona urbana debido a la escorrentía ocasionada por lluvias de gran intensidad, los bajos calados y altas velocidades también pueden ser peligrosos para los peatones, pudiendo así perder la estabilidad (por deslizamiento en mayor medida) y ser arrastrados por la corriente. Esta problemática fue analizada por Russo (2009), llevando a cabo una capaña experimental en la que se ensayó una muestra de personas, exponiéndolas a las condiciones típicas de inundaciones pluviales con bajos calados (hasta 18 cm) y velocidades altas (hasta 3.2 m/s). El desconocimiento inicial del comportamiento de las personas en tales condiciones llevó a la elección de una muestra de personas en la que el producto peso por altura ( $P \cdot H$ ), en muchas de ellas, era demasiado elevado para que las condiciones que se podían reproducir en laboratorio generasen inestabilidades. Por lo tanto, **se debe profundizar más en la estabilidad de peatones con características físicas ( $P \cdot H$ ) más susceptibles de sufrir inestabilidades.**

La Guía AR&R (Cox *et al.*, 2010) lleva a cabo un exhaustivo análisis de la estabilidad de personas, considerando los resultados de varios autores. En los estudios contemplados se ensayaron diferentes tipos de personas: niños (Foster *et al.*, 1973; Yee M., 2003), adultos (Abt *et al.*, 1989; Takahashi *et al.*, 1992) y trabajadores de rescate o actores profesionales de riesgo (Karvonen *et al.*, 2000; Jonkman *et al.*, 2008). La clasificación de la peligrosidad finalmente se realiza agrupando la población en bebés o ancianos, niños y adultos, en base al producto peso por altura ( $P \cdot H$ ). **Parece discutible que los niños, deban estar comprendidos en productos ( $P \cdot H$ ) entre 25 y 50 Kg·m y que no hayan adultos en ese mismo rango. Dicha clasificación debe ser estudiada en profundidad, valorando si es posible separar la población bajo ese criterio con**

**las garantías suficientes.** En el proyecto RESCDAM (Karvonen *et al.*, 2000) se afirma que un niño no debería nunca intentar hacer frente al flujo sin ayuda, motivo por el cual no fueron ensayados. **Esta afirmación no parece del todo acertada en cuanto el perfil de persona susceptible de ser arrastrado por el agua podría ser aquel joven (de entre 12 y 15 años), que se cree lo suficientemente fuerte como para poder cruzar una calzada inundada.**

**Un aspecto crítico en la estabilidad de un peatón que pretende cruzar una calle inundada es el primer paso desde la acera en seco a la calzada inundada y debe ser estudiado.** Ningún autor, a excepción de Russo (2009), lo ha considerado previamente, viéndose los sujetos ensayados expuestos directamente al flujo de agua en un canal (Abt *et al.*, 1989). Una velocidad máxima admisible únicamente se propone en la Guía AR&R (Cox *et al.*, 2010), con un valor de 3 m/s y en el ARMC (2000), con un valor de 2 m/s, aunque en ningún caso justificadas mediante ensayos. **La definición de un valor de velocidad máxima de flujo permisible en las calles de una ciudad es otro aspecto fundamental a determinar con rigurosidad, debiéndose comprobar si los valores propuestos hasta el momento son adecuados o se debe establecer otro valor en condiciones de inundaciones pluviales.**

### *II.6.2. Criterios de evaluación de la estabilidad de vehículos ante inundaciones*

Las primeras investigaciones basadas en la estabilidad de vehículos se remontan al año 1967 con el trabajo de Bonham y Hattersley, seguidas de los trabajos de Gordon y Stone (1973) y de Keller y Mitsch (1993). Después de 17 años sin investigaciones documentadas sobre este tema, Teo (2010) retomó el análisis de la estabilidad de vehículos en su Tesis Doctoral llevada a cabo en los laboratorios de la Universidad de Cardiff (Reino Unido). Dicha línea de investigación continuó los años posteriores en la misma Universidad de Cardiff con los trabajos de Xia *et al.* (2011, 2013) y Shu *et al.* (2011). En Japón, Toda *et al.* (2013) también llevaron a cabo ensayos experimentales con dos modelos de vehículos a escala, para evaluar la estabilidad de éstos. Más recientemente Kramer *et al.* (2016) realizaron ensayos experimentales con dos modelos a escala reducida y comprobaron la flotabilidad de un vehículo a escala real. **En todos y cada uno de los estudios propuestos los autores afirman que el fenómeno sigue la semejanza de Froude, pero lo cierto es que en ningún caso se lleva a cabo una justificación apropiada. La asunción de que los ensayos con vehículos en laboratorio siguen la semejanza de Froude debe ser justificada con solidez, pues se trata de la base fundamental de unos resultados realistas y sobretodo ofrece las garantías de poder ser escalados a la realidad (prototipos).** En particular, en el trabajo de Teo (2010) se afirma que se sigue la semejanza de Froude, aunque no se lleva a cabo un correcto ajuste del peso del vehículo a escala reducida, lo que invalida los resultados obtenidos que fueron escalados a prototipo según la semejanza de Froude. En consecuencia, el trabajo de Xia *et al.* (2011) no presenta las garantías suficientes, habiendo utilizado los resultados de Teo (2010) para validar su formulación propuesta para la obtención de la velocidad de arrastre del vehículo.

Los enfoques adoptados en las diferentes investigaciones no responden a un mismo patrón y entre los diferentes estudios algunos son experimentales y otros analíticos. Los estudios experimentales se basan principalmente en ensayos de laboratorio con modelos físicos a escala, utilizando uno (Bonham *et al.*, 1967), dos (Toda *et al.*, 2013; Xia *et al.*, 2013; Kramer *et al.*, 2016) o tres (Teo, 2010; Shu *et al.*, 2011) tipos de vehículos, los cuales suelen ser también diferentes entre autores. **Resulta difícil proponer una metodología que sirva para determinar el límite de**

**inestabilidad de cualquier vehículo debido a la limitación de modelos ensayados hasta el momento. Se debe ensayar, por tanto, una muestra de ellos suficientemente amplia y representativa para que los resultados permitan definir una metodología de obtención del límite de estabilidad para un vehículo cualquiera.**

Uno de los parámetros fundamentales de la estabilidad de vehículos es el coeficiente de rozamiento entre el neumático y el suelo, cuyo valor, dada la dificultad de su acotación, presenta gran dispersión entre los diferentes estudios. En la Guía AR&R (Shand *et al.*, 2011), así como en los estudios precedentes, asumen un valor de 0.3 afirmando que de esa manera se ofrecen unos límites de estabilidad del lado de la seguridad. En los estudios de Teo (2010) no se proponen valores, Shu *et al.* (2011) los determinan experimentalmente (0.39, 0.5 y 0.68) y Xia *et al.* (2013) determinaron mediante ensayos los valores del coeficiente de rozamiento para dos modelos de vehículos, obteniendo en ambos casos un valor de 0.25 para una orientación del costado del vehículo paralela al flujo y de 0.75 para una orientación perpendicular. Finalmente Kramer *et al.* (2016) determinan un discutible valor de 0.3 para dos modelos reducidos de materiales completamente diferentes, plástico y metal. **La dispersión de los valores del coeficiente de rozamiento observada por los diferentes autores muestra una clara necesidad de determinar experimentalmente y con rigurosidad el valor para cada modelo ensayado. El coeficiente de rozamiento, como parámetro fundamental, debe aparecer en las formulaciones derivadas de resultados experimentales, permitiendo así delimitar la zona de seguridad para diferentes valores según la elección de los responsables de la toma de decisiones.**

### *II.6.3. Evaluación de daños directos ocasionados por inundaciones*

La evaluación de los daños económicos es otro de los aspectos que requiere atención por parte de la gestión de riesgos de inundación. En particular, en zonas urbanas el análisis más extendido hasta el momento es la evaluación de daños a edificios, para lo cual se proponen metodologías, que aún y requiriendo todavía mayor evolución, presentan un gran desarrollo. Esta metodología se basa en las curvas de daños, para diferentes tipos de edificios o usos del suelo dependiendo de la escala de trabajo utilizada.

Prestando atención a nuestras ciudades, otro de los elementos que sufre daños son los vehículos, pero parece que hasta el momento no se ha profundizado demasiado en este tema, según el estudio del estado de la cuestión llevado a cabo. Parece que el planteamiento de evaluación de daños a vehículos es análogo al de edificios, habiéndose encontrado en la literatura tres criterios basados en el desarrollo de curvas de daños para diferentes tipos de vehículos (HAZUS-MH (FEMA), CRUE, USACE). El procedimiento más detallado y justificado hasta el momento es el propuesto por el Cuerpo de Ingenieros de los EEUU (USACE), presentando curvas de daño empírico-sintéticas para cinco tipologías de vehículos.

**No se encuentran referencias que estudien la importancia de los daños a vehículos en una ciudad. De forma análoga al procedimiento llevado a cabo para el daño a edificios, se puede plantear un estudio del daño anual esperado para vehículos.** Será éste otro aspecto en el que se profundizará en esta tesis, considerando las curvas de mayor desarrollo hasta el momento (U.S. Army Corps of Engineers, 2009) para evaluar el daño producido a vehículos en una ciudad española, para eventos de diferentes períodos de retorno.

## *Capítulo III*

# *Estudio de la estabilidad de peatones ante inundaciones pluviales en zonas urbanas*

### **III.1. Introducción**

Hoy en día, existe una gran preocupación sobre la seguridad de las personas en relación a las inundaciones producidas en zona urbana. Como se comentaba en el capítulo introductorio, las inundaciones en zona urbana pueden ser debidas a desbordamientos de ríos, tratándose en ese caso de inundaciones fluviales, o inundaciones producidas directamente por la propia escorrentía. También se puede distinguir entre inundaciones producidas en zonas urbanas o rurales, con las singularidades correspondientes a cada tipo de cuenca. Las características de las superficies en las cuencas urbanas, desde el punto de vista hidráulico, hacen que se produzcan corrientes de bajos calados y elevadas velocidades. Según los conceptos acabados de describir, este estudio se enfoca en las condiciones de flujo que se dan habitualmente en inundaciones en zonas urbanas, y producidas directamente por la escorrentía de lluvia.

La seguridad de las personas cuando éstas caminan a través de un flujo de agua, puede verse comprometida si las condiciones del flujo son tales que superen su habilidad para permanecer de pie. Este tema ha sido estudiado por diferentes autores durante las últimas décadas, que trataban de determinar los límites de estabilidad humanos ante diferentes regímenes de flujo. Para conseguirlo se realizaron estudios numéricos y experimentales según se recogen y describen en el Capítulo II. En general hay un amplio consenso en que el grado de peligrosidad para los peatones (definido como las condiciones de flujo que causan el arrastre y/o vuelco de las personas) está principalmente asociado con la velocidad ( $v$ ) y el calado ( $y$ ). Para expresar el nivel de peligrosidad en caso de inundaciones, diversos autores (Abt *et al.*, 1989; Reiter, 2000; Kelman, 2002) propusieron diferentes relaciones entre esos dos parámetros, y generalmente el producto de calado ( $m$ ) por velocidad ( $m/s$ ) está en el rango de 0.5-1.0.

Sin embargo, muchas de las expresiones corresponden a inundaciones de tipo fluvial, con lo que no sería adecuado utilizarlas en zonas urbanas con superficies que presenten rugosidades inferiores, y donde se producen menores calados y velocidades más elevadas, como se comentó anteriormente. En zonas urbanas es posible demostrar que la estabilidad de los peatones depende



de los productos ( $v \cdot y$ ) y ( $v^2 \cdot y$ ) (Gómez, 2001; Nanía, 1999), con lo cual queda clara la relevancia de los parámetros de velocidad y calado en la definición del criterio de peligrosidad.

La tesis doctoral de Russo (2009), “Design of surface drainage systems according to hazard criteria related to flooding of urban areas”, que dedica uno de sus capítulos a tratar el tema de la peligrosidad en relación a las inundaciones en zonas urbanas, es la referencia del presente trabajo. El análisis realizado en esta parte de su tesis doctoral respondía a la determinación de los niveles de peligrosidad que afectaban a las personas cuando éstas cruzan una calle y tras o durante un evento de lluvia la escorrentía está circulando por las calles de la ciudad. La base de este estudio fue experimental, utilizando para los ensayos un modelo físico construido en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (ECA) en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universitat Politècnica de Catalunya.



**Figura III-1.** Modelo físico durante uno de los ensayos con personas

Dicho modelo físico trata de reproducir una calle habitual en zona urbana, con un 2% de pendiente transversal y una pendiente longitudinal variable desde 0 hasta 10%, en incrementos del 2%. Se ensayaron 23 personas, 15 hombres y 8 mujeres, con pesos comprendidos entre 48 y 100 kg y alturas entre 1.48 m y 1.82 m. El protocolo de ensayos consistía en caminar a través y a lo largo de la calle, transversalmente, longitudinalmente y en diagonal. Además, dichos ensayos se realizaron para buenas y malas condiciones de visibilidad, utilizando las personas en el segundo caso, gafas oscuras para reducir visibilidad.

La peligrosidad se distinguió en base a las variables de velocidad, calado y producto de ambas, y los grados de peligrosidad propuestos fueron: baja, media y alta. Los criterios de distinción adoptados para estos grados de peligrosidad fueron los mostrados en la Tabla III-1.

**Tabla III-1** Descripción de los grados de peligrosidad propuestos por Russo (2009)

Peligrosidad	Descripción
Alta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La persona indica una clara pérdida de estabilidad (no puede permanecer estable o caminando o incluso es arrastrada por el flujo)</li> <li>- La persona indica una clara pérdida de maniobrabilidad (no puede llevar a cabo el protocolo del ensayo correctamente)</li> </ul>

Peligrosidad	Descripción
Media	- La persona muestra una significativa pérdida de estabilidad (se mueve de manera inestable realizando un gran esfuerzo para permanecer estable mientras camina) - La persona muestra una significativa pérdida de maniobrabilidad (en estos casos la persona muestra unas dificultades claras para llevar a cabo y terminar el protocolo de ensayo)
Baja	- La persona se agarra en la cuerda inintencionadamente - La persona se plantea o niega a entrar en la plataforma con agua circulando. - La persona indica pocos problemas de estabilidad y maniobrabilidad

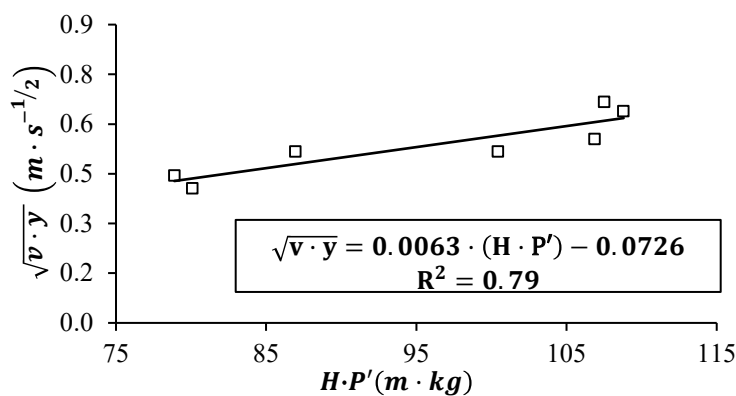
Finalmente, la campaña experimental tuvo un total de 834 ensayos distribuidos entre 23 personas, teniendo en cuenta que los ensayos con una persona finalizaban al llegar el caso de peligrosidad alta.

En base a los resultados obtenidos en la campaña experimental se obtuvo una relación entre las características de las personas y los parámetros de flujo de las situaciones de peligrosidad alta y, de la misma manera que propusieron Abt *et al.* (1989), ésta fue una relación lineal entre la raíz cuadrada del producto de velocidad y calado, y el producto del peso y altura de las personas. Dicha relación se muestra en la ecuación [III-1] y su representación gráfica en la Figura III-2.

$$(v \cdot y)^{\frac{1}{2}} = [0.0063 \cdot (H \cdot P')] - 0.0726 \tag{III-1}$$

donde,

- $v$  [m/s] es la velocidad del flujo
- $y$  [m] es el calado
- $P'$  [kg] es el peso de la persona y cargas
- $H$  [m] es la altura de la persona



**Figura III-2.** Condiciones de peligrosidad alta relacionadas a las condiciones de flujo frente a las características de las personas (Russo, 2009)

La consideración final, para la delimitación de los rangos de peligrosidades, y calados comprendidos entre 9 y 16 cm, fue la siguiente:

- Peligrosidad baja:  $v < 1.5 \text{ m/s}$
- Peligrosidad media:  $1.5 \text{ m/s} \leq v \leq 1.88 \text{ m/s}$
- Peligrosidad alta:  $v \geq 1.88 \text{ m/s}$

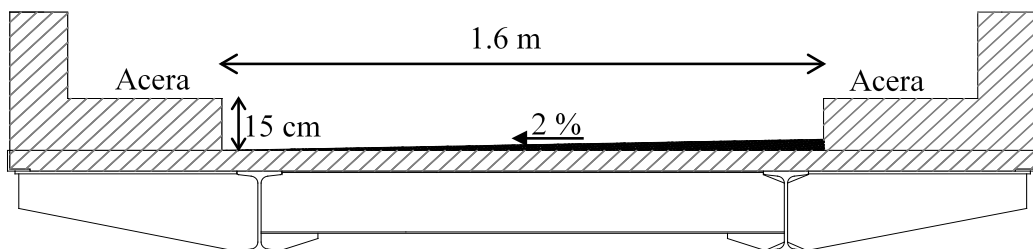
A partir de los estudios llevados a cabo por Russo (2009), se propone extender los ensayos experimentales en base al mismo modelo físico situado en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (ECA) de la Universitat Politècnica de Catalunya. En los experimentos llevados a cabo por Russo (2009), se ensayaron personas de diferentes características, siendo finalmente una minoría aquellos sujetos que presentaban inestabilidades para definir el nivel de peligrosidad alta. De esta manera la cantidad de puntos utilizados para definir la función [III-1] no fue la deseada, y en esta ocasión se pretende ensayar personas con características físicas que generen mayores situaciones de alta peligrosidad.

Además, las personas pueden verse sometidas a situaciones de peligrosidad caminando por el agua en diferentes circunstancias, puesto que la estabilidad de las personas no solo depende de sus características físicas, sino también de si llevan las manos ocupadas, de la tipología de calzado, de las condiciones de visibilidad, etc. Se deben analizar por tanto las diferentes casuísticas e identificar cómo de influyente es cada una de éstas en la estabilidad de las personas.

En este capítulo por tanto se profundiza en las casuísticas de los ensayos de personas, se focaliza en los sujetos más propensos a sufrir inestabilidades, y se analizan en detalle, a partir de instrumentación de laboratorio, las características hidráulicas del flujo en el modelo físico.

### III.2. Descripción de las instalaciones del laboratorio y del modelo físico

En el laboratorio exterior del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (ECA) en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universitat Politècnica de Catalunya, se encuentran diferentes modelos físicos, entre los cuales está el que utilizó Russo (2009) para su tesis doctoral. Se trata de un modelo que permite el estudio a escala real, con un ancho de 1.6 m, longitud de 5.0 m y pendiente variable desde 0 a 10 %, habiendo elegido además unas dimensiones acordes con el espacio disponible en el laboratorio. El modelo, para ofrecer una mayor similitud a una calle y que permitiera una entrada realista de las persona de la acera a la calzada, presenta pendiente transversal del 2% y aceras con bordillos, el mayor de ellos con una altura de 15 cm, según se indica en la Figura III-3 con la sección transversal de la plataforma utilizada.



**Figura III-3.** Sección transversal de la plataforma de ensayos mirando de aguas abajo hacia aguas arriba



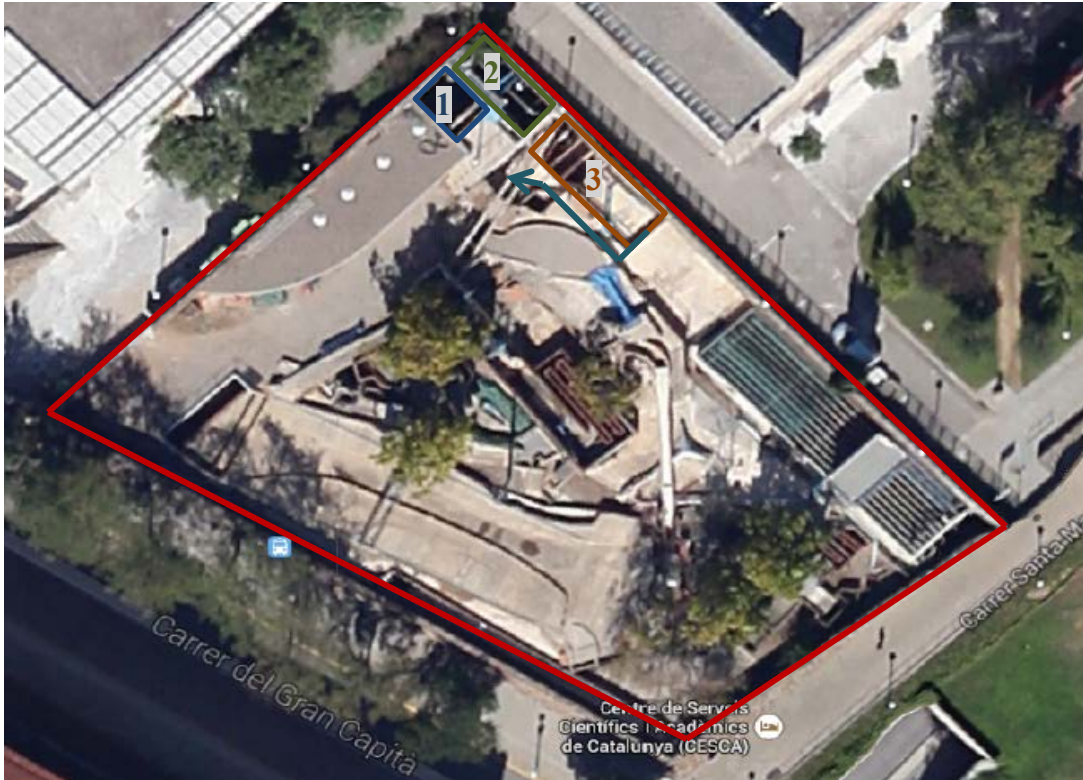
**Figura III-4.** Modelo físico de calle. Entrada uniforme de 100 l/s de caudal

El modelo presenta en cabecera un depósito tranquilizador, para conseguir una entrada de agua a la carretera lo más uniforme posible, y que represente adecuadamente la escorrentía en una calle real situada en zona urbana. En la Figura III-4 y Figura III-5 se observa el modelo físico en funcionamiento y cómo gracias al depósito de cabecera se consigue que la entrada a la calle sea tranquila y uniforme.



**Figura III-5.** Depósito de cabecera del modelo físico

El laboratorio ocupa una superficie de aproximadamente 2,000 m<sup>2</sup> y dispone de un depósito de agua de un volumen de 250m<sup>3</sup>, en el que se almacena el agua que se suministra a los diferentes modelos. Se dispone de una estación de bombeo con tres bombas centrífugas, que impulsan un caudal nominal de 100 l/s, 200 l/s y 300 l/s respectivamente (Figura III-7) hasta un depósito de nivel constante. Dicho depósito se comunica con dos canales, mediante sendas compuertas motorizadas, en los que se encuentran instalados vertederos triangulares y un sistema de medición mediante limnómetros para determinar la carga hidráulica sobre éstos. Una vez el agua sale de los vertederos, se distribuye por el laboratorio, dirigiéndose a partir de un sistema de válvulas, hacia el modelo físico a utilizar. Para el caso del modelo físico de calle, el caudal entra de manera directa, puesto que se emplaza justo al lado de los canales, tal y como se muestra en la fotografía aérea de la Figura III-6.



**Figura III-6.** Vista aérea del laboratorio exterior del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (ECA) en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universitat Politècnica de Catalunya. Siendo **1**: Depósito de nivel constante, **2**: Canales con vertederos triangulares y **3**: Modelo físico de calle



**Figura III-7.** Interior de la estación de bombeo del laboratorio

El sistema permite la regulación del caudal, puesto que combinando la abertura de las compuertas que dan acceso a los canales y permitiendo verter agua por el depósito de nivel constante es posible fijar el nivel deseado en los canales, y por tanto la carga hidráulica sobre los vertederos triangulares.



**Figura III-8.** Depósito de nivel constante (izquierda), vertederos triangulares (centro) y zona de lectura mediante limnímetros (derecha)

Por otro lado, el sistema de variación de la pendiente de la plataforma (modelo físico) es manual y variable en incrementos de 2%. Sobre la plataforma se construyó un pórtico con el doble objetivo de permitir la variación de la pendiente de la misma y servir de agarre de seguridad para las personas durante los ensayos. Para la primera de sus funciones se dispone también de un sistema de poleas que permiten subir y bajar la plataforma manualmente, a partir de dos puntos de sujeción situados en dos arquetas, una en cada acera de la calle, tal y como se observa en la Figura III-9. Una vez suspendida la plataforma se colocan bajo la misma unos bloques con las dimensiones oportunas (Figura III-9) para que ésta se apoye en ellos quedando así fijada la pendiente deseada.



**Figura III-9.** Sistema de variación de la pendiente longitudinal de la plataforma

### III.3. Determinación de los caudales propuestos

Como se ha comentado anteriormente, las bombas del laboratorio proporcionan 100, 200 y 300 l/s de caudal nominal respectivamente, pero dicho caudal a causa de la antigüedad de los equipos dista sensiblemente del real. Para determinar el caudal de paso por la plataforma de ensayos se deben medir los caudales de paso sobre los vertederos triangulares de 90° de abertura (Figura III-10), los cuales fueron aforados volumétricamente con anterioridad. Se ha utilizado el método de Kindsvater-Shen ((Kulin *et al.*, 1975) según el U.S. Bureau of Reclamation, 1997), aplicando un coeficiente de desagüe efectivo para vertederos triangulares parcialmente contraídos [III-2].

$$Q = 1.366 \cdot h^{5/2} \quad \text{[III-2]}$$

donde,

- $Q [m^3/s]$  es el caudal que pasa por el vertedero
- $h [m]$  es la carga hidráulica sobre el vértice del vertedero



**Figura III-10.** Esquema de un vertedero triangular (izquierda), limnómetro (centro), vertedero en funcionamiento (derecha)

En primer lugar se realizó la verificación de los caudales reales proporcionados por cada una de las bombas funcionando de manera independiente y por las combinaciones entre ellas, obteniendo los resultados indicados en la Tabla III-2.

**Tabla III-2** Determinación de los caudales reales proporcionados por las bombas

Bombas en funcionamiento			Lectura limnómetro izquierda [m]	$h_1$ [m]	Lectura limnómetro derecha [m]	$h_2$ [m]	Q [l/s]
100	200	300					
si	si	si	0.7657	0.563	0.6877	0.481	544.84
si			0.4797	0.277	0.4731	0.267	105.49
	si		0.5542	0.352	0.5449	0.339	191.34
		si	0.6083	0.406	0.5905	0.384	268.28
si	si		0.6236	0.421	0.6029	0.397	292.50
si		si	0.6670	0.465	0.6406	0.434	370.68
	si	si	0.7074	0.505	0.6730	0.467	450.71

Para determinar la carga de agua ( $h$ ) sobre el vertedero fue necesario tomar en primera instancia la lectura del limnómetro en el vértice de cada vertedero, lo que se conoce como el “cero” de las lecturas. El cero para el vertedero del canal izquierdo (mirando hacia aguas abajo) es de 20.24 cm y de 20.64 cm para el vertedero del canal derecho. La carga de agua sobre el vertedero se determina como diferencia entre la lectura del limnómetro en la superficie libre del agua y el cero para cada uno de los dos vertederos, y el caudal total es la suma de los caudales de paso por ambos vertederos.

De esta manera se obtiene el rango de caudales para los ensayos, desde 105.49 l/s proporcionados por la menor de las bombas, hasta un caudal máximo de 544.84 l/s cuando las tres bombas entran en funcionamiento. En este sentido, para hacer referencia a una situación única en cada ensayo sin considerar las oscilaciones en el caudal impulsado real, en adelante se hace mención a niveles de caudal: 100( $\approx$ 105.49) l/s, 200( $\approx$ 191.34) l/s, 300( $\approx$ 292.50) l/s, 375( $\approx$ 370.68) l/s, 450( $\approx$ 450.71) l/s y 550( $\approx$ 544.84) l/s. Se tratan por tanto en este estudio 6 niveles de caudales.

El tercer nivel de caudal de 300 l/s se relaciona a la combinación de bombas en funcionamiento de 100 y 200 l/s en lugar de al uso únicamente de la bomba de 300 l/s puesto que el caudal real.

### III.4. Determinación de las velocidades y calados en el modelo de calle

Como primer paso, antes de iniciar los ensayos con personas se requiere un estudio con el que obtener las variables hidráulicas en el modelo para los diferentes caudales y pendientes ensayados. Tal y como se comentó anteriormente hay un consenso general, por parte de los investigadores que tratan el estudio de la estabilidad humana frente a los caudales circulantes en calles, cauces y llanuras de inundación, en que las variables hidráulicas que intervienen en dicha estabilidad son la velocidad y el calado del agua. Se debe realizar por tanto el estudio de las velocidades y calados producidos en el modelo para cada uno de los caudales y pendientes ensayadas, y poder relacionar finalmente estas variables con el comportamiento de las personas ensayadas en tales condiciones de flujo.

#### III.4.1. Instrumentación: Velocímetro Vectrino

Para el análisis de las velocidades se utiliza instrumentación de medida de laboratorio, en concreto un medidor de velocidades ADV (Acoustic Doppler Velocimeter - Vectrino de la marca Nortek), con el que obtener en detalle el campo de velocidades producido, para las diferentes combinaciones de caudales y pendientes del modelo, en una sección del modelo de calle. En la Figura III-11 se observa la forma y dimensiones del Vectrino sidelooking utilizado, especialmente diseñado para calados pequeños al disponer del transmisor apuntando en dirección perpendicular al eje del dispositivo, a diferencia del vectrino downlooking cuyo transmisor apunta hacia abajo.

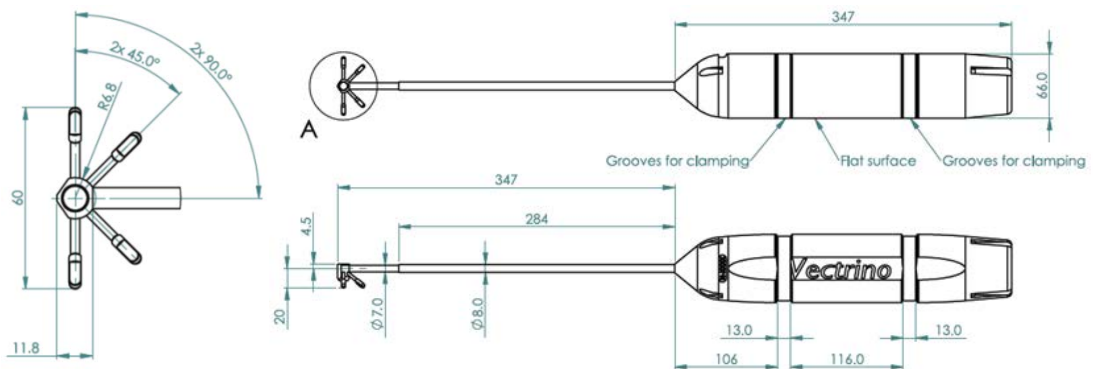


Figura III-11. Esquema y dimensiones del Vectrino sidelooking de Nortek

Este ADV utiliza una tecnología semi-intrusiva que permite registrar series de velocidades tridimensionales en uno o varios puntos de una vertical. El funcionamiento del Vectrino se basa en el conocido efecto doppler, consistente en el cambio de frecuencia que el choque con las partículas suspendidas en un fluido provoca en una onda. Ese salto entre la frecuencia de la onda emitida  $f_e$  y la de la recibida  $f_r$  se denomina doppler shift ( $\delta$ ) y es proporcional a la velocidad de las partículas, que se asume igual a la del fluido.

En el caso más simple, el equipo de medida consistiría en una sonda de emisión y otra de recepción que forman un ángulo  $\theta$ . El emisor genera una señal acústica de frecuencia  $f_e$ , que



choca con las partículas moviéndose con una velocidad  $v$ . La señal reflejada es detectada por los receptores y con su frecuencia  $f_r$  puede calcularse  $\delta$ . Si se dispone de tres medidas de la frecuencia doppler realizadas según direcciones geométricamente independientes podrán calcularse las componentes de la velocidad según tres ejes coordenados.

El Vectrino, a diferencia de otros velocímetros, es un sensor biestático, puesto que utiliza por separado un transmisor y un receptor. El transmisor es la antena central y la señal la reciben cuatro antenas o receptores. Las pulsaciones de las 4 antenas se interceptan a una distancia aproximada de 50 mm del transmisor, dentro de un volumen de control que puede ser graduado en un rango establecido.

El transmisor envía la señal que cubre de 3 a 15 mm (según elección del usuario), y los receptores captan el eco en este volumen (Figura III-12a). El diámetro del volumen es de 6 mm, y el Vectrino utiliza los cuatro receptores para obtener las tres componentes de la velocidad.

Existen dos tipos de sistemas de las antenas receptoras (beams), el sistema sidelooking y el sistema downlooking, siendo su principal diferencia la orientación de dichas antenas. El sistema de Vectrino sidelooking utilizado tiene dos de las antenas receptoras en el plano horizontal y dos giradas  $65^\circ$ . Estas antenas giradas son las que se utilizan para calcular las componentes  $v_x$  y  $v_y$ , y la componente vertical  $v_z$  se calcula con las cuatro antenas. Se trata de un sistema más robusto que el sistema downlooking, en especial cuando se mide gran caudal o cuando hay muchas ondas. Además, se pueden adoptar dos tipos de sistemas de coordenadas, según XYZ o según la dirección de las antenas según se observa en la Figura III-12b siendo el primero el asumido en este estudio.

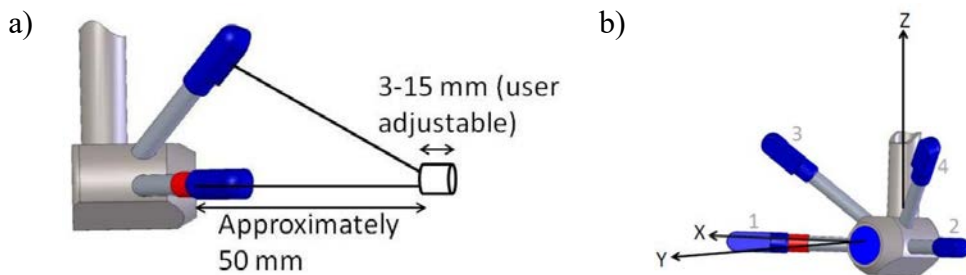


Figura III-12. Volumen de control (a) y ejes de referencia (b) del Vectrino sidelooking

#### III.4.1.1. Software de registro de datos

El Vectrino requiere de un software para el registro y grabado de la información, llamado Vectrino +. Este software se encarga de registrar y visualizar velocidades en un instante de tiempo, obteniendo finalmente una serie temporal.

Este software permite, entre otros aspectos, iniciar e interrumpir la lectura de información, visualizar las diferentes medidas, grabar los registros y cambiar las configuraciones. En la Figura III-13 se muestra la interfaz del programa, donde se observan dos tipos de visualizaciones, gráfica y numérica. La información de interés ofrecida por el programa en las tres direcciones es la siguiente:

- Velocidades registradas en las diferentes componentes, en cm/s
- Desviación estándar de las componentes de la velocidad, en cm/s

- Amplitud, en counts. Éstas son unas unidades que Nortek utiliza para la fuerza de la señal. En sus instrumentos hay circuitos para la amplificación de las señales de entrada y el número de counts es un indicador de cuánto aumento debemos aplicar a la señal. Cuanto menos aumento se necesita mayor es el nivel de señal de entrada.
- Relación señal-a-ruido SNR, en dB. Siendo:  $SNR = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{Amplitud_{señal}}{Amplitud_{ruido}} \right)$
- Correlación, el porcentaje de correlación. Matemáticamente, la correlación proporcionada es la norma de la covarianza normalizada de las señales de ida y retorno para el pulso 1 y 2. El valor de la correlación nos aporta una idea de cómo de similares son las dos señales de ida y retorno.

La componente Z2 para el Vectrino sidelooking no aporta ninguna información.

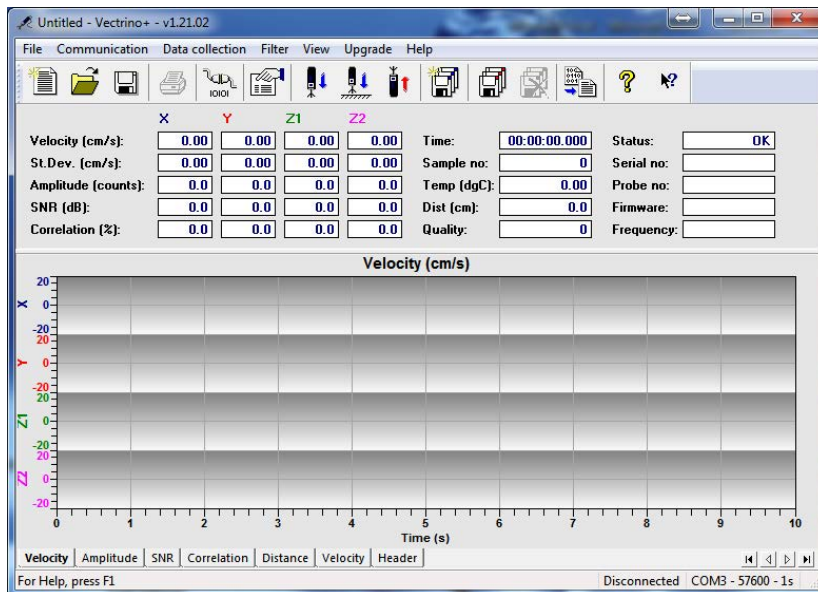


Figura III-13. Interfaz del software Vectrino +

Un aspecto importante es la configuración del software, de manera que se obtengan resultados correctos. En Vectrino + se pueden configurar diversos parámetros de medida, tal y como se muestra en la Figura III-14 y como se definen a continuación:

- **Sampling rate (velocidad de muestreo):** Establece la frecuencia de registro de velocidades, amplitud, correlación y la presión de datos. De igual forma determina la velocidad a la que se registran los datos internos o en el disco. Si se aumenta la frecuencia de muestreo, el ruido también aumenta, lo que conduce a una disminución de señal a ruido (SNR. La señal-ruido debe ser tan alta como sea posible). Los intervalos de frecuencia de muestreo disponibles son de 1 Hz a 200 Hz.
- **Nominal velocity range (velocidad nominal del rango):** El rango de velocidad debe estar configurado para cubrir la gama de las velocidades previstas durante la recogida de datos. A mayor rango de velocidad más ruido en los datos y viceversa. La gama dispone de la configuración de la velocidad nominal de  $\pm 0.03$ ,  $\pm 0.1$ ,  $\pm 0.3$ ,  $\pm 1.0$ ,  $\pm 2.5$  m/s y  $\pm 4.0$  m/s.

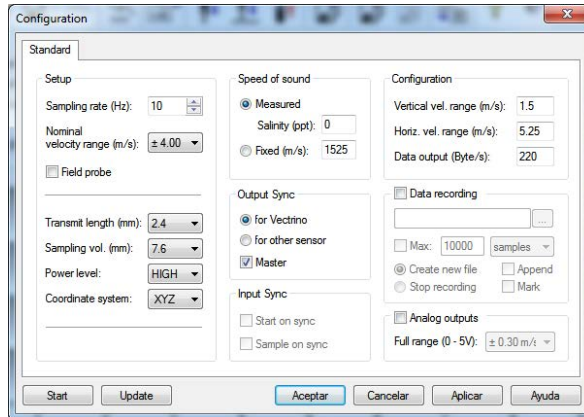


Figura III-14. Configuración del software Vectrino +

- **Transmit length (longitud de transmisión):** Es la distancia de la llegada de los impulsos emitidos por el centro del haz de transmisión. Al aumentar el “transmit length”, la relación señal-ruido se incrementa. Hay que tener en cuenta que al cambiar el “transmit length”, el tamaño de los volúmenes disponibles de muestreo también varía. La reducción del “transmit length” reduce el volumen de muestreo y puede permitir acercarse a las fronteras. La altura de los ajustes disponibles son 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 y 2.4 mm.
- **Sampling volume (volumen de muestreo):** El volumen de muestreo es cilíndrico con un ancho fijo (6 mm) y una altura ajustable según el usuario (Figura III-12a y Figura III-14). Al reducir el tamaño del volumen de muestreo, el número total de muestras que se utilizan para el cálculo de la velocidad se reduce, perdiendo a su vez la precisión de las mediciones de la velocidad.
- **Power level (potencia):** Fija la cantidad de energía acústica que el instrumento transmite en el agua. La diferencia entre el nivel más alto y el nivel más bajo es de aproximadamente 7 dB.
- **Coordinate system (sistema de coordenadas):** El sistema de coordenadas se puede seleccionar entre Beam o XYZ.
- **Speed of sound (velocidad del sonido):** Se puede establecer por el usuario o ser calculadas por el instrumento sobre la base de la temperatura medida y la salinidad. La salinidad es 0 para el agua dulce y por lo general 35, con el océano. La velocidad del sonido en el agua influye en el cálculo de los valores de velocidad obtenidos por el vectrino. El velocímetro calcula la velocidad del sonido basándose en la temperatura (medida) y en la salinidad (valor por defecto o introducido por el usuario). Se asume una salinidad nominal, siendo dicha hipótesis suficientemente correcta ya que la sensibilidad de la velocidad del sonido es mucho más sensible a la variación de la temperatura que a la de la salinidad.
- **Vertical/Horizontal velocity range (Vertical/Horizontal rango de velocidades):** Se trata de una estimación teórica de la velocidad a lo largo del eje vertical (eje de transmisión) y en el plano perpendicular.

La configuración utilizada en los ensayos, es la indicada en la Figura III-14, aunque para pendientes bajas y bajos caudales se ha utilizado el rango de velocidades de  $\pm 2.5$  m/s.

### III.4.1.2. Registro de información, grabado y conversión de datos

En cada punto deseado se coloca el Vectrino y se registran datos durante aproximadamente 2 minutos, obteniendo así una serie temporal de velocidades. Esta información se almacena en el disco duro en un archivo con formato ASCII. Posteriormente, mediante la opción de conversión de datos que ofrece el software Vectrino + (Figura III-15), se generan archivos con las siguientes extensiones:

- \*.hdr: son tablas que se documentan por sí mismas y contienen la información del formato de los demás archivos generados.
- \*.dat: contienen la información de la velocidad y de la presión.
- \*.sen: contienen la información de la medición: fecha, tiempo de ensayo, temperatura, voltaje de la batería, etc.
- \*.adv: archivo de velocidades instantáneas. Necesario para el post-procesamiento.

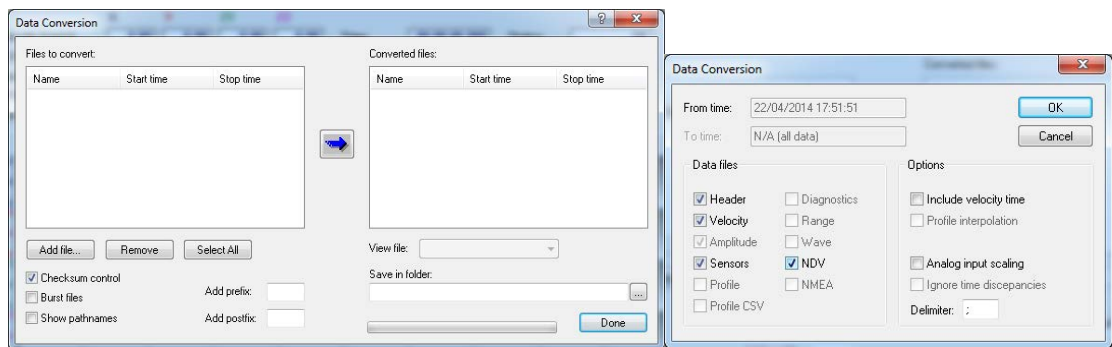


Figura III-15. Conversión de datos del software Vectrino +

### III.4.1.3. Filtrado de datos

El post-procesamiento y análisis de datos obtenidos mediante un ADV presenta un único requerimiento frente a otros equipos de medidas de velocidad; se trata de la necesidad del filtrado de los datos. El tipo de datos obtenidos debe ser filtrado para asegurar que las limitaciones técnicas del ADV no afectan de manera adversa en la calidad de los resultados. Una herramienta habitual para este tipo de tratamiento de datos es el software WinADV, desarrollado por Wahl (Wahl, 2000) en el Laboratorio de investigación en recursos hídricos del Bureau of Reclamation de los Estados Unidos de América. Se trata de un programa para realizar el post-procesamiento de archivos de datos de tiempo real (archivos \*.adv) grabados por ADVs tipo SonTek y Nortek, y ofreciendo una gran cantidad de opciones de filtrado y procesamiento.



\*La dirección x del vectrino coincide con la dirección longitudinal de la plataforma. En este trabajo se ha considerado dirección "y".

**Figura III-16.** Interfaz del programa WinADV. Ejemplo de registro de velocidades durante 180 segundos.

En este estudio se optó por la utilización del software WinADV, siendo adecuado en este caso puesto que se utilizó un Vectrino Nortek para la toma de datos de velocidad. Este software no solo permite procesar y analizar los datos, sino también exportar los datos que previamente fueron tratados mediante los filtros que ofrece el programa.

En la Figura III-16 se observa la interfaz del programa WinADV, mostrando un ejemplo de una serie temporal de velocidades registrada en uno de los puntos de estudio del modelo de calle. El programa permite visualizar el registro de datos como serie temporal, como histograma y como espectro de potencias.

El registro de velocidades se realiza en las tres dimensiones, aunque en este estudio requiere el análisis de la velocidad longitudinal en el modelo de calle, indicada (según se orientó el vectrino) como V-x en el gráfico de serie temporal del ejemplo de la Figura III-16.

Una vez realizado el filtrado de datos, mediante WinADV se procede a exportar el resumen estadístico de dichos datos filtrados. El formato de exportación utilizado es el de Excel (v.5), obteniendo de esta manera un archivo ASCII con los diferentes resultados separados por comas, y pudiendo abrirse con una hoja de cálculo tipo Excel.

### III.4.2. Metodología para el registro de velocidades y medición de calados

La metodología utilizada para la determinación de velocidades y calados es análoga a la realizada por Greco (2011) en su tesina de grado para la Universidad de Calabria (Italia), realizando ensayos experimentales en la misma plataforma de ensayos utilizada para el desarrollo esta tesis. Dicho estudio se basaba en la determinación de la distribución de velocidades en una sección del modelo,

realizando para ello cinco perfiles de velocidades mediante el registro de datos con un vectrino sideloooking. Este estudio trataba de determinar con mayor precisión las variables hidráulicas (velocidades y calados) que se propusieron mediante resultados numéricos en el trabajo de Russo (2009).

Para el estudio actual, se instaló un sistema que permitiera soportar y dar movimiento transversal al vectrino (Figura III-17) ubicándose finalmente la sección de estudio a una distancia de la caída libre del modelo de 74.5 cm tal y como se observa en la Figura III-18. Dicha instalación consistía en una biga de celosía biapoyada sobre la que podía deslizarse un carrito en el que se incorporó el vectrino. El vectrino quedaba sujeto mediante un juego de bridas pero se permitía el movimiento vertical de forma manual gracias a un tornillo sinfín. Este movimiento vertical hacía posible la ubicación del vectrino a la altura necesaria para el registro de velocidades, en cada uno de los puntos que finalmente definen el perfil.

Con el objetivo de determinar la distribución de velocidades en la sección escogida, se establecieron cinco puntos equiespaciados entre ellos, donde realizar los perfiles de velocidades, aunque en casos de desbordamiento de agua en las aceras se propusieron un total de nueve puntos. El espaciamiento entre estos perfiles se propone igual al establecido en el estudio de Greco (2011) y según se representa en la Figura III-20 y en la Figura III-21.



Figura III-17. Instalación del Vectrino Sidelooking en el modelo

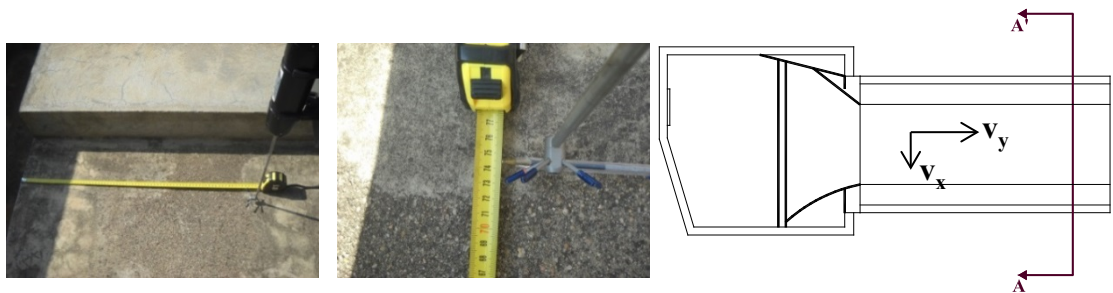


Figura III-18. Localización de la sección de análisis de velocidades

Para cada uno de los perfiles se registraron datos de velocidades instantáneas, durante al menos dos minutos, en diferentes puntos en una misma vertical y separados 1 cm entre ellos. La separación en los dos puntos más profundos fue menor a 1 cm para ofrecer más detalle de la descripción de la zona más profunda del perfil de velocidades. Los valores de velocidad representados en cada punto de cada perfil, por ejemplo el mostrado en la Figura III-19, son los

valores medios del registro de datos de velocidad filtrado. Esta información se obtiene a partir del archivo ASCII exportado por el programa de filtrado WinADV cuyo funcionamiento se ha descrito en apartados anteriores. Los calados para cada caso se obtuvieron utilizando el vectrino como si fuera un limnómetro, a partir de la diferencia de la lectura en el fondo y superficie libre.

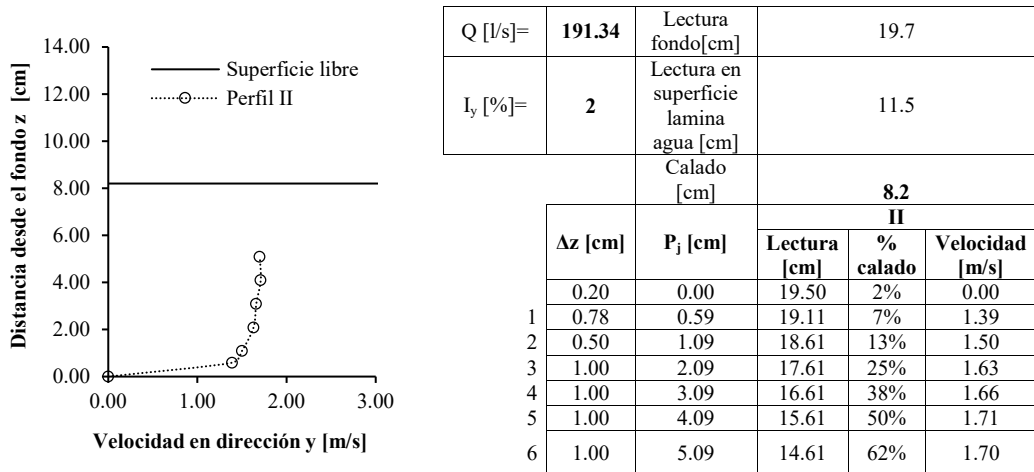


Figura III-19. Perfil de velocidades para un caudal de 191.34 l/s y una pendiente del modelo del 2%

El campo de velocidades estudiado se realizó para todas las combinaciones de caudales y pendientes posibles, según se indica en la Tabla III-3.

Tabla III-3 Pendientes y caudales ensayados para determinar el campo de velocidades en la sección de estudio

Nivel	I <sub>y</sub> =2%	I <sub>y</sub> =4%	I <sub>y</sub> =6%	I <sub>y</sub> =8%	I <sub>y</sub> =10%
100	105.49	106.60	102.17	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>
200	191.34	195.39	154.08	192.59	200.15
300	292.50	297.49	291.88	292.85	274.78
375	370.68	384.43	396.64	379.69	385.98
450	418.96	450.75	423.64	450.75	450.95
550	551.95	550.55	553.46	535.14	538.78

<sup>1</sup>Los bajos calados no permitieron el registro de las velocidades mediante el vectrino.

Una vez determinados todos los perfiles de velocidades, recogidos en el Anejo A, se procede a la verificación de la calidad de los registros.

### III.4.3. Verificación de la calidad del registro de velocidades

Considerando como caudal real, el obtenido a partir de la suma de los caudales sobre vertedero triangular y determinados mediante la expresión [III-2], es posible compararlo con un caudal calculado ( $Q_{calculado}$ ) a partir de la asignación de zonas de influencia a cada punto de registro de velocidad.

Se propone la discretización en subdominios o celdas del área hidráulica en cada caso, asociando un valor de velocidad a cada uno de ellos ( $v_{i,j}$ ), según se representa en la Figura III-20

y Figura III-21. El área de influencia de cada velocidad ( $A_{i,j}$ ) puede ser calculada fácilmente, así como obtener el caudal de paso por cada subdominio o celda ( $Q_{i,j}$ ), tal y como muestra la expresión [III-3]. Se han considerado unas pequeñas zonas de velocidad nula (0,2 cm), en contacto con el fondo y paredes.

$$Q_{i,j} = v_{i,j} \cdot A_{i,j} \tag{III-3}$$

siendo,

- $v_{i,j}$ : velocidad asociada al dominio o celda  $i,j$ .
- $A_{i,j}$ : área del dominio o celda  $i,j$ .
- $Q_{i,j}$ : caudal de paso por el dominio o celda  $i,j$ .

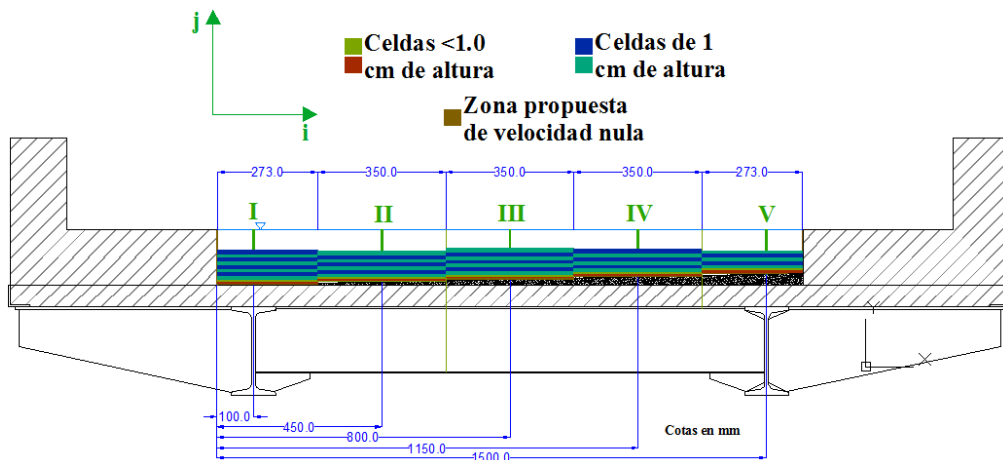


Figura III-20. Esquema de discretización de subdominios para cada punto de velocidad en la sección de estudio. Situación sin desbordamiento de agua en las aceras

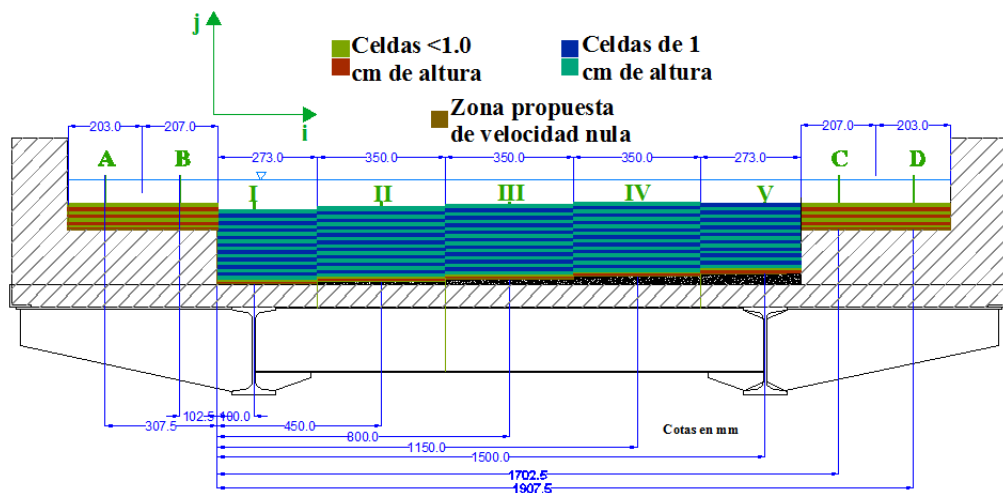


Figura III-21. Esquema de discretización de subdominios para cada punto de velocidad en la sección de estudio. Situación con desbordamiento de agua en las aceras



El caudal calculado ( $Q_{calculado}$ ) será por tanto la suma de los caudales de cada subdominio o celda. En la Figura III-22, Figura III-23 y Figura III-24 se muestra un ejemplo de la asociación de velocidades, áreas y caudales a cada celda respectivamente, para un caudal de 423.64 l/s y un 6% de pendiente longitudinal. También se muestra en la Figura III-24 el resultado del caudal calculado para este caso de ejemplo.

Q [l/s]=423.64			Velocidad $V_{i,j}$ [m/s]						
Id. Perfil			-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]			13.10	12.90	12.20	11.50	10.90	10.20	10.00
$\Delta x$ [cm]			0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Punto	$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.78	0.59	0.00	2.03	2.17	2.08	2.02	2.20	0.00
2	0.50	1.09	0.00	2.18	1.98	2.25	2.19	2.30	0.00
3	1.00	2.09	0.00	2.42	2.12	2.43	2.38	2.43	0.00
4	1.00	3.09	0.00	2.48	2.16	2.44	2.45	2.43	0.00
5	1.00	4.09	0.00	2.50	2.15	2.48	2.48	2.42	0.00
6	1.00	5.09	0.00	2.48	2.16	2.49	2.48	2.41	0.00
7	1.00	6.09	0.00	2.50	2.15	2.48	2.47	2.42	0.00
8	1.00	7.09	0.00	2.47	2.14	2.48	2.48	2.42	0.00
9	1.00	8.09	0.00	2.45	2.14	2.48	2.48		0.00
			0.00	2.45	2.14				

Figura III-22. Velocidades asociadas a cada subdominio o celda i,j. Caudal real de 423.64 l/s y pendiente del 6%

Q [l/s]= 423.64			Área $A_{i,j}$ [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil			-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]			13.10	12.90	12.20	11.50	10.90	10.20	10.00
$\Delta x$ [cm]			0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Punto	$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0	0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
1	0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
2	0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
3	1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
4	1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
5	1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
6	1.00	5.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
7	1.00	6.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
8	1.00	7.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	98.55	0.68
9	1.00	8.09	0.20	27.30	35.00	136.85	115.85		
			0.90	117.66	126.35				
			$\Sigma A_{i,1}$	$\Sigma A_{i,2}$	$\Sigma A_{i,3}$	$\Sigma A_{i,4}$	$\Sigma A_{i,5}$	$\Sigma A_{i,6}$	$\Sigma A_{i,7}$
	$A_j$ [cm <sup>2</sup> ]		2.60	349.17	423.15	398.65	377.65	275.46	1.98
	$\Sigma A_{v \neq 0}$ [cm <sup>2</sup> ]					1,792.15			
	$\Sigma A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]					36.496			
	$\Sigma A_j$ [cm <sup>2</sup> ]					1,828.65			

Figura III-23. Área de cada subdominio o celda i,j, y área hidráulica total. Caudal real de 423.64 l/s y pendiente del 6%

Q [l/s]= 423.64		Caudal Q <sub>i,j</sub> [cm <sup>3</sup> /s]							
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-	
Calado [cm]		13.10	12.90	12.20	11.50	10.90	10.20	10.00	
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20	
Punto	Δz [cm]	P <sub>i,j</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1	0.78	0.59	0.00	4,322.68	5,924.10	5,678.40	5,514.60	4,684.68	0.00
2	0.50	1.09	0.00	2,975.70	3,465.00	3,937.50	3,832.50	3,139.50	0.00
3	1.00	2.09	0.00	6,606.60	7,420.00	8,505.00	8,330.00	6,633.90	0.00
4	1.00	3.09	0.00	6,770.40	7,560.00	8,540.00	8,575.00	6,633.90	0.00
5	1.00	4.09	0.00	6,825.00	7,525.00	8,680.00	8,680.00	6,606.60	0.00
6	1.00	5.09	0.00	6,770.40	7,560.00	8,715.00	8,680.00	6,579.30	0.00
7	1.00	6.09	0.00	6,825.00	7,525.00	8,680.00	8,645.00	6,606.60	0.00
8	1.00	7.09	0.00	6,743.10	7,490.00	8,680.00	8,680.00	23,849.83	0.00
9	1.00	8.09	0.00	6,688.50	7,490.00	33,938.80	28,730.80		
			0.00	28,827.44	27,038.90				
			ΣQ <sub>i,1</sub>	ΣQ <sub>i,2</sub>	ΣQ <sub>i,3</sub>	ΣQ <sub>i,4</sub>	ΣQ <sub>i,5</sub>	ΣQ <sub>i,6</sub>	ΣQ <sub>i,7</sub>
	Q <sub>j</sub> [cm <sup>3</sup> /s]		0.00	83,354.82	88,998.00	95,354.70	89,667.90	64,734.31	0.00
	ΣQ <sub>j</sub> [cm <sup>3</sup> /s]		422,109.72						
			ΣQ <sub>i,1</sub>	ΣQ <sub>i,2</sub>	ΣQ <sub>i,3</sub>	ΣQ <sub>i,4</sub>	ΣQ <sub>i,5</sub>	ΣQ <sub>i,6</sub>	ΣQ <sub>i,7</sub>
	Q <sub>j</sub> [l/s]		0.00	83.35	89.00	95.35	89.67	64.73	0.00
	ΣQ <sub>j</sub> [l/s]		422.11						

Figura III-24. Caudal en cada subdominio o celda i,j y caudal calculado. Caudal real de 423.64 l/s y pendiente del 6%

En el registro de velocidades para cada perfil se tuvieron en cuenta puntos hasta el 60% del calado aproximadamente, desde el fondo del modelo hacia la superficie libre, considerando que a partir de ahí la velocidad ya era constante hasta la superficie. En el cálculo del caudal (Figura III-22, Figura III-23 y Figura III-24) se indica en color verde el último punto registrado para cada perfil, y en color amarillo representa la última celda por encima del último registro, asumiendo la misma velocidad que en este último.

Habiendo obtenido el caudal calculado para cada uno de los casos ensayados, se establece por tanto el error en el caudal según la expresión [III-4], asociando un bajo a error a una mayor calidad del registro de las velocidades.

$$error[\%] = \left[ 1 - \frac{Q_{calculado}}{Q} \right] \cdot 100 \tag{III-4}$$

La velocidad media de la sección será determinada por tanto según indica la expresión [III-5].

$$v = \frac{Q}{A_w} \tag{III-5}$$

Donde,

A<sub>w</sub>: es el área hidráulica, determinada a partir de la suma de las áreas de cada celda A<sub>i,j</sub>

Por otro lado, también para la verificación de los resultados, se han calculado los coeficientes de distribución de velocidades de Coriolis (α) y de Boussinesq (β).

Como resultado de la distribución no uniforme de velocidades en una sección de canal, la altura de velocidad de un flujo en canales abiertos es por lo general mayor que el valor calculado de acuerdo con la expresión  $v^2/2g$ , siendo  $v$  la velocidad media. Cuando se utiliza el principio de energía en cálculos, la altura de la velocidad real puede expresarse como  $\alpha(v^2/2g)$ . El coeficiente de Coriolis  $\alpha$  que aparece en la expresión de la energía cinética, representa la relación que existe, para una sección dada, entre la energía real y la que se obtendría considerando una distribución uniforme de velocidades. Su valor se calcula a partir de la ecuación [III-6].

$$\alpha = \frac{\int v^3 dA_w}{v^3 \cdot A_w} \xrightarrow{\text{discretizando}} \frac{\sum_i^m \sum_j^n (v_{i,j}^3 \cdot A_{i,j})}{v^3 \cdot A_w} \quad \text{[III-6]}$$

siendo,

- $n$ : el número de celdas en vertical por cada perfil.
- $m$ : el número de perfiles de velocidad.
- $A_{i,j}$ : el área de la celda  $i,j$ .
- $v_{i,j}$ : la velocidad en la celda  $i,j$ .
- $v$ : velocidad media en la sección hidráulica.
- $A_w$ : área de la sección hidráulica.

En la literatura, los ensayos experimentales muestran que  $\alpha$  varía entre 1.03 y 1.36 para los canales prismáticos (canales con sección transversal y pendiente del fondo constante) (Coriolis, 1836; Chow, 1994).

El uso del coeficiente de Coriolis, depende de la exactitud con que se estén haciendo los cálculos, en muchos casos se justifica considerar:  $\alpha = 1$ , siendo un valor límite utilizado generalmente en secciones transversales de alineación casi recta y tamaño regular; en este caso la distribución de la velocidad será estrictamente uniforme

La distribución no uniforme de velocidades también afecta al cálculo del momentum en flujo de canales abiertos. A partir del principio de mecánica, el momentum de un fluido que pasa a través de la sección de canal por unidad de tiempo se expresa por  $\beta \cdot \rho_w \cdot Q \cdot v$ , siendo  $\beta$  conocido como coeficiente de momentum o coeficiente de Boussinesq, en honor a quien lo propuso por primera vez (Boussinesq, 1877);  $\rho_w$  es la densidad del agua;  $Q$  es el caudal;  $v$  es la velocidad media. Se ha encontrado que el valor de  $\beta$  para canales prismáticos aproximadamente rectos varía desde 1.01 hasta 1.12 (Chow, 1994).

En muchos casos se justifica considerar:  $\beta = 1$ , siendo un valor límite utilizado generalmente en secciones transversales de alineación casi recta y tamaño regular; en este caso la distribución de la velocidad será estrictamente uniforme. Su valor se calcula a partir de la ecuación [III-7].

$$\beta = \frac{\int v^2 dA_w}{v^2 \cdot A_w} \xrightarrow{\text{discretizando}} \frac{\sum_i^m \sum_j^n (v_{i,j}^2 \cdot A_{i,j})}{v^2 \cdot A_w} \quad \text{[III-7]}$$

siendo,

- $n$ : el número de celdas en vertical por cada perfil.
- $m$ : el número de perfiles de velocidad.
- $A_{i,j}$ : el área de la celda  $i,j$ .
- $v_{i,j}$ : la velocidad en la celda  $i,j$ .

- $v$ : velocidad media en la sección hidráulica.
- $A_w$ : área de la sección hidráulica.

Q [l/s]=423.64			$V^3_{i,j} * A_{i,j} [m^5/s^3]$							
Id. Perfil			-	I	II	III	IV	V	-	
Calado [cm]			13.10	12.90	12.20	11.50	10.90	10.20	10.00	
$\Delta x$ [cm]			0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20	
Punto	$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00	
0	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1	0.78	0.59	0.00	0.018	0.028	0.025	0.023	0.023	0.00	
2	0.50	1.09	0.00	0.014	0.014	0.020	0.018	0.017	0.00	
3	1.00	2.09	0.00	0.039	0.033	0.050	0.047	0.039	0.00	
4	1.00	3.09	0.00	0.042	0.035	0.051	0.051	0.039	0.00	
5	1.00	4.09	0.00	0.043	0.035	0.053	0.053	0.039	0.00	
6	1.00	5.09	0.00	0.042	0.035	0.054	0.053	0.038	0.00	
7	1.00	6.09	0.00	0.043	0.035	0.053	0.053	0.039	0.00	
8	1.00	7.09	0.00	0.041	0.034	0.053	0.053	0.140	0.00	
9	1.00	8.09	0.00	0.040	0.034	0.209	0.177			
			0.00	0.173	0.124					
$\sum(V^3_{i,j} * A_{i,j})$			0.000	0.494	0.407	0.568	0.529	0.373	0.000	
$\sum V^3_j * A_j [m^5/s^3]$			2.371							
$\alpha [-]$			1.054							

Figura III-25. Cálculo de coeficiente de Coriolis. Caudal real de 423.64 l/s y pendiente del 6%

Estos coeficientes son siempre un poco mayores que el valor límite de la unidad, en cuyo caso la distribución de velocidades sería estrictamente uniforme a través de la sección de un canal. Para canales de sección transversal regular y alineamiento más o menos recto, el efecto de la distribución no uniforme de velocidades en el cálculo del término cinético y el momentum es pequeño, especialmente en comparación con otras incertidumbres involucradas en el cálculo.

En este caso se han calculado ambos coeficientes para cada uno de los casos de estudio, de la manera que se muestra en el ejemplo de la Figura III-25 y Figura III-26.

Q[l/s]=423.64			$V^2_{i,j} * A_{i,j} [m^4/s^3]$							
Id. Perfil			-	I	II	III	IV	V	-	
Calado [cm]			13.10	12.90	12.20	11.50	10.90	10.20	10.00	
$\Delta x$ [cm]			0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20	
Punto	$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00	
0	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1	0.78	0.59	0.00	0.009	0.013	0.012	0.011	0.010	0.00	
2	0.50	1.09	0.00	0.006	0.007	0.009	0.008	0.007	0.00	
3	1.00	2.09	0.00	0.016	0.016	0.021	0.020	0.016	0.00	
4	1.00	3.09	0.00	0.017	0.016	0.021	0.021	0.016	0.00	
5	1.00	4.09	0.00	0.017	0.016	0.022	0.022	0.016	0.00	
6	1.00	5.09	0.00	0.017	0.016	0.022	0.022	0.016	0.00	
7	1.00	6.09	0.00	0.017	0.016	0.022	0.021	0.016	0.00	
8	1.00	7.09	0.00	0.017	0.016	0.022	0.022	0.058	0.00	
9	1.00	8.09	0.00	0.016	0.016	0.084	0.071			
			0.00	0.071	0.058					
$\sum(V^2_{i,j} * A_{i,j})$			0.000	0.203	0.190	0.233	0.218	0.155	0.000	
$\sum V^2_j * A_j [m^4/s^3]$			0.999							
$\beta [-]$			1.025							

Figura III-26. Cálculo de coeficiente de Boussinesq. Caudal real de 423.64 l/s y pendiente del 6%

Todos los coeficientes, tanto de Coriolis como de Boussinesq han resultado ligeramente superiores a la unidad, siempre dentro de los rangos habituales. Se confirma por tanto que los resultados de velocidad son razonables.

En la Tabla III-4 se muestran todos los caudales calculados, así como los errores obtenidos y coeficientes de Coriolis y Boussinesq para cada uno de los casos estudiados.

**Tabla III-4** Errores en los caudales y coeficientes de Coriolis y Boussinesq calculados para los diferentes casos de estudio

Pendiente [%]	$Q$ [l/s]	$Q_{calculado}$ [l/s]	Error en Caudal [%]	Sección Hidráulica $A_w$ [m <sup>2</sup> ]	$\alpha$ [-]	$\beta$ [-]
2%	105.49	104.17	1.25%	0.074	1.114	1.053
	191.34	194.42	-1.61%	0.118	1.074	1.035
	292.50	293.50	-0.34%	0.161	1.057	1.026
	370.68	370.99	-0.08%	0.190	1.050	1.023
	418.96	424.38	-1.29%	0.208	1.042	1.020
	551.95	579.01	-4.90%	0.269	1.061	1.028
4%	106.60	92.86	12.90%	0.056	1.155	1.071
	195.39	186.24	4.68%	0.093	1.056	1.011
	297.49	280.36	5.76%	0.127	1.061	1.029
	384.43	355.11	7.63%	0.150	1.053	1.025
	450.75	437.61	2.92%	0.181	1.047	1.022
	550.55	537.04	2.45%	0.211	1.039	1.019
6%	102.17	104.17	-1.96%	0.056	1.149	1.069
	154.08	139.12	9.71%	0.074	1.112	1.052
	291.88	295.58	-1.27%	0.136	1.063	1.030
	396.64	379.14	4.41%	0.172	1.068	1.029
	423.64	422.11	0.36%	0.183	1.054	1.025
	553.46	561.01	-1.36%	0.225	1.060	1.028
8%	_*	_*	_*	_*	_*	_*
	192.59	177.40	7.89%	0.071	1.116	1.054
	292.85	300.01	-2.45%	0.110	1.070	1.034
	379.69	325.37	14.31%	0.115	1.072	1.034
	450.75	407.13	9.68%	0.139	1.061	1.029
	535.14	466.97	12.74%	0.155	1.053	1.025
10%	_*	_*	_*	_*	_*	_*
	200.15	207.91	-3.88%	0.075	1.121	1.055
	274.78	243.36	11.43%	0.085	1.097	1.046
	385.98	332.43	13.87%	0.110	1.077	1.036
	450.95	407.02	9.74%	0.129	1.063	1.030
	538.78	466.70	13.38%	0.145	1.057	1.027

\*No fue posible el registro de velocidades por desarrollarse un calado insuficiente

Los errores obtenidos en los caudales crecen cuando aumenta la pendiente del modelo, es decir cuando se incrementa la velocidad y disminuye el calado. Se observa claramente que para la pendiente del 2% los errores son especialmente bajos con respecto al resto de pendientes. También se acentúa el error cuando los caudales son bajos y por tanto también los calados, lo cual impedía la obtención de suficientes puntos de velocidad mediante el vectrino sidelooking. Las altas velocidades producían entrada de aire que dificultaba la recepción de la señal por parte de las antenas del vectrino. En la Figura III-27 se muestra un detalle del comportamiento del vectrino

dentro de un flujo con altas velocidades, y se observa la formación de una bolsa de aire en una de las antenas. Estas entradas de aire bajaban la correlación de los registros y por tanto la calidad de los mismos.



Figura III-27. Entrada de aire en las antenas receptoras para altas velocidades de flujo

### III.4.3.1. Resultados de las variables hidráulicas obtenidas

Como se comentó en apartados anteriores, la sección de estudio presenta cierta heterogeneidad en cuanto a las variables de velocidad y calado, y en consecuencia al producto velocidad por calado y velocidad al cuadrado por calado. Una vez obtenidos los registros de velocidades y determinación de calados en cada una de las verticales de toma de datos de la sección de estudio, se ha analizado dicha heterogeneidad de las diferentes variables. La velocidad, debido a la presencia de superficie libre y a la fricción a lo largo de las paredes del canal, no está uniformemente distribuida en toda la sección. La máxima velocidad medida en canales normales suele ocurrir por debajo de la superficie libre a una distancia de 0.05 a 0.25 de la profundidad, cuanto más cerca de los laterales, más profundo se encontrará este máximo (Figura III-28).

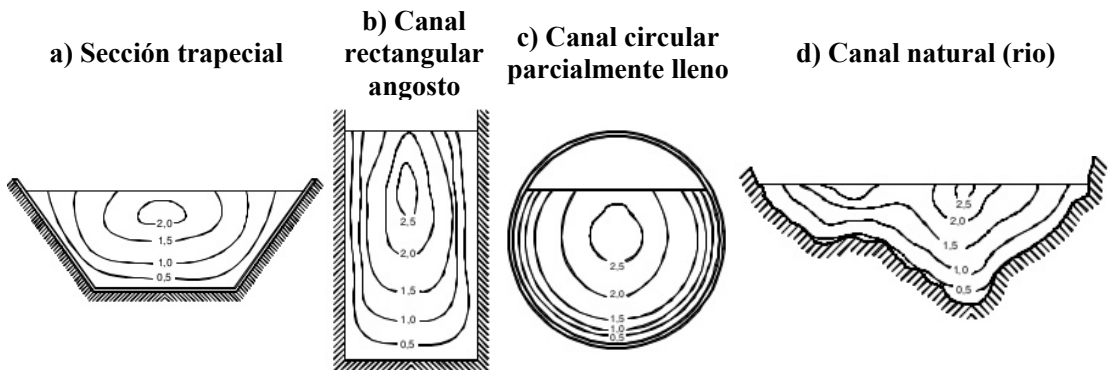
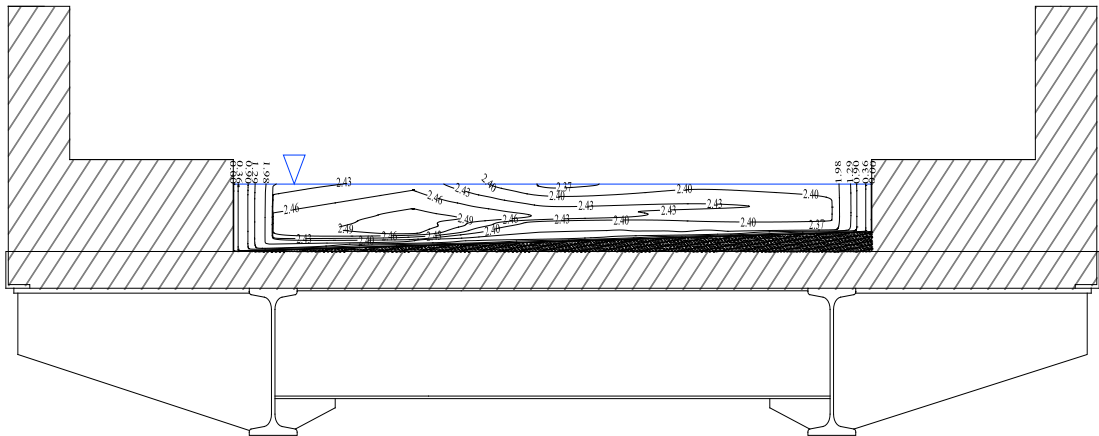


Figura III-28. Isotacas en diferentes secciones transversales. Fuente: Hidráulica de canales abiertos (Chow, 1994)

A modo de ejemplo, se han desarrollado las isotacas de la sección de estudio a partir de los datos experimentales registrados para cada perfil de velocidades, para un caudal de 384.43 l/s y una pendiente longitudinal del 4%, tal y como se muestra en la Figura III-29.



**Figura III-29.** Isotacas de la sección de estudio (de aguas abajo a aguas arriba). Caudal de 384.43 l/s y pendiente longitudinal del 4% del modelo. Sección escalada verticalmente ( $E_V$ : 2:1). Velocidad en m/s

Dicha distribución de velocidades corresponde con la lógica posición de la isolinea de velocidades máximas, situada más próxima a la zona de sección de mayor calado, debido a la pendiente transversal del 2% que presenta el modelo. Se trata de una sección no simétrica, pero con un patrón de isotacas con mucha similitud a las secciones típicas (Figura III-28) simétricas. En cualquier caso la variabilidad de velocidades en la zona central de la sección no es muy significativa y parece obvia la idoneidad de adoptar una única velocidad representativa de toda la sección.

Por otro lado, se han determinado las velocidades medias de cada perfil [III-12], para todos los casos estudiados. En la Tabla III-5 se recogen todas las velocidades medias y calados en cada perfil para todos los caudales y pendientes longitudinales del modelo ensayados.

**Tabla III-5** Velocidades medias y calados en la posición de cada perfil

$I_y$ [%]	Q [l/s]	$V_{\text{perfil}}$ [m/s]					$Y_{\text{perfil}}$ [m]				
		I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
2%	105.49	1.42	1.47	1.50	1.44	1.29	0.060	0.054	0.047	0.040	0.034
	191.34	1.76	1.60	1.68	1.69	1.56	0.088	0.082	0.075	0.068	0.062
	292.50	1.91	1.77	1.85	1.90	1.71	0.115	0.109	0.102	0.095	0.089
	370.68	2.01	1.98	1.88	2.02	1.89	0.133	0.127	0.120	0.113	0.107
	418.96	2.06	2.09	2.02	2.08	1.99	0.144	0.138	0.131	0.124	0.118
	551.95	2.27	2.22	2.25	2.14	2.13	0.169	0.163	0.156	0.149	0.143
4%	106.60	1.79	1.78	1.81	1.62	1.54	0.048	0.042	0.035	0.028	0.022
	195.39	2.09	2.08	2.06	1.97	1.98	0.072	0.066	0.059	0.052	0.046
	297.49	2.27	2.20	2.25	2.28	2.20	0.091	0.085	0.078	0.071	0.065
	384.43	2.42	2.46	2.33	2.35	2.38	0.108	0.102	0.095	0.088	0.082
	450.75	2.45	2.53	2.40	2.37	2.41	0.127	0.121	0.114	0.107	0.101
	550.55	2.63	2.63	2.53	2.53	2.54	0.146	0.140	0.133	0.126	0.120
6%	102.17	1.84	1.90	1.97	1.74	1.72	0.049	0.042	0.035	0.029	0.022
	154.08	1.92	1.95	1.99	1.88	1.87	0.061	0.054	0.047	0.041	0.034
	291.88	2.21	2.14	2.22	2.21	2.15	0.100	0.093	0.086	0.080	0.073
	396.64	2.36	2.40	2.31	2.32	2.35	0.122	0.115	0.108	0.102	0.095

I <sub>y</sub> [%]	Q [l/s]	V <sub>perfil</sub> [m/s]					Y <sub>perfil</sub> [m]				
		I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
	423.64	2.39	2.47	2.39	2.37	2.37	0.129	0.122	0.115	0.109	0.102
	553.46	2.58	2.56	2.53	2.48	2.52	0.152	0.145	0.138	0.132	0.125
8%	192.59	2.70	2.59	2.57	2.39	2.48	0.058	0.052	0.045	0.038	0.032
	292.85	2.87	2.78	2.78	2.77	2.62	0.078	0.072	0.065	0.058	0.052
	379.69	2.99	2.84	2.78	2.80	2.86	0.086	0.080	0.073	0.066	0.060
	450.75	3.03	3.03	2.90	2.86	2.85	0.101	0.095	0.088	0.081	0.075
	535.14	3.13	3.02	3.06	2.95	2.99	0.111	0.105	0.098	0.091	0.085
10%	200.15	2.82	2.81	2.77	2.76	2.75	0.061	0.055	0.048	0.041	0.035
	274.78	2.98	2.94	2.95	2.90	2.90	0.067	0.061	0.054	0.047	0.041
	385.98	3.15	3.07	2.95	2.95	3.07	0.083	0.077	0.070	0.063	0.057
	450.95	3.31	3.28	3.15	3.10	3.15	0.097	0.091	0.084	0.077	0.071
	538.78	3.37	3.23	3.18	3.08	3.06	0.105	0.099	0.092	0.085	0.079

Se observa como los valores medios de la velocidad varían, pero muy próximos a un valor medio en cada caso, a lo largo de la sección mostrando una leve tendencia decreciente desde la posición del perfil I hasta la posición del perfil V. Dicho patrón de velocidades no queda tan claro para situaciones de gran pendiente (grandes velocidades) y/o poco caudal (bajo calado) que supusieron una peor calidad del registro de datos. Las variaciones de calado indican la linealidad lógica decreciente también en la misma dirección, desde I hasta V, a causa de la pendiente transversal fija del 2% en el modelo. Para observar de manera más gráfica dicha heterogeneidad de las variables se han representado los valores de velocidad media de perfil, calado, producto velocidad media de perfil por calado y producto velocidad media de perfil al cuadrado por calado en cada posición de perfil para los diferentes caudales ensayados con una pendiente longitudinal del modelo del 4%, tal y como muestran la Figura III-30, Figura III-31, Figura III-32 y Figura III-33 respectivamente.

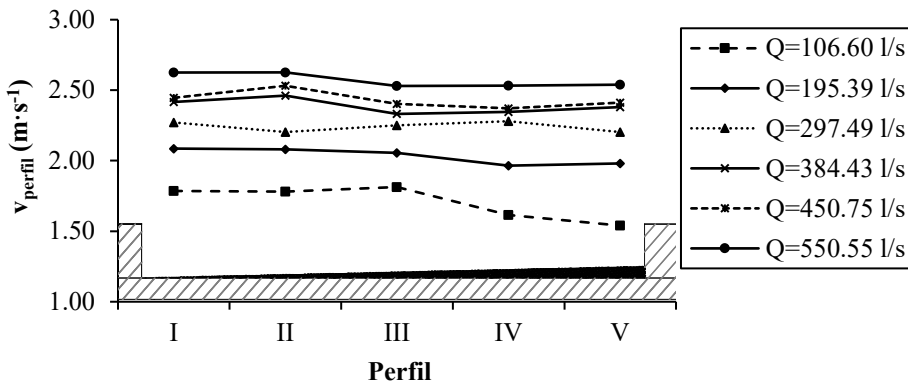


Figura III-30. Representación de la variabilidad de las velocidades medias de cada perfil en la sección de estudio, para los diferentes caudales ensayados y una pendiente longitudinal del 4% del modelo



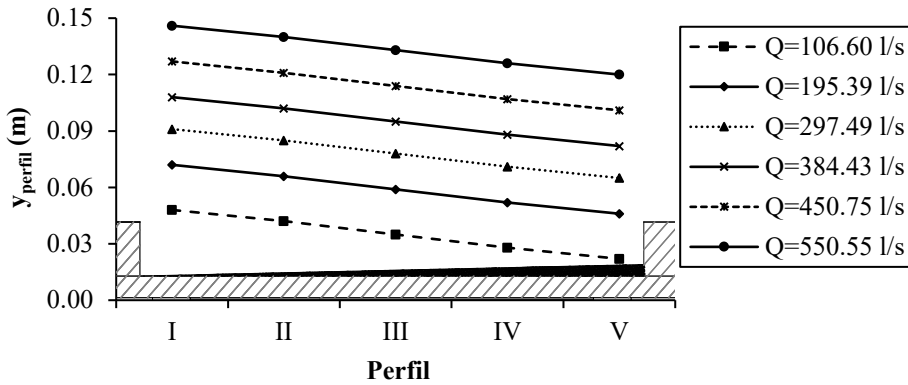


Figura III-31. Representación de la variabilidad de los calados de cada perfil en la sección de estudio, para los diferentes caudales ensayados y una pendiente longitudinal del 4% del modelo

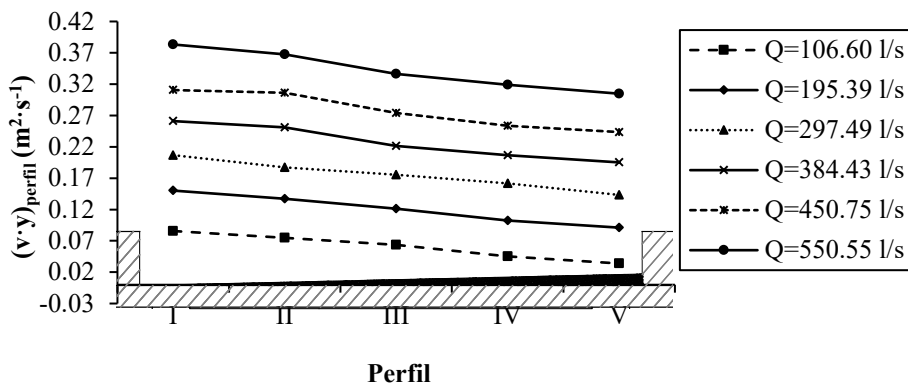


Figura III-32. Representación de la variabilidad del producto velocidad media por calado de cada perfil en la sección de estudio, para los diferentes caudales ensayados y una pendiente longitudinal del 4% del modelo

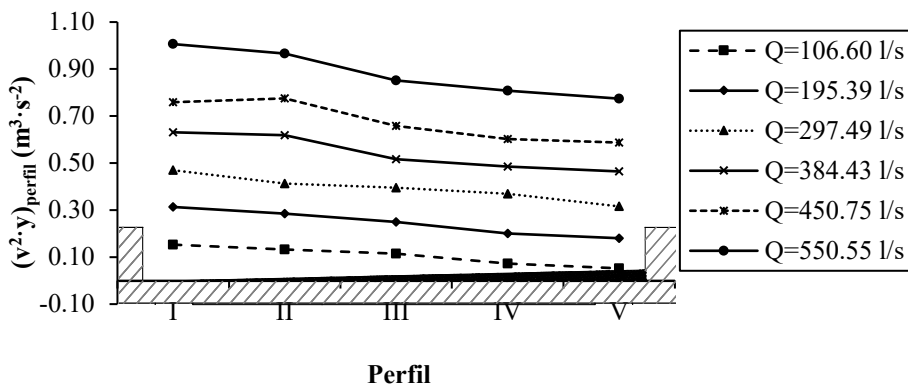


Figura III-33. Representación de la variabilidad del producto velocidad media al cuadrado por calado de cada perfil en la sección de estudio, para los diferentes caudales ensayados y una pendiente longitudinal del 4% del modelo

A causa de la no uniformidad de valores de estas variables en la sección de estudio se deben escoger valores representativos. Como se ha mostrado anteriormente, la velocidad no es uniforme en una misma sección, pero tampoco lo es el calado a causa de la presencia de pendiente transversal en el modelo. Las variables hidráulicas de calado y velocidad a considerar, en la sección de estudio, son las siguientes:

- **Calado medio ( $\bar{y}$ ):** se trata de un calado uniforme en una sección rectangular equivalente, obtenido como se muestra en la expresión [III-8].

$$\bar{y} = \frac{A'}{b} \quad \text{[III-8]}$$

Siendo,

$A'$ : la sección hidráulica real determinada según se indica en la Figura III-23.

$b'$ : el ancho de la sección del modelo de calle, 1.6 m.

- **Velocidad media calculada ( $\bar{v}_c$ ):** es la velocidad media obtenida de la división del caudal calculado entre la sección hidráulica, tal y como indica la expresión [III-9].

$$\bar{v}_c = \frac{Q_{\text{calculado}}}{A} \quad \text{[III-9]}$$

Siendo,

$A$ : la sección hidráulica real determinada según se indica en la Figura III-23.

- **Velocidad media ( $\bar{v}$ ):** es la velocidad media obtenida de la división del caudal real entre la sección hidráulica, tal y como indica la expresión [III-10].

$$\bar{v} = \frac{Q}{A} \quad \text{[III-10]}$$

Siendo,

$A$ : la sección hidráulica real determinada según se indica en la Figura III-23.

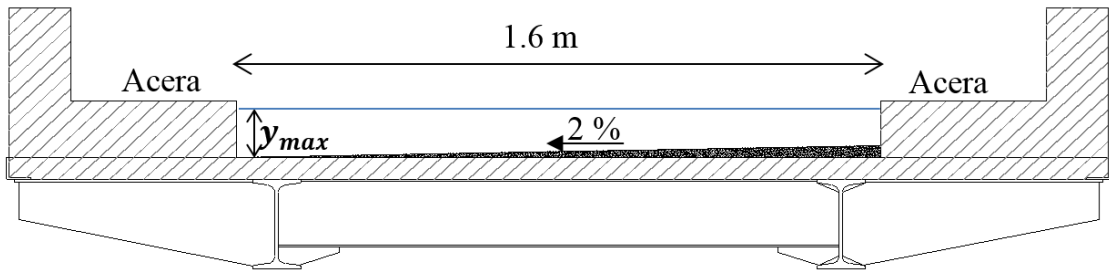
- **Calado máximo ( $y_{max}$ ):** se trata del máximo calado que se da en la sección transversal, situado junto al bordillo derecho en dirección agua abajo. Se puede obtener a partir del calado medio tal y como indica la expresión [III-11].

$$y_{max} = \bar{y} + \left( \frac{b'}{2} \cdot i_x \right) \quad \text{[III-11]}$$

Siendo,

$i_x$ : pendiente de la sección transversal del modelo de calle, 2% en tanto por uno.

$b'$ : el ancho de la sección del modelo de calle, 1.6 m.



- **Calado en el perfil I ( $y_I$ ):** es el calado real, medido en la posición del perfil I de la sección de estudio. Se trata del calado en los perfiles más alto de los que se dan en toda la sección, a causa de la existencia de bombeo transversal.
- **Velocidad promedio en el perfil I ( $\bar{v}_I$ ):** es la velocidad promedio de las velocidades medias de cada uno de los puntos con los que se ha definido el perfil de velocidades I. La expresión [III-12] muestra la fórmula utilizada.

$$\bar{v}_I = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{v}_i}{n} \quad \text{[III-12]}$$

Siendo,

$n$ : el número de puntos tomados para definir el perfil de velocidades.

$\bar{v}_i$ : velocidad media del registro de velocidades en el punto  $i$  del perfil I.

En la Tabla III-6 se recogen los resultados de todas las variables comentadas, y relacionadas a cada uno de los caudales y pendientes ensayados. Las variables hidráulicas referentes al perfil I son consideradas como representativas, puesto que dicho perfil coincide con el punto de inmersión del primer pie de las personas ensayadas, y además tanto los calados como las velocidades son superiores a los valores medios.

**Tabla III-6** Resultados de las variables hidráulicas representativas para cada caso de estudio

Pendiente [%]	$Q$ [l/s]	$\bar{y}$ [cm]	$y_{max}$ [cm]	$y_I$ [cm]	$\bar{v}_I$ [m/s]	$\bar{v}_c$ [m/s]	$\bar{v}$ [m/s]
2%	105.49	4.633	6.233	6.000	1.42	1.41	1.42
	191.34	7.390	8.990	8.800	1.76	1.64	1.62
	292.50	10.090	11.690	11.500	1.91	1.82	1.81
	370.68	11.890	13.490	13.300	2.01	1.95	1.95
	418.96	12.990	14.590	14.400	2.06	2.04	2.02
	551.95	16.828	18.428	16.900	2.27	2.15	2.05
4%	106.60	3.490	5.090	4.800	1.79	1.66	1.91
	195.39	5.790	7.390	7.200	2.09	2.01	2.11
	297.49	7.915	9.515	9.100	2.27	2.21	2.35
	384.43	9.390	10.990	10.800	2.42	2.36	2.56
	450.75	11.290	12.890	12.700	2.45	2.42	2.50
	550.55	13.190	14.790	14.600	2.63	2.54	2.61
6%	102.17	3.472	5.072	4.900	1.84	1.88	1.84
	154.08	4.629	6.229	6.100	1.92	1.88	2.08
	291.88	8.529	10.129	10.000	2.21	2.17	2.14
	396.64	10.729	12.329	12.200	2.36	2.21	2.31

Pendiente [%]	Q [l/s]	$\bar{y}$ [cm]	$y_{max}$ [cm]	$y_I$ [cm]	$\bar{v}_I$ [m/s]	$\bar{v}_c$ [m/s]	$\bar{v}$ [m/s]
8%	423.64	11.429	13.029	12.900	2.39	2.31	2.32
	553.46	14.038	15.638	15.200	2.58	2.50	2.46
	-	-	-	-	-	-	-
	192.59	4.433	6.033	5.800	2.70	2.50	2.72
	292.85	6.890	8.490	7.800	2.87	2.72	2.66
	379.69	7.190	8.790	8.600	2.99	2.83	3.30
10%	450.75	8.690	10.290	10.100	3.03	2.93	3.24
	535.14	9.690	11.290	10.500	3.13	3.01	3.45
	-	-	-	-	-	-	-
	200.15	4.690	6.290	6.100	2.82	2.77	2.67
	274.78	5.290	6.890	6.700	2.98	2.88	3.25
	385.98	6.890	8.490	8.300	3.15	3.02	3.50
	450.95	8.032	9.632	9.700	3.31	3.17	3.51
	538.78	9.090	10.690	10.500	3.37	3.21	3.70

Una vez definidas las variables hidráulicas representativas de cada caso para la sección de estudio, se procede a evaluar la peligrosidad para las personas en cada una de estas situaciones.

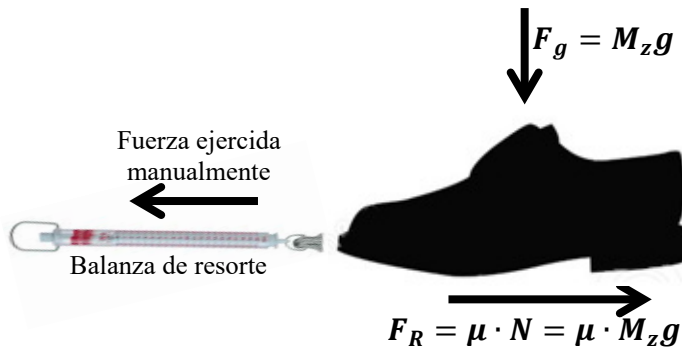
### III.5. Propuesta de casos de estudio

Los casos de estudio de esta investigación referentes a la evaluación de la peligrosidad para personas, se basan en la combinación de los diferentes caudales y pendientes de la plataforma y de distintas situaciones aplicadas a las personas ensayadas. Para cada uno de los casos de caudal y pendiente, la persona ensayada deberá realizar el protocolo de ensayo con diferente calzado (Figura III-34), con las manos ocupadas (Figura III-37) o libres, así como en condiciones de buena o mala visibilidad (Figura III-36c).

Para los diferentes calzados utilizados se determinó el coeficiente de rozamiento sobre la superficie de ensayo mojada, a partir de una balanza de resorte (Figura III-35). Tras enganchar la balanza mediante la pinza que lleva incorporada, se ejerce una cierta fuerza creciente manualmente, hasta que el calzado se mueve. En ese instante, la fuerza ejercida es igual a la fuerza de rozamiento ( $F_R$ ) que el contacto calzado-suelo ofrece. A partir de ésta se obtiene el coeficiente de rozamiento ( $\mu$ ) como ratio entre la fuerza de rozamiento y la ejercida por el peso del calzado ( $\mu = F_R/M_zg$ ). En la Tabla III-7 se recogen los resultados obtenidos.



Figura III-34. Calzado utilizado en los ensayos con personas. a) y b) zapatos para chica y chico respectivamente, c) chanclas y d) botas de agua



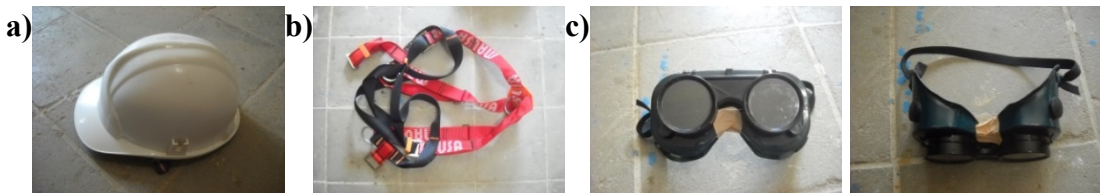
**Figura III-35.** Determinación del coeficiente de rozamiento mediante una balanza de resorte

**Tabla III-7** Coeficientes de rozamiento determinados experimentalmente

Calzado	$M_z$ (g)*	$\frac{F_R}{g}$ (g)*	$\mu$
Zapato tacón	208.0	110.0	0.53
Chancla	68.0	30.0	0.44
Zapato plano	270.0	185.0	0.69
Bota de agua	434.0	250.0	0.58

\*Las unidades obtenidas por la balanza de resorte son gramos, con lo que se trata de una fuerza dividida entre el valor de la aceleración de la gravedad.

Las propuestas de ensayos pretenden representar posibles situaciones que se pueden dar en la realidad, puesto que la ocurrencia de eventos de lluvia en ocasiones es de forma inesperada y por tanto no siempre estamos preparados para ellos. Las actividades que se realizan en una ciudad son muy variadas y se dan en situaciones muy diversas, por eso se han considerado ensayos con diferente calzado, buenas y malas condiciones de visibilidad así como situaciones en las que se tienen objetos en las manos. Se prevé que las situaciones de peligrosidad puedan variar dependiendo de cada una de éstas. Los diferentes calzados ofrecen mayor o menor dificultad al andar en el agua, siendo algunos más hidrodinámicos que otros y por eso la persona realiza mayor o menor esfuerzo para vencer la fuerza que el agua ejerce. Además ofrecen diferente adherencia, siendo más propensos los de menor adherencia a ocasionar inestabilidades por deslizamiento.



**Figura III-36.** Elementos utilizados en los ensayos. a) y b) casco y arnés de seguridad, y c) gafas para limitar la visibilidad



Figura III-37. Ejemplos de ensayos con las manos ocupadas

Para limitar el número total de combinaciones no se tienen en cuenta los dos caudales inferiores, de 100 y 200 l/s ni la menor de las pendientes, 2%, que ofrecen los menores valores de velocidad y se prevé que no ocasionen situaciones de peligrosidad (según resultados de Russo (Russo, 2009)). Considerando por tanto 4 caudales, 4 pendientes longitudinales y el resto de situaciones propuestas (tipo de calzado, buena o mala visibilidad y manos ocupadas o libres), se obtiene un total de 192 combinaciones posibles, tal y como se indica de manera detallada en la Tabla III-8.

Tabla III-8 Listado detallado de combinaciones de estudio, para los ensayos con personas

nº de combinaciones	Niveles de Caudal [l/s]	Pendiente longitudinal I <sub>y</sub> [%]	Calzado	Condiciones de visibilidad	Manos ocupadas
192	300, 375, 450 y 550	4, 6, 8 y 10	Botas de agua	Buena	No
			Botas de agua	Mala	No
			Botas de agua	Buena	Si
			Botas de agua	Mala	Si
			Zapatos	Buena	No
			Zapatos	Mala	No
			Zapatos	Buena	Si
			Zapatos	Mala	Si
			Chanclas	Buena	No
			Chanclas	Mala	No
			Chanclas	Buena	Si
			Chanclas	Mala	Si

Se trata por tanto de 12 combinaciones por cada caudal y pendiente longitudinal. Se proponen sesiones experimentales de 48 ensayos para cada persona, que suponen las combinaciones de una pendiente, cuatro caudales y los 12 casos propuestos por cada caudal. El número total de ensayos realizados finalmente fue de 2,345 realizado en 35 sesiones, participando en éstos un total de 26 personas, 16 de las cuales de género femenino y 10 de género masculino, entre los que se incluían 5 niños con edades comprendidas entre 6 y 15 años.

### III.6. Perfil de personas ensayadas

La elección de las personas ensayadas se basa en un doble objetivo:

1. En primer lugar focalizar la atención en aquellas personas que presenten características físicas (peso y altura) que previsiblemente vayan a generar situaciones de inestabilidad, de acuerdo con los resultados obtenidos por Russo (2009).
2. En segundo lugar, ofrecer una muestra lo más representativa posible, en cuanto a género, edad, peso y altura.

En base a estos criterios se presenta la \*Se incluye un sobrepeso de 3kg por el equipo de seguridad, donde se recogen las características de las personas ensayadas en esta campaña experimental.

**Tabla III-9** Características de las personas ensayadas

<b>Id.</b>	<b>Género</b>	<b>Edad</b>	<b>Peso [kg]*</b>	<b>Altura [m]</b>
1	Femenino	21	52	1.57
2	Masculino	30	56	1.70
3	Femenino	33	56	1.59
4	Femenino	29	65	1.67
5	Femenino	37	61	1.65
6	Femenino	30	58	1.69
7	Femenino	20	58	1.70
8	Femenino	23	61	1.58
9	Femenino	21	51	1.61
10	Femenino	32	63	1.66
11	Femenino	55	65	1.70
12	Masculino	30	69	1.65
13	Masculino	37	67	1.69
14	Femenino	24	53	1.61
15	Masculino	15	48	1.69
16	Masculino	13	53	1.71
17	Masculino	11	68	1.71
18	Femenino	24	48	1.65
19	Masculino	22	71	1.57
20	Femenino	39	55	1.62
21	Masculino	9	42	1.49
22	Masculino	6	37	1.32
23	Femenino	33	61	1.73
24	Femenino	29	59	1.68
25	Masculino	29	66	1.66
26	Femenino	24	52	1.5

\*Se incluye un sobrepeso de 3kg por el equipo de seguridad

Se trata por tanto de una muestra de 26 personas, entre los cuales 16 mujeres, 5 hombres y 5 niños. El rango de edad está comprendido entre 6 y 55 años, el peso entre 37 y 71 kg y la altura entre 1.32 y 1.73 m.

### III.7. Características de la campaña experimental y protocolo de ensayos

La campaña experimental se ha llevado a cabo a partir de 35 sesiones de laboratorio, entre las cuales algunas se centraban en el ensayo de una única persona y otras se centraban en el ensayo de dos personas. Algunas personas fueron ensayadas para varias pendientes longitudinales del modelo y otras para una única pendiente, en función de la disponibilidad de las personas. Se ha procurado en la medida de lo posible (inclemencias meteorológicas e indisponibilidades de las personas) el ensayo de 4 caudales para cada una de las pendientes. Las características de las sesiones para cada persona, en cuanto a la pendiente y nivel de caudal, se recogen en la Tabla III–10.

Tabla III–10 Sesiones experimentales llevadas a cabo

Id.	Género	Edad	Peso [kg]*	Altura [m]	Sesión**	Pendiente				Nivel de Caudal				
						4	6	8	10	300	375	450	550	
1	Femenino	21	52	1.57	1	x						x		
2	Masculino	30	56	1.70	2.1	x						x		
3	Femenino	33	56	1.59	2.2	x						x		
4	Femenino	29	65	1.67	3.1	x				x	x	x	x	
5	Femenino	37	61	1.65	3.2	x				x	x	x	x	
6	Femenino	30	58	1.69	4.1	x					x	x	x	
7	Femenino	20	58	1.70	4.2	x					x	x	x	
1	Femenino	21	52	1.57	5	x				x	x			x
2	Masculino	30	56	1.70	6	x				x	x			x
8	Femenino	23	61	1.58	7	x				x	x	x	x	
9	Femenino	21	51	1.61	8	x				x	x	x	x	
10	Femenino	32	63	1.66	9.1	x				x	x	x	x	
11	Femenino	55	65	1.70	9.2	x				x	x			x
12	Masculino	30	69	1.65	10	x				x	x	x	x	
3	Femenino	33	56	1.59	11.1	x				x	x			x
13	Masculino	37	67	1.69	11.2	x				x	x	x	x	
14	Femenino	24	53	1.61	12		x			x	x	x	x	x
15	Masculino	15	48	1.69	13.1		x			x	x	x	x	x
16	Masculino	13	53	1.71	13.2		x			x	x	x	x	x
5	Femenino	37	61	1.65	14.1		x			x	x	x	x	x
4	Femenino	29	65	1.67	14.2		x			x	x	x	x	x
10	Femenino	32	63	1.66	15.1		x			x	x	x	x	x
11	Femenino	55	65	1.70	15.2		x			x	x	x	x	x
6	Femenino	30	58	1.69	16.1		x			x	x	x	x	x
7	Femenino	20	58	1.70	16.2		x			x	x	x	x	x
8	Femenino	23	61	1.58	17.1		x			x	x			x
17	Masculino	11	68	1.71	17.2		x			x	x			x
18	Femenino	24	48	1.65	18		x			x	x	x	x	x
19	Masculino	22	71	1.57	19.1		x			x	x	x	x	x
8	Femenino	23	61	1.58	19.2		x					x		
12	Masculino	30	69	1.65	20.1		x			x	x	x	x	x
1	Femenino	21	52	1.57	20.2		x			x	x	x	x	x
20	Femenino	39	55	1.62	21		x			x	x	x	x	x
18	Femenino	24	48	1.65	22.1		x			x	x	x	x	x
12	Masculino	30	69	1.65	22.2		x					x	x	
3	Femenino	33	56	1.59	23.1		x			x	x	x	x	x
13	Masculino	37	67	1.69	23.2		x			x	x	x	x	x



Id.	Género	Edad	Peso [kg]*	Altura [m]	Sesión**	Pendiente				Nivel de Caudal			
						4	6	8	10	300	375	450	550
14	Femenino	24	53	1.61	24			x		x	x	x	x
6	Femenino	30	58	1.69	25.1			x		x	x	x	x
7	Femenino	20	58	1.70	25.2			x		x	x	x	x
21	Masculino	9	42	1.49	26.1			x		x	x	x	x
22	Masculino	6	37	1.32	26.2			x		x			
23	Femenino	33	61	1.73	27			x		x	x	x	x
4	Femenino	29	65	1.67	28.1			x		x	x	x	x
5	Femenino	37	61	1.65	28.2			x		x	x	x	x
15	Masculino	15	48	1.69	29.1		x			x	x	x	x
16	Masculino	13	53	1.71	29.2		x			x	x	x	x
12	Masculino	30	69	1.65	30		x			x	x	x	x
24	Femenino	29	59	1.68	31.1		x			x	x	x	x
4	Femenino	29	65	1.67	31.2		x			x	x	x	x
1	Femenino	21	52	1.57	32.1		x			x	x	x	x
18	Femenino	24	48	1.65	32.2		x			x	x	x	x
25	Masculino	29	66	1.66	33.1		x			x	x	x	x
26	Femenino	24	52	1.5	33.2		x			x			
8	Femenino	23	61	1.58	34.1		x			x	x	x	x
26	Femenino	24	52	1.5	34.2		x				x	x	x
3	Femenino	33	56	1.59	35.1		x					x	x
23	Femenino	33	61	1.73	35.2		x					x	x

\*Se incluye un sobrepeso de 3kg por el equipo de seguridad

\*\*Ejemplo: Sesión 2.1 indica que fue la primera persona ensayada en esa sesión, y 2.2 indica que esa persona se ensayó en segundo lugar

A su vez se tuvieron en cuenta las combinaciones de calzado, visibilidad y manos ocupadas descritas anteriormente (Tabla III–8), y que en la Tabla III–11 y Tabla III–12 se asocian aquellas tenidas en cuenta a cada sesión y para cada persona ensayada.

**Tabla III–11** Combinaciones llevadas a cabo para cada persona, en cada una de las sesiones para los niveles de caudal de 300 l/s y 375 l/s

Id.	Sesión	Q≈300l/s						Q≈375l/s												
		Buena Visibilidad			Mala Visibilidad			Buena Visibilidad			Mala Visibilidad									
		1*	2*	3*	4*	5*	6*	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
1	1																			
2	2.1																			
3	2.2																			
4	3.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5	3.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	4.1																			
7	4.2																			
1	5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
8	7	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
9	8	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
10	9.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
11	9.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
12	10	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	11.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Id.	Sesión	Q≈300l/s						Q≈375l/s														
		Buena Visibilidad			Mala Visibilidad			Buena Visibilidad			Mala Visibilidad											
		1*	2*	3*	4*	5*	6*	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6			
13	11.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
14	12	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
15	13.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
16	13.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5	14.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	14.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
10	15.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
11	15.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	16.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
7	16.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
8	17.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
17	17.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
18	18	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
19	19.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
8	19.2																					
12	20.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
1	20.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
20	21	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
18	22.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
12	22.2																					
3	23.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
13	23.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
14	24	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	25.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
7	25.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
21	26.1	x	x			x	x	x	x		x	x	x	x		x	x	x	x		x	x
22	26.2								x													
23	27	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	28.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5	28.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
15	29.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
16	29.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
12	30	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
24	31.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	31.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
1	32.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
18	32.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
25	33.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
26	33.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
8	34.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
26	34.2																					
3	35.1																					
23	35.2																					

**Tabla III–12** Combinaciones llevadas a cabo para cada persona, en cada una de las sesiones para los niveles de caudal de 450 l/s y 550 l/s

Id.	Sesión	Q≈450l/s						Q≈550l/s												
		Buena Visibilidad			Mala Visibilidad			Buena Visibilidad			Mala Visibilidad									
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
1	1	x		x		x	x	x		x		x								
2	2.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							
3	2.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							
4	3.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5	3.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	4.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
7	4.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
1	5													x	x	x	x	x	x	x
2	6													x	x	x	x	x	x	x
8	7	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
9	8	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
10	9.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
11	9.2													x	x	x	x	x	x	x
12	10	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	11.1													x	x	x	x	x	x	x
13	11.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
14	12	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
15	13.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
16	13.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5	14.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	14.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
10	15.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
11	15.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	16.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
7	16.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
8	17.1															x	x	x		x
17	17.2																x	x		x
18	18	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
19	19.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
8	19.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x									
12	20.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
1	20.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
20	21	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
18	22.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
12	22.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	23.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
13	23.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
14	24	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	25.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
7	25.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
21	26.1	x	x			x	x	x	x			x	x	x	x			x	x	x
22	26.2																			
23	27	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	28.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5	28.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Id.	Sesión	Q≈450l/s						Q≈550l/s														
		Buena Visibilidad			Mala Visibilidad			Buena Visibilidad			Mala Visibilidad											
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6			
15	29.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
16	29.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
12	30	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
24	31.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	31.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
1	32.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
18	32.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
25	33.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
26	33.2																					
8	34.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
26	34.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	35.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
23	35.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

- \*(1) Individuo con calzado tipo botas de agua
- \*(2) Individuo con calzado tipo botas de agua y manos ocupadas
- \*(3) Individuo con calzado tipo zapato de tacón (mujer) zapato sin tacón (hombre)
- \*(4) Individuo con calzado tipo zapato de tacón (mujer) zapato sin tacón (hombre) y manos ocupadas
- \*(5) Individuo con calzado tipo chanclas
- \*(6) Individuo con calzado tipo chanclas y manos ocupadas

Cada uno de los ensayos consistía en el mismo protocolo llevado a cabo en los estudios de Russo (2009), por el que cada persona ensayada debía caminar por el agua que circulaba por el modelo en tres direcciones, transversal, diagonal y longitudinalmente según la dirección del flujo, a partir de un punto de origen (0\*) e ingresando en el agua desde el bordillo en seco. En la Figura III-38, se indican de manera esquemática los trayectos descritos por cada persona, siendo 0\* el punto de ingreso al agua y 0 el punto dentro del agua al que se regresaba siempre, tras desplazarse hasta 1, 2 y 3 sucesivamente. La ubicación del punto 0 corresponde con la posición de la sección de estudio o de referencia en la que se realizó la campaña de medidas de velocidad mediante el vectrino.

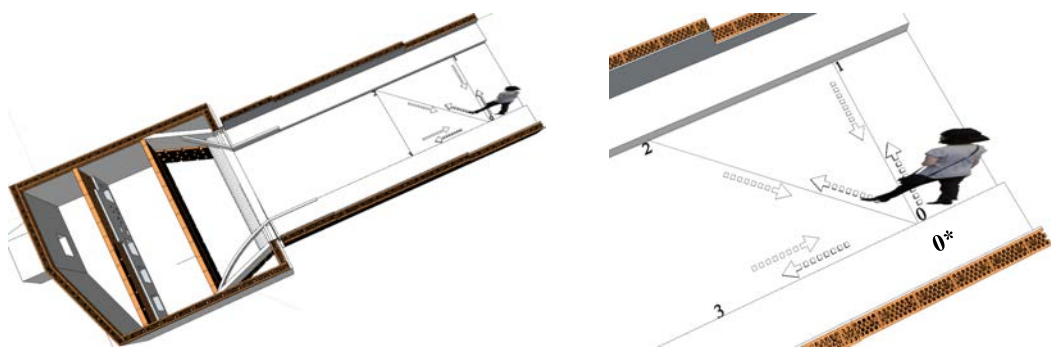


Figura III-38. Protocolo de ensayos

Cada persona ensayada usaba un equipo de seguridad, compuesto por casco y arnés, que suponía un incremento del peso de unos 3 kg. Este sobrepeso será tenido en cuenta como peso de la persona ensayada a la hora de evaluar los resultados obtenidos. La carga adicional en el caso de los ensayos con las manos ocupadas no es significativa y no es tomada en cuenta como sobrepeso.

El objetivo de este caso es evaluar el comportamiento de la persona cuando no dispone las manos libres para poder sujetarse en caso de inestabilidades.

Una vez la persona ensayada realizaba el protocolo 12 veces (número de combinaciones de calzado, buena y mala visibilidad y manos ocupadas y libres) para un mismo caudal, se incrementaba el caudal para volver a realizar el protocolo otras 12 veces para cada nuevo caudal. Como se comentó anteriormente, se trata de un total de 48 situaciones de ensayo para cada persona en una misma sesión experimental.

Todos y cada uno de los ensayos han sido recogidos en grabaciones de video (2,345 archivos codificados adecuadamente) para, una vez finalizada la campaña, poder ser analizados uno a uno y clasificar cada situación de acuerdo a su nivel de peligrosidad. Según el estado de la cuestión los niveles de peligrosidad suelen clasificarse en peligrosidad baja, media y alta, como también se hizo en los estudios de Russo (2009) y como se propone en el presente estudio. La clasificación de los niveles de peligrosidad baja y media presenta una gran subjetividad a diferencia de la clasificación de peligrosidad alta que se ha establecido cuando la persona pierde por completo la estabilidad. Además, algunos autores (Price *et al.*, 2008) introducen el concepto de “ansiedad” en relación a los eventos de inundaciones en zonas urbanas. Price *et al.* (2008) asumen que la ansiedad es una función polinómica no lineal del calado de la inundación y relacionan el calado y la inundación a los daños causados por los eventos de inundación. También demostraron una relación de dependencia entre la ansiedad y la duración de la inundación. El fenómeno de la ansiedad no fue claramente definido por los autores, y en el presente estudio, así como en el realizado por Russo (2009), se asumió como “sensación de peligro” propia de la persona ensayada pero no directamente relacionada a una clara situación de peligrosidad. En este sentido se han realizado encuestas a las personas ensayadas para analizar también la peligrosidad desde el punto de vista de la propia persona que se ve envuelta en la situación de cruzar una calle por la que circula agua. En el próximo apartado se recoge la Tabla III–16 en la que se resumen las respuestas de los encuestados de manera generalizada.

En base a lo comentado anteriormente, la clasificación de cada uno de los casos experimentales llevados a cabo se realizó según los siguientes criterios:

- **Peligrosidad alta:** únicamente aquellos experimentos en los que la persona perdió por completo la estabilidad
- **Peligrosidad media:** La persona ensayada mostró una clara dificultad para llevar a cabo el protocolo completo. Se observa un gran esfuerzo por parte del individuo. Lentitud, tropiezos puntuales, resbalones, pérdidas del calzado son otras características tenidas en cuenta en la clasificación de este nivel de peligrosidad
- **Peligrosidad baja:** Pequeñas o nulas inestabilidades. La persona ensayada realiza el protocolo al completo sin complicaciones ni esfuerzos significativos

Los ensayos se realizaron con cierta aleatoriedad, de manera que no todas las personas ensayaron el mismo número de sesiones ni la misma secuencia de caudales, y se procuró una separación temporal entre ellas de varias semanas para evitar en la medida de lo posible la adquisición de “experiencia” tal y como describió Abt *et al.* (1989).

### III.8. Resultados experimentales

En este apartado se recogen y analizan los resultados obtenidos en la campaña experimental sobre estabilidad de personas llevada a cabo. Como se comentó anteriormente, todos los ensayos fueron registrados en archivos de video, y para una correcta y ágil gestión de los múltiples casos a evaluar se realizó una base de datos mediante Microsoft Access (Figura III-39). El formulario de dicha base de datos presenta los enlaces a cada uno de los videos junto a los cuales se encuentra una casilla desplegable para elegir el nivel de peligrosidad (H: alta, M: media o L: baja). De esta manera, una vez estudiados los videos y evaluada la peligrosidad en cada uno de ellos, se exportaron los datos a Microsoft Excel para realizar el tratamiento de dichos datos. Cada uno de los casos, junto a su nivel de peligrosidad fue relacionado a las variables hidráulicas correspondientes a dicho caso.

**DataBase Pedestrian Stability Experiments**

Author: Eduardo Martinez Gomariz  
eduardo.martinez-gomariz@upc.edu

**PEDESTRIAN FEATURES**

Id: 23, Weight (kg): 58.00, First Name: , Surname: , Gender: Female, Age: 33, Weight+Loads (kg): 61.00, Height (m): 1.73, WeightxHeight (kgxm): 100.34

**EXPERIMENTS CONDITIONS**

Session: 27, Date: 11-jul-14, Discharge 1: 300, Discharge 2: 300, Discharge 3: 300, Discharge 4: 300

**TESTS COMBINATIONS**

Discharge: 300 l/s				Discharge: 375 l/s				Discharge: 450 l/s				Discharge: 550 l/s			
Visibility Conditions				Visibility Conditions				Visibility Conditions				Visibility Conditions			
Good	Hazard*	Bad	Hazard*	Good	Hazard*	Bad	Hazard*	Good	Hazard*	Bad	Hazard*	Good	Hazard*	Bad	Hazard*
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Combinations codes:  
 Example: 300GV1: 300(discharge in l/s)-GV(Good Visibility conditions)-1(Waterproof boots)  
 450BV1: 450(discharge in l/s)-BV(Bad Visibility conditions)-5(Flip-flops)  
 XXXYY1: Waterproof boots  
 XXXYY2: Waterproof boots and hands occupied  
 XXXYY3: Shoes (Male) or heeled shoes (Female)  
 XXXYY4: Shoes (Male) or heeled shoes (Female) and hands occupied  
 XXXYY5: Flip-flops  
 XXXYY6: Flip-flops and hands occupied

HAZARD, VULNERABILITY AND RISK RELATED TO EXTREME RAINFALL EVENTS IN URBAN AREAS

Figura III-39. Base de datos de los ensayos sobre estabilidad para peatones

Los rangos de las variables hidráulicas evaluadas fueron los siguientes:

- Calado medio ( $\bar{y}$ ) (cm): 5.3 a 14
- Calado máximo ( $y_{max}$ ) (cm): 6.9 a 15.6
- Velocidad ( $v$ ) (m/s): 2.14 a 3.70\*
- Producto ( $v \cdot \bar{y}$ ) (m<sup>2</sup>/s): 0.17 a 0.35
- Producto ( $v \cdot y_{max}$ ) (m<sup>2</sup>/s): 0.22 a 0.40
- Producto ( $v^2 \cdot \bar{y}$ ) (m<sup>3</sup>/s<sup>2</sup>): 0.39 a 1.25
- Producto ( $v^2 \cdot y_{max}$ ) (m<sup>3</sup>/s<sup>2</sup>): 0.46 a 1.47

\*Se trata de la velocidad media ( $\bar{v}$  [III-10]) definida en apartados anteriores.

De un total de 2,345 casos evaluados, se han definido 38 casos con peligrosidad elevada, que suponen un 1.6% del total, aunque hay que tener en cuenta que únicamente se han considerado como peligrosidad alta los casos en los cuales la persona perdía por completo la estabilidad. En varias ocasiones de peligrosidad media se observaban grandes dificultades por mantener la estabilidad, pero se ha preferido ser riguroso con dicha evaluación. En la Tabla III–13 se muestra la cantidad de casos evaluados en cada uno de los niveles de peligrosidad.

**Tabla III–13** Cantidad de casos según el nivel de peligrosidad evaluado

	TOTAL		
<b>Peligrosidad Baja</b>	1,528	65.2%	<b>Peligrosidad Baja</b> 65.2%
<b>Peligrosidad Media</b>	779	33.2%	<b>Peligrosidad Media</b> 33.2%
<b>Peligrosidad Alta</b>	38	1.6%	<b>Peligrosidad Alta</b> 1.6%
<b>Total</b>	2,345	100.0%	




A continuación, en la Tabla III–14, se muestra el listado de los casos y características de las personas que sufrieron situaciones de peligrosidad alta.

**Tabla III–14** Casos en los que se han producido situaciones de peligrosidad alta

Id.	H·P' [m]	Altura H [m]	Peso P' [kg]	Edad [años]	Comb.	Visib.	$\bar{y}$ [m]	$y_{max}$ [m]	v[m/s]
21	62.58	1.49	42	9	1	BV	0.097	0.113	3.45
21	62.58	1.49	42	9	6	BV	0.097	0.113	3.45
21	62.58	1.49	42	9	1	MV	0.087	0.103	3.24
21	62.58	1.49	42	9	1	MV	0.097	0.113	3.45
21	62.58	1.49	42	9	2	MV	0.097	0.113	3.45
21	62.58	1.49	42	9	6	MV	0.097	0.113	3.45
26	78.00	1.50	52	24	1	BV	0.107	0.123	2.31
26	78.00	1.50	52	24	5	BV	0.107	0.123	2.31
26	78.00	1.50	52	24	3	MV	0.085	0.101	2.14
26	78.00	1.50	52	24	5	MV	0.107	0.123	2.31
18	79.20	1.65	48	24	5	MV	0.091	0.107	3.70
18	79.20	1.65	48	24	6	MV	0.069	0.085	3.50
1	81.64	1.57	52	21	5	BV	0.107	0.123	2.31
14	85.33	1.61	53	24	2	BV	0.072	0.088	3.30
14	85.33	1.61	53	24	2	BV	0.097	0.113	3.45
14	85.33	1.61	53	24	6	BV	0.069	0.085	3.50
14	85.33	1.61	53	24	6	MV	0.087	0.103	3.24
3	89.04	1.59	56	33	4	MV	0.097	0.113	3.45
3	89.04	1.59	56	33	4	MV	0.140	0.156	2.46
3	89.04	1.59	56	33	5	MV	0.097	0.113	3.45
3	89.04	1.59	56	33	6	MV	0.097	0.113	3.45
16	90.63	1.71	53	13	6	BV	0.091	0.107	3.70
16	90.63	1.71	53	13	2	MV	0.069	0.085	3.50
16	90.63	1.71	53	13	6	MV	0.091	0.107	3.70
7	98.60	1.70	58	20	5	BV	0.053	0.069	3.25
24	99.12	1.68	59	29	5	MV	0.114	0.130	2.32
5	100.65	1.65	61	37	5	BV	0.091	0.107	3.70
5	100.65	1.65	61	37	6	BV	0.091	0.107	3.70

Id.	H·P' [m]	Altura H [m]	Peso P' [kg]	Edad [años]	Comb.	Visib.	$\bar{y}$ [m]	$y_{max}$ [m]	v[m/s]
5	100.65	1.65	61	37	6	MV	0.091	0.107	3.70
23	105.53	1.73	61	33	5	MV	0.087	0.103	3.24
23	105.53	1.73	61	33	5	MV	0.097	0.113	3.45
4	108.55	1.67	65	29	5	BV	0.113	0.129	2.50
4	108.55	1.67	65	29	6	BV	0.091	0.107	3.70
4	108.55	1.67	65	29	5	MV	0.069	0.085	3.50
4	108.55	1.67	65	29	6	MV	0.080	0.096	3.51
25	109.56	1.66	66	29	6	BV	0.140	0.156	2.46
17	116.28	1.71	68	11	6	BV	0.091	0.107	3.70
17	116.28	1.71	68	11	6	MV	0.091	0.107	3.70

A modo de ejemplo, en la Figura III-40, se recogen instantes de algunas de las inestabilidades de las personas ensayadas, así como la información de las condiciones hidráulicas que se daban en ese momento y las características de la persona que sufre la inestabilidad.

		<b>Id:</b> 26 H·P' (kg·m): 78 Altura H (m): 1.50 Peso P (kg): 52 Edad (años): 24 Combinación: 5 Visibilidad: Buena $\bar{y}$ [m]: 0.107 $y_{max}$ [m]: 0.123 v[m/s]: 2.31
		<b>Id:</b> 21 H·P' (kg·m): 62.5 Altura H (m): 1.49 Peso P (kg): 42 Edad (años): 9 Combinación: 1 Visibilidad: Mala $\bar{y}$ [m]: 0.087 $y_{max}$ [m]: 0.103 v[m/s]: 3.24
		<b>Id:</b> 24 H·P' (kg·m): 99.12 Altura H (m): 1.68 Peso P (kg): 59 Edad (años): 29 Combinación: 5 Visibilidad: Mala $\bar{y}$ [m]: 0.114 $y_{max}$ [m]: 0.130 v[m/s]: 2.32
		<b>Id:</b> 23 H·P' (kg·m): 105.53 Altura H (m): 1.73 Peso P (kg): 61 Edad (años): 33 Combinación: 5 Visibilidad: Mala $\bar{y}$ [m]: 0.087 $y_{max}$ [m]: 0.103 v[m/s]: 3.24



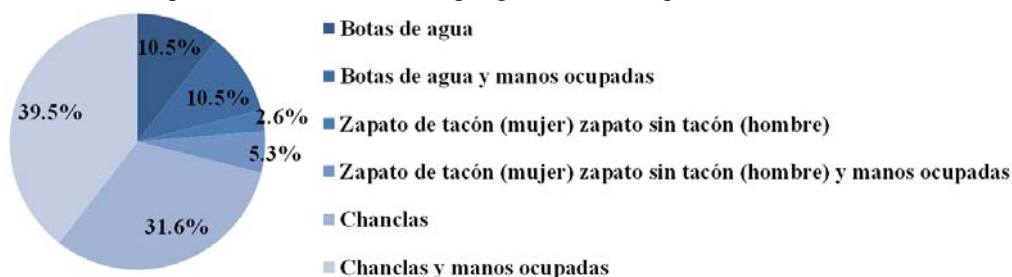


**Figura III-40.** Ejemplos de inestabilidades de personas producidas durante los ensayos experimentales

Se ha realizado también el desglose de los casos de peligrosidad según las diferentes combinaciones tenidas en cuenta, así como la influencia de la visibilidad. En la Tabla III-15 se observa como la influencia de la visibilidad no es significativa y como claramente las inestabilidades producidas usando chanclas son predominantes, con más de un 65% de las situaciones.

A su vez, para la evaluación de la peligrosidad, se ha tenido en cuenta la visión de la propia persona que se ve sometida a los efectos del flujo de agua, realizando una encuesta sobre varios aspectos fundamentales de sus propias sensaciones. Estas consultas se han realizado por persona y sesión experimental, con lo que algunas personas han podido realizar la encuesta en más de una ocasión. Dicho análisis ha consistido en 34 encuestas sobre un total de 58, es decir una participación del 59% del total. Los aspectos consultados, respuestas generales y las observaciones de las propias personas, si las hubiere, se recogen en la Tabla III-16.

**Tabla III–15** Reparto de las situaciones de peligrosidad alta según los diferentes casos de estudio



n°	%	BV*	%	MV**	%	
4	10.5%	2	12.5%	2	9.1%	<b>Botas de agua</b>
4	10.5%	2	12.5%	2	9.1%	<b>Botas de agua y manos ocupadas</b>
1	2.6%	0	0.0%	1	4.5%	<b>Zapato de tacón (mujer) zapato sin tacón (hombre)</b>
2	5.3%	0	0.0%	2	9.1%	<b>Zapato de tacón (mujer) zapato sin tacón (hombre) y manos ocupadas</b>
12	31.6%	5	31.3%	7	31.8%	<b>Individuo con calzado tipo chanclas</b>
15	39.5%	7	43.8%	8	36.4%	<b>Individuo con calzado tipo chanclas y manos ocupadas</b>
<b>38</b>		<b>16</b>		<b>22</b>		<b>TOTAL</b>

\*BV: Buena Visibilidad/ \*\*MV: Mala Visibilidad

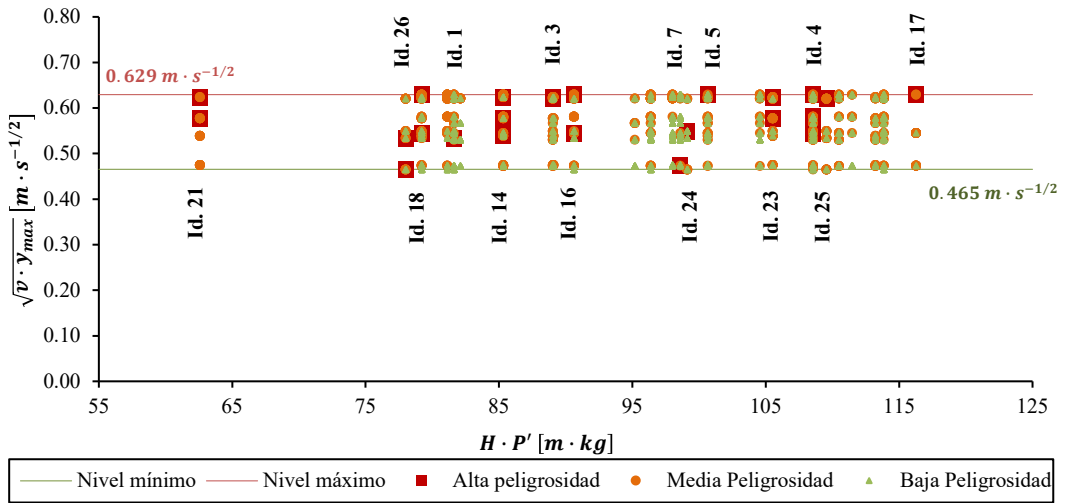
**Tabla III–16** Resumen de los resultados de las encuestas realizadas a las personas ensayadas

Aspecto	Respuestas generales	Observaciones
<b>Molestia del equipo de seguridad: casco, arnés, impermeable y cinturón</b>	Todos los encuestados coinciden en que no era muy molesto y no les impedía realizar el ensayo naturalmente.	El arnés daba seguridad ya que podía agarrarme a la cuerda. Molestias al realizar cambios de dirección.
<b>Duración de los ensayos</b>	La gran mayoría de los encuestados afirman que el tiempo de los ensayos fue equilibrado, lo cual descarta la posible influencia de la fatiga.	Más tiempo se hubiera hecho pesado. Hubiera hecho más si hubiera sido necesario. El calor del sol me generó cierta fatiga.
<b>Adquirir experiencia</b>	La gran mayoría sentía que adquiría experiencia con los ensayos, y eso les hacía realizarlos con mayor seguridad.	Al inicio fue mucho más difícil que al final. La experiencia adquirida no era muy significativa. El aprendizaje era importante sobre todo en el uso de las chanclas, pues la manera de colocar el pie era fundamental para mantener la estabilidad. A pesar de aumentar el caudal, me sentía más seguro/a en ensayos sucesivos. La inseguridad del principio era debida más al desconocimiento que a la posible fuerza del agua.
<b>Calzado con mayor inseguridad</b>	La mayoría coincide en que el calzado de mayor inseguridad son las chanclas, seguido de los zapatos. En ningún caso escogieron la opción botas de agua.	Influía el hecho de tener sensación de perder el calzado, sobre todo si no ajustaba demasiado. La poca experiencia en uso habitual de tacones influyó en cierta medida. En una situación real me hubiera quitado las chanclas Dedicas concentración a no perder la chancla y eso afecta también a la inestabilidad.
<b>Calzado con mayor seguridad</b>	Hay un reparto equitativo entre la elección de botas de agua y zapatos.	Zapatos y botas mucho más seguros que las chanclas Era mucho más fácil caminar con los zapatos en comparación a las botas porque no hay tanta superficie contra la que empuje el agua. Con tacones resultó ser más fácil de lo que esperaba El inconveniente de las botas es la gran

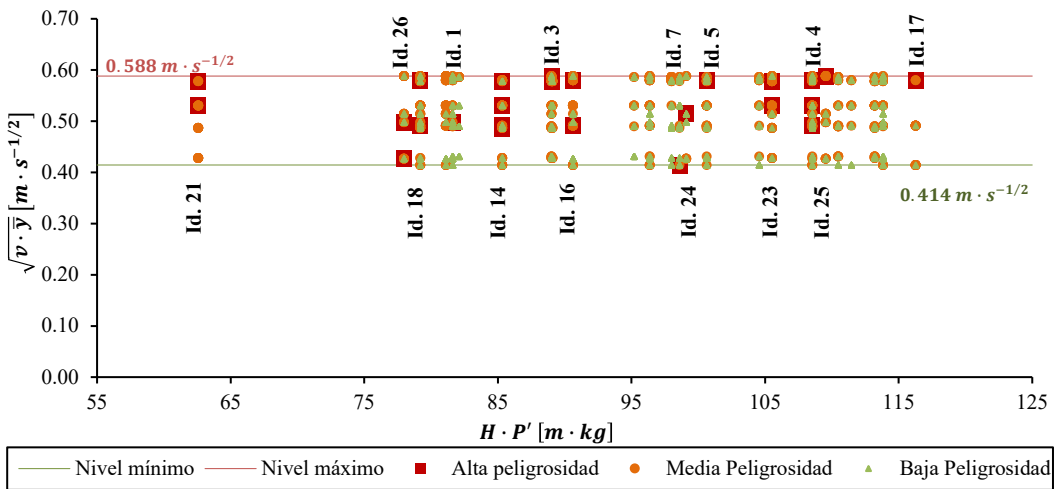
		resistencia que supone al avance del agua, pero aún y así era el calzado más cómodo, especialmente para las chicas.
<b>Seguridad en cuanto a la visibilidad y las manos ocupadas</b>	Todas las encuestas coinciden en que la mala visibilidad influía más que el hecho de tener las manos ocupadas.	La visibilidad afectaba bastante, creo que porque no me veía los pies. La mala visibilidad influía sobre todo al llegar al bordillo, pues no lo distingues bien. Con las manos ocupadas no notabas demasiada diferencia respecto a la situación de manos libres.
<b>Qué parte del protocolo presenta mayor dificultad</b>	La mayoría escogieron el cruce transversal, en dos casos fue escogido el trayecto longitudinal y en un solo caso se escogió el trayecto diagonal.	El recorrido transversal es donde es más posible que el agua te haga caer. El punto de inicio era el sitio de mayor inestabilidad, sobre todo al girar para cambiar de dirección.
<b>Qué parte del protocolo presenta menor dificultad</b>	El trayecto longitudinal fue el escogido por la mayoría como el más seguro, aunque algunos también indicaron que lo fue el diagonal.	Creo que influye el sentido del recorrido además de la dirección. Por ejemplo, me pareció más fácil el ascenso longitudinal que el descenso. En el longitudinal necesitaba hacer más fuerza, pero sentía más seguridad. Lo peor es que el agua te llegue de lado.
<b>Con qué caudal se inicia la sensación de inestabilidad</b>	La mayoría coincide en que el nivel de caudal de 450 l/s marca el inicio de sensación de inestabilidad. Algunos indican que se inicia con el nivel de caudal de 550 l/s.	Existe un salto significativo, en cuanto a seguridad. Noté mayor cambio al pasar de 375 l/s a 450 l/s que al pasar de 300 l/s a 375 l/s. Se nota especialmente al poner el primer pie.
<b>Aspecto</b>	<b>Respuestas generales</b>	
<b>Clasificación de la peligrosidad (alta, media o baja) para las diferentes combinaciones</b>	Para los dos primeros niveles de caudales, existe una mayoría que consideran peligrosidad baja para todas las combinaciones, excepto en el uso de chanclas en el que existe un reparto equitativo entre las tres peligrosidades. Para el caudal de 450 l/s más de la mitad consideran todos los casos peligrosidad media excepto el uso de chanclas que es considerado peligrosidad alta en la mayoría. Para el último nivel de caudal la mitad de los encuestados consideran peligrosidad alta para todas las combinaciones, excepto las chanclas que son consideradas de peligrosidad alta por la práctica totalidad de los encuestados.	
<b>Sensación al introducir el primer pie</b>	Todos se vieron sorprendidos al poner el pie en el agua por primera vez. No esperaban la fuerza de arrastre del agua.	
<b>Sorpresa con el calzado que más desestabiliza</b>	Más de la mitad se vieron sorprendidos por el calzado que les resultó más peligroso.	
<b>Influencia al entrar con el pie diestro o zurdo</b>	Prácticamente la totalidad de encuestados coinciden en que el entrar con uno u otro pie influye en la estabilidad al entrar al agua.	

Una vez realizado el análisis general de la peligrosidad de los casos y las sensaciones de las personas implicadas, se ha llevado a cabo un análisis más detallado presentando relaciones entre las diferentes variables y las características físicas de las personas ensayadas.

En primer lugar, tal y como Abt *et al.* (1989) propusieron en sus estudios, se presenta la relación entre la raíz cuadrada del producto velocidad por calado y el producto peso por altura de cada individuo. Habida cuenta que la sección transversal de la plataforma presenta pendiente transversal, se han considerado relaciones en las que se implica al calado medio ( $\bar{y}$ ) (Figura III-42) y en las que se implica al calado máximo ( $y_{max}$ ) (Figura III-41). El límite inferior, en cuanto a la raíz cuadrada del producto velocidad por calado, considerando el calado medio, es de  $0.414 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y el límite superior es de  $0.588 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Considerando el calado máximo, los límites inferior y superior son respectivamente  $0.465 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $0.629 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

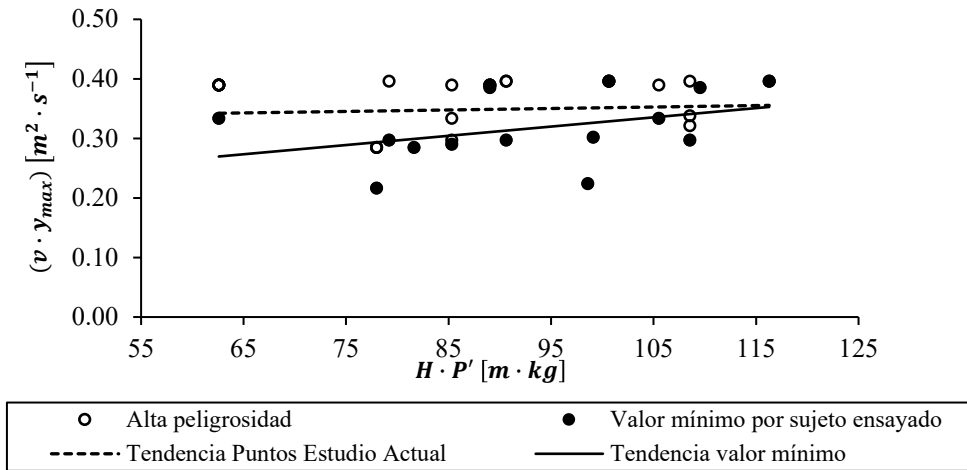


**Figura III-41.** Representación de todos los casos evaluados según alta, media y baja peligrosidad, relacionando la raíz del producto velocidad por calado máximo y el producto peso por altura de las personas ensayadas

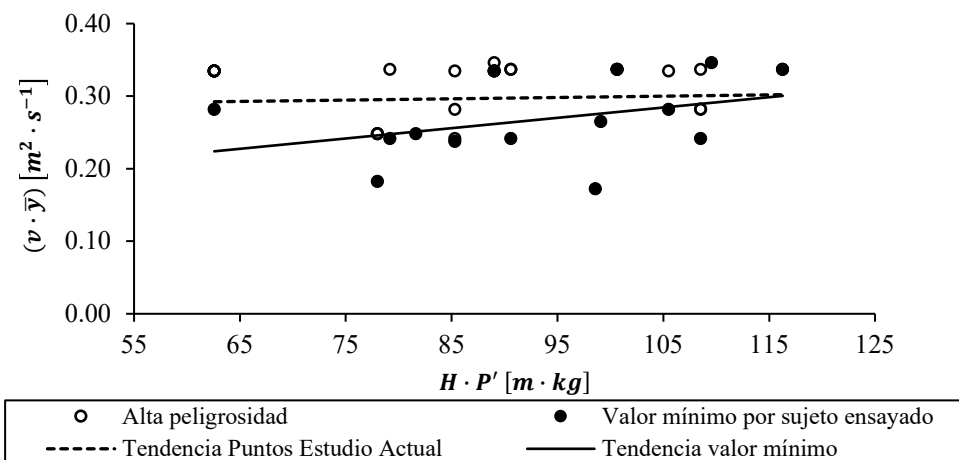


**Figura III-42.** Representación de todos los casos evaluados según alta, media y baja peligrosidad, relacionando la raíz del producto velocidad por calado medio y el producto peso por altura de las personas ensayadas

En esta primera representación se muestra la clasificación del nivel de peligrosidad para cada caso y para cada una de las personas ensayadas. Se indica el número identificador de cada una de las personas que al menos ha sufrido una pérdida de estabilidad. Se observa una ligera tendencia creciente de la raíz del producto velocidad por calado con el producto peso por altura de las personas. Esta tendencia se manifiesta más claramente en la Figura III-43 (considerando el calado máximo) y Figura III-44 (considerando el calado medio), en las que se representan únicamente las 38 situaciones de peligrosidad alta relacionando el producto velocidad por calado frente al producto peso por altura de los individuos.

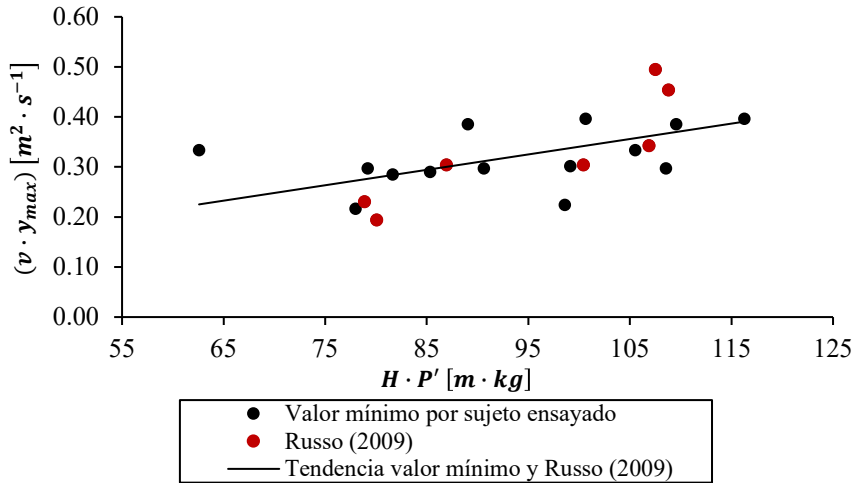


**Figura III-43.** Representación de los casos evaluados según peligrosidad alta, relacionando el producto velocidad por calado máximo y el producto peso por altura de las personas ensayadas



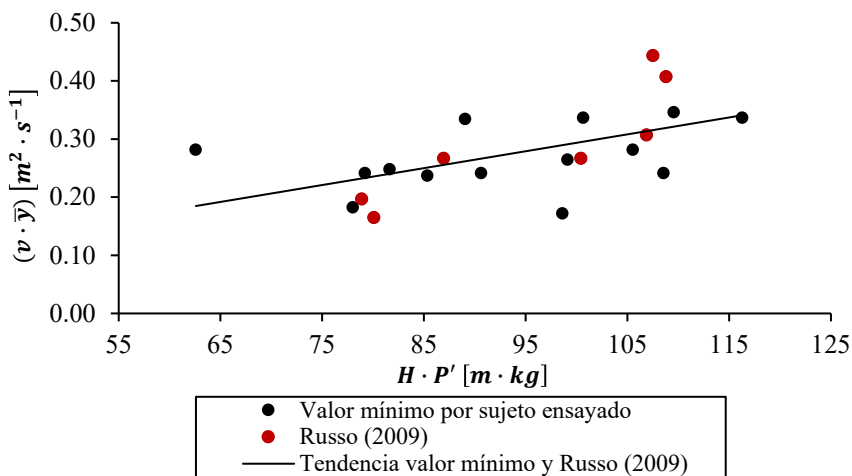
**Figura III-44.** Representación de los casos evaluados según peligrosidad alta, relacionando el producto velocidad por calado medio y el producto peso por altura de las personas ensayadas

De la misma manera que en los estudios de Abt *et al.* (1989) primero, y posteriormente en las representaciones de la Guía AR&R (Cox *et al.*, 2010), se observa una cierta tendencia creciente poco significativa cuando se consideran todos los puntos de inestabilidad, pero más clara cuando se consideran únicamente el menor de ellos para cada individuo. Al incluir los resultados de Russo (2009) junto con los obtenidos en este estudio se define una mayor pendiente de la recta de tendencia (Figura III-46 para calado medio y Figura III-45 para calado máximo).



**Figura III-45.** Representación de los casos evaluados según peligrosidad alta, así como los datos obtenidos por Russo (2009), relacionando el producto velocidad por calado máximo y el producto peso por altura de las personas ensayadas

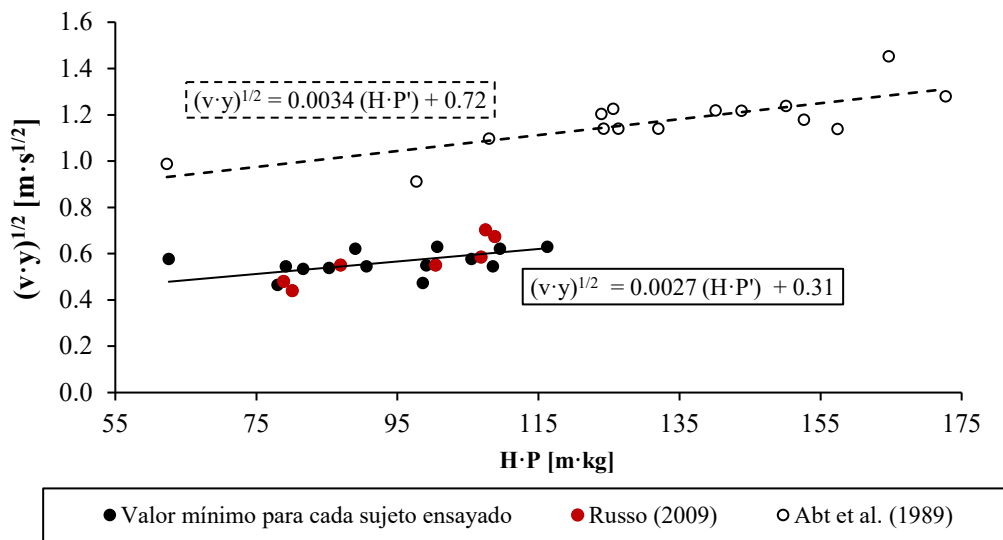
Los resultados de Russo (2009) responden a los valores inferiores de calado y velocidad para los que siete sujetos presentaron situaciones de peligrosidad alta durante sus ensayos experimentales. Al haber utilizado la misma plataforma de ensayos y mismas bombas de impulsión se producen unas condiciones hidráulicas muy similares. Por eso sus valores quedan incluidos entre la nube de puntos de alta peligrosidad obtenida en el presente estudio. Cuatro de sus puntos se ubican entre los límites mínimo y máximo del producto velocidad por calado del presente estudio, uno de ellos por debajo del límite inferior y dos por encima del límite máximo.



**Figura III-46.** Representación de los casos evaluados según peligrosidad alta, así como los datos obtenidos por Russo (2009), relacionando el producto velocidad por calado medio y el producto peso por altura de las personas ensayadas

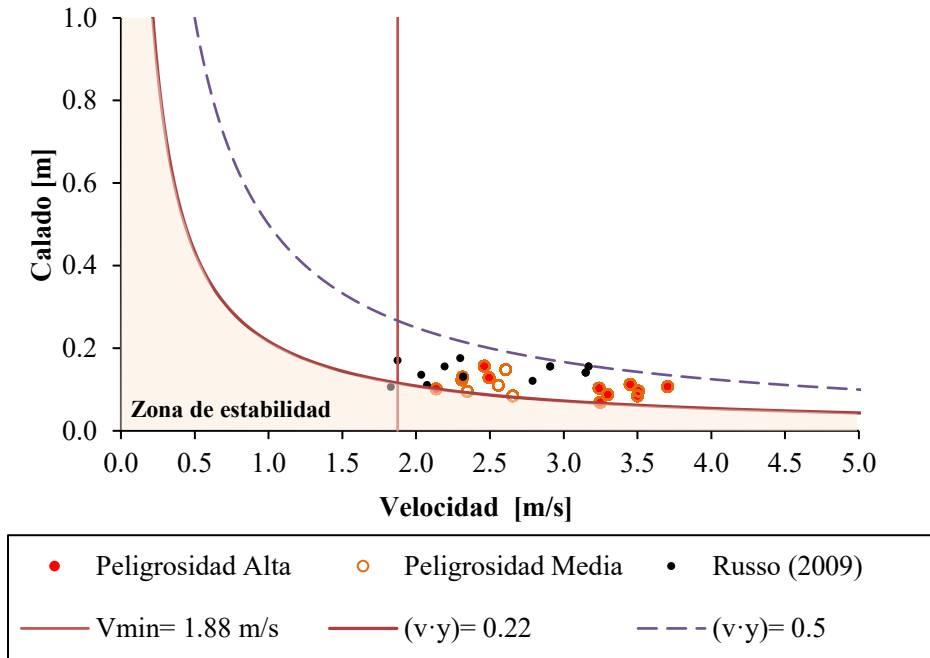
En los estudios de Abt *et al.* (1989) se obtuvo una relación de la raíz del producto velocidad por calado en función del producto peso (P) por altura (H) de una persona. Veinte sujetos fueron

ensayados, presentando pesos comprendidos entre 40.9 y 91.4 kg y alturas comprendidas entre 152 y 183 cm. Estos sujetos fueron sometidos a velocidades de flujo comprendidas entre 0.36 y 3.05 m·s<sup>-1</sup> y calados entre 0.49 y 1.2 m. Los ensayos de estabilidad se llevaron a cabo sobre cuatro tipos de superficies: hormigón, césped, gravas y acero; estableciendo dos pendientes en el canal de ensayos de 0.5 y 1.5%. Tal y como Abt *et al.* (1989) propusieron, en la Figura III-47 se representa la raíz cuadrada del producto velocidad por calado frente al producto altura (H) por peso (P) para cada una de las situaciones de inestabilidad, considerando únicamente el menor de los productos ( $v \cdot y$ ) para cada sujeto. En el mismo gráfico se presenta además el menor de los puntos de inestabilidad para los sujetos ensayados por Abt *et al.* (1989), pero exclusivamente los obtenidos sobre una superficie de hormigón, como es el caso del presente estudio. Se observa una evidente similitud en las tendencias ascendentes de la raíz cuadrada del producto velocidad por calado para mayores valores del producto altura (H) por peso (P) de cada sujeto en ambos estudios (Figura III-47). Sin embargo, los valores superiores del producto velocidad por calado en el estudio de Abt *et al.* (1989) se centran en mayor medida en inestabilidades por vuelco (mayores calados y menores velocidades) en contraste con las inestabilidades por deslizamiento que se produjeron en el presente estudio (mayores velocidades y menores calados).

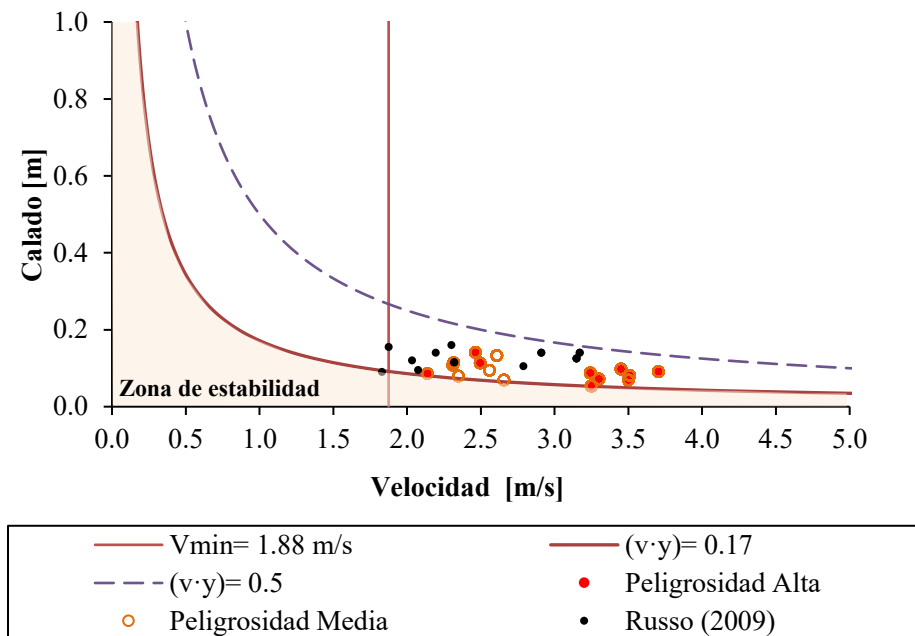


**Figura III-47.** Representación de la raíz cuadrada del producto ( $v \cdot y$ ) frente al producto ( $H \cdot P$ ) de los puntos de inestabilidad inferiores para cada sujeto ensayado en el presente estudio y en Abt *et al.* (1989)

Se representa también la función de relación entre calado y velocidad, tal y como diferentes autores han propuesto en los últimos años (Abt *et al.*, 1989; Reiter, 2000; Kelman, 2002), definiendo el límite inferior del producto velocidad por calado que delimita los valores (velocidad ( $x_i$ ), calado ( $y_i$ )) de las diferentes situaciones de peligrosidad alta evaluadas experimentalmente. La función límite inferior responde al producto ( $v \cdot \bar{y}$ ) =  $0.17 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  teniendo en cuenta el calado medio de la sección de estudio (Figura III-49) o ( $v \cdot y_{max}$ ) =  $0.22 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  teniendo en cuenta el calado máximo (Figura III-48) de la sección transversal del modelo de calle.



**Figura III-48.** Representación de las condiciones hidráulicas (velocidad y calado máximo) que han generado situaciones de peligrosidad alta, definición de la función velocidad por calado máximo que delimita la zona de estabilidad y comparativa con el criterio habitual de seguridad para personas

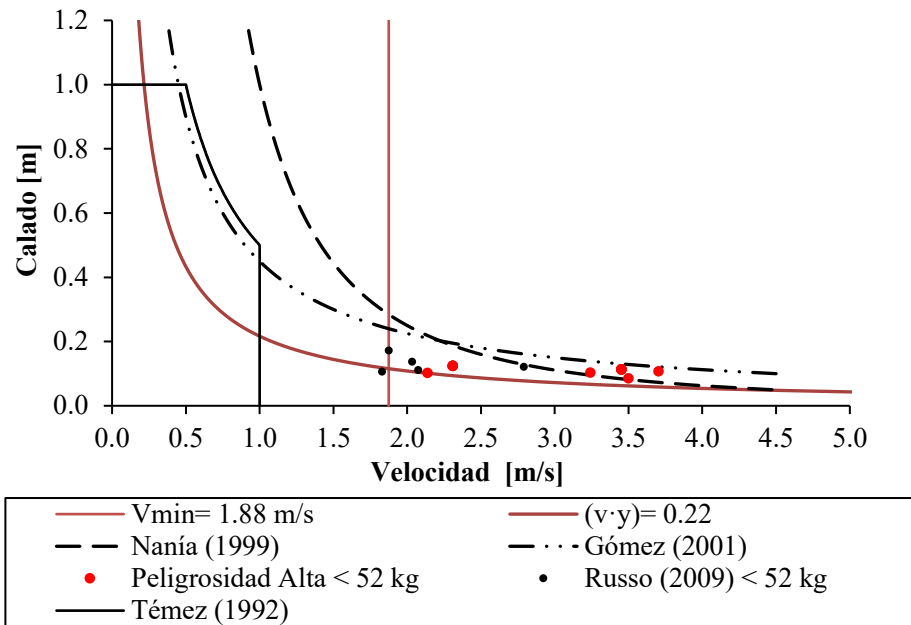


**Figura III-49.** Representación de las condiciones hidráulicas (velocidad y calado medio) que han generado situaciones de peligrosidad alta, definición de las funciones velocidad por calado medio que delimitan el dominio de estudio y comparativa con el criterio habitual de seguridad para personas



En ambas consideraciones, todos los puntos de inestabilidad estarían por encima de la curva  $(v \cdot y)$ , excepto un valor considerado por Russo (2009) pero que ya en sus estudios fue desestimado al tener en cuenta únicamente los puntos bajo el percentil 95. En este sentido, la velocidad mínima que produce una situación de inestabilidad es de 1.88 m/s evaluada en la campaña experimental de Russo (2009). Puesto que la consideración de peligrosidad alta en este estudio ha sido muy rigurosa, teniendo en cuenta únicamente los casos en los que la persona perdía por completo la estabilidad, se representan también los puntos obtenidos de situaciones de peligrosidad media.

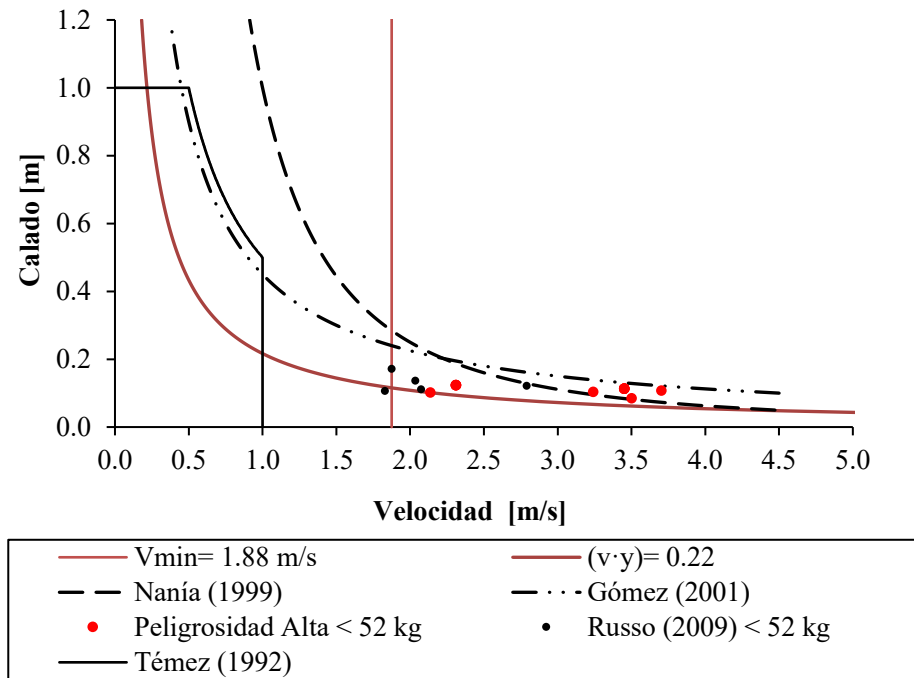
En el gráfico de la Figura III-50 y de la Figura III-51 se han representado algunas de las funciones umbral para la estabilidad de las personas en el agua, como el propuesto por Témez (1992), por Nanía (1999) y el estudio realizado por Gómez (2001). El primero (Témez, 1992) además acota la función  $v \cdot y = 0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  con una velocidad máxima de 1 m/s y un calado máximo de 1 m. El segundo (Nanía, 1999), define el criterio de deslizamiento que puede ser basado en diferentes pesos de la persona. Considerando en este caso el peso de la persona de 50 kg y un coeficiente de fricción entre caucho y hormigón húmedos igual a 0.5 (Gieck, 1981), con un coeficiente de seguridad de 2, la condición de estabilidad al deslizamiento fue definida como  $(v^2 \cdot y) \leq 1 \text{ m}^3/\text{s}^2$ . El tercero (Gómez, 2001) se llevó a cabo para el análisis del espaciamiento entre imbornales de la ciudad de Barcelona en el que se consideró la estabilidad al vuelco de un peatón para obtener un criterio de seguridad. Considerando al peatón como un sólido rígido, hipótesis que se cumple sólo de forma aproximada, el momento volcador será el provocado por la fuerza dinámica del flujo sobre el peatón, aplicada a una altura de la mitad del calado. El desarrollo de esta teoría, considerando un peso de la persona de 50 kg, llevó a proponer el criterio de estabilidad al vuelco de  $(v \cdot y) \leq 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$ .



**Figura III-50.** Representación de las condiciones hidráulicas (velocidad y calado máximo) que han generado situaciones de peligrosidad alta para personas de un peso en torno a 50 kg, definición de las funciones velocidad por calado máximo que delimitan el dominio de estudio y comparativa con los criterios de seguridad propuestos por Témez (1992), Nanía (1999) y Gómez (2001)

Representando únicamente los puntos de velocidad y calado que generan situaciones de peligrosidad alta, para personas de un peso en torno a 50 kg, es posible obtener conclusiones al comparar con las funciones también representadas y comentadas anteriormente.

En primer lugar los puntos representados están muy lejos de la zona de seguridad propuesta por Témez (1992), enfocada a situaciones de inundaciones en llanuras de inundación de ríos, siendo ésta por tanto excesivamente restrictiva, al menos en lo que se refiere a la estabilidad de personas en inundaciones de zonas urbanas causadas por la escorrentía. En cambio, estos puntos se encuentran en la zona de seguridad propuesta en Gómez (2001), tanto para el caso de considerar calado medio como calado máximo. En cuanto al criterio de Nanía (1999), todos los puntos de inestabilidad excepto dos se encuentran en la zona de seguridad, cuando se considera el calado medio. Considerando el calado máximo tres puntos de inestabilidad se encuentran por encima de la función de estabilidad, pero el resto se encuentran en la zona supuestamente estable. En cualquier caso, en este último criterio tampoco se garantizan las condiciones de seguridad necesarias según los resultados experimentales evaluados. En conclusión, ninguno de los criterios representados se adecúan a los puntos de inestabilidad obtenidos experimentalmente, ya sea por ser un límite excesivamente restrictivo (Témez, 1992), o por situarse éstos en la zona propuesta como segura (Gómez, 2001; Nanía, 1999).

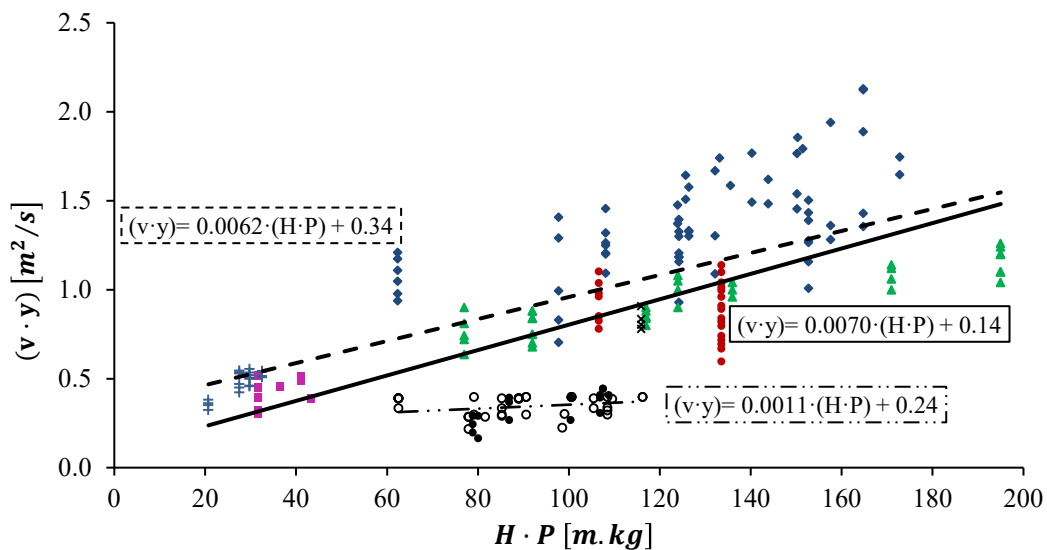


**Figura III-51.** Representación de las condiciones hidráulicas (velocidad y calado medio) que han generado situaciones de peligrosidad alta para personas de un peso en torno a 50 kg, definición de las funciones velocidad por calado medio que delimitan el dominio de estudio y comparativa con los criterios de seguridad propuestos por Témez (1992), Nanía (1999) y Gómez (2001)

La representación de la función  $(v \cdot y) = 0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , como umbral de seguridad para la estabilidad de personas habitual propuesto por diferentes autores (Abt *et al.*, 1989; Témez, 1992;

Gómez, 2001), junto a la representación de las funciones límite obtenidas en el presente estudio, nos ofrece la posibilidad de obtener conclusiones al respecto. Tanto en la consideración de calado medio como calado máximo en la sección del modelo de calle, el umbral de seguridad para los peatones ( $(v \cdot \bar{y}) = 0.17 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ó  $(v \cdot y_{max}) = 0.22 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) se encuentra significativamente por debajo de los valores habituales ( $(v \cdot y) = 0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Se puede concluir en este sentido que los criterios de evaluación de la peligrosidad del flujo en calles deben ser mucho más restrictivos que los que se venían teniendo en cuenta hasta el momento.

Finalmente se comparan los puntos obtenidos en el presente trabajo, con las gráficas propuestas en la Guía Australian Rainfall and Runoff (AR&R) que fue publicada, por Engineers Australia (EA), por primera vez en 1958 y ha sido una referencia en cuanto a directrices relacionadas con la ingeniería del agua para Australia. Tras la versión de la guía del año 1987 se propuso una revisión para responder a las necesidades más actuales. Dicha Guía, como ya se describió en el capítulo anterior, actualmente se compone de 21 proyectos que han ido actualizándose y publicándose en diferentes fechas, siendo de especial atención para este trabajo el proyecto n° 10, titulado “Criterios apropiados de seguridad para personas”, y publicado en abril del año 2010 (Cox *et al.*, 2010).



■ Foster & Cox	◆ Abt et al.
● Takahashi et al.	▲ Karvonen et al.
+ Yee	× Jonkman
● Russo (2009)	○ Estudio Actual
Capaña UPC completa	— — — Tendencia AR&R
— Tendencia AR&R + Russo (2009) + Estudio Actual	— · — Tendencia Estudio Actual + Russo (2009)

**Figura III-52.** Combinación de los resultados de diferentes autores incluyendo los resultados de Russo (2009) y los propios del presente estudio, representando el producto velocidad por calado ( $v \cdot y$ ) frente al producto Altura por Peso ( $H \cdot P$ ) de las personas ensayadas. Se incluye la regresión lineal de los datos originales así como la modificada con la inclusión de los resultados de Russo (2009) y los obtenidos en este estudio y finalmente la regresión para los resultados de Russo (2009) y los obtenidos en este estudio. Fuente original: Cox *et al.* (2010)

Durante las últimas cuatro décadas se han llevado a cabo diferentes estudios experimentales sobre los límites de estabilidad para diferentes regímenes de flujo, y en la Guía AR&R (Cox *et al.*, 2010) se recogen algunos de ellos y se analizan en detalle, realizando finalmente un análisis conjunto de los resultados obtenidos por los diferentes autores. Los datos experimentales de estos autores fueron representados en una misma gráfica, representando así las variables hidráulicas ( $v \cdot y$ ) frente a las características de las personas ensayadas por los diferentes autores ( $H \cdot P$ ). En dicha gráfica se han superpuesto (Figura III-52) los obtenidos por Russo (2009) y los obtenidos en este estudio. Se observa en este caso cómo el conjunto de puntos superpuestos está por debajo de los datos originales, significativamente separados de éstos, y generando una nueva línea de tendencia global con una pendiente más pronunciada.

Por otro lado la Guía AR&R (Cox *et al.*, 2010) sugiere que el uso de características de personas ( $H \cdot P$ ) como variable independiente en cuanto a definición general de directrices para seguridad ante inundaciones no parece ser práctico, debido al amplio rango de características de la población. En este sentido proponen la siguiente división de la población para definir la peligrosidad de manera diferente en cada una de éstas:

- Adultos ( $H \cdot P > 50$  mkg)
- Niños ( $H \cdot P = 25$  hasta  $50$  mkg)
- Niños muy pequeños ( $H \cdot P < 25$  mkg)

En base a la clasificación de población definida y a los resultados experimentales de los diferentes autores, se presentan los rangos de peligrosidad para los diferentes sectores de la población, Tabla III-17. Se representan además estas zonas de peligrosidad en dos gráficas, la primera muestra la relación ( $v \cdot y$ ) frente a ( $H \cdot P$ ) (Figura III-53) y la segunda muestra la relación ( $y$ ) frente a ( $v$ ) (Figura III-54), en las cuales, para este apartado, se han superpuesto los datos obtenidos por Russo (2009) y los obtenidos en este estudio.

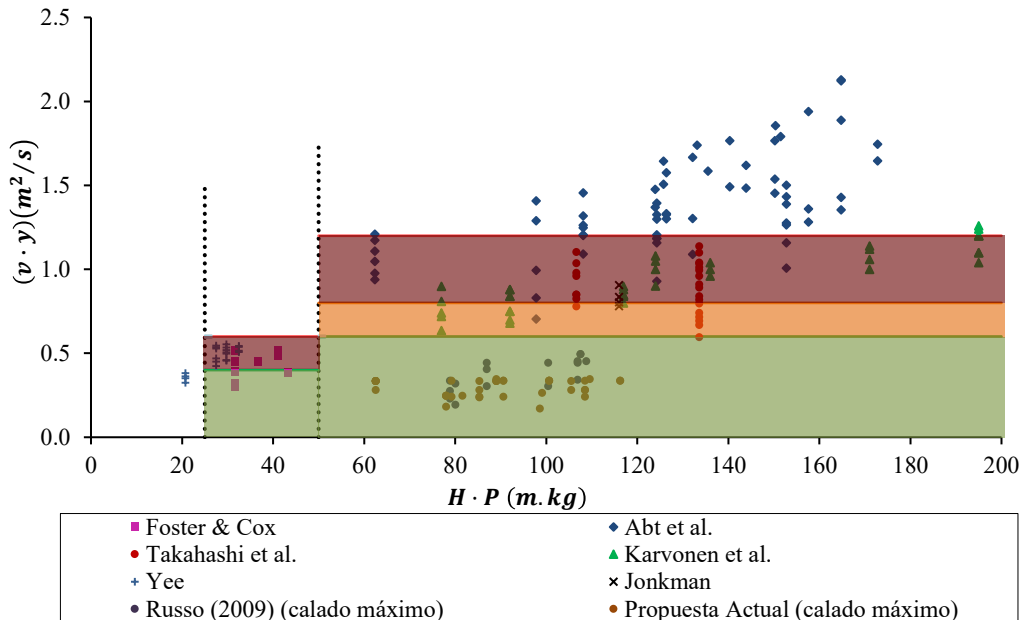
**Tabla III-17.** Rangos de peligrosidad para niños muy pequeños, niños y adultos, según la Guía AR&R (Cox *et al.*, 2010)

$(v \cdot y) [m^2/s]$	Bebes, niños muy pequeños y personas frágiles/ancianas ( $H \cdot P \leq 25$ )	Niños ( $H \cdot P = 25$ hasta $50$ )	Adultos ( $H \cdot P > 50$ )
0	Sin peligrosidad	Sin peligrosidad	Sin peligrosidad
0-0.4		Baja Peligrosidad <sup>1</sup>	
0.4-0.6		Peligrosidad significativa; Peligroso para la mayoría <sup>3</sup>	Baja Peligrosidad <sup>1</sup>
0.6-0.8	Peligrosidad extrema; Peligroso para todos		Peligrosidad moderada; Peligroso para algunos <sup>2</sup>
0.8-1.2		Peligrosidad extrema; Peligroso para todos	Peligrosidad significativa; Peligroso para la mayoría <sup>3</sup>
>1.2			Peligrosidad extrema; Peligroso para todos

<sup>1</sup> La estabilidad no se ve comprometida para personas dentro del programa de ensayos para tales flujos (calado máximo de 0.5 m para niños y 1.2 m para adultos y una velocidad máxima de 3 m/s para bajos calados)

<sup>2</sup> Límite de trabajo para trabajadores de emergencias o personas experimentadas y bien equipadas ( $(v \cdot y) < 0.8$ )

<sup>3</sup> Límite superior de estabilidad observado para la mayoría de investigaciones ( $(v \cdot y) < 1.2$ )

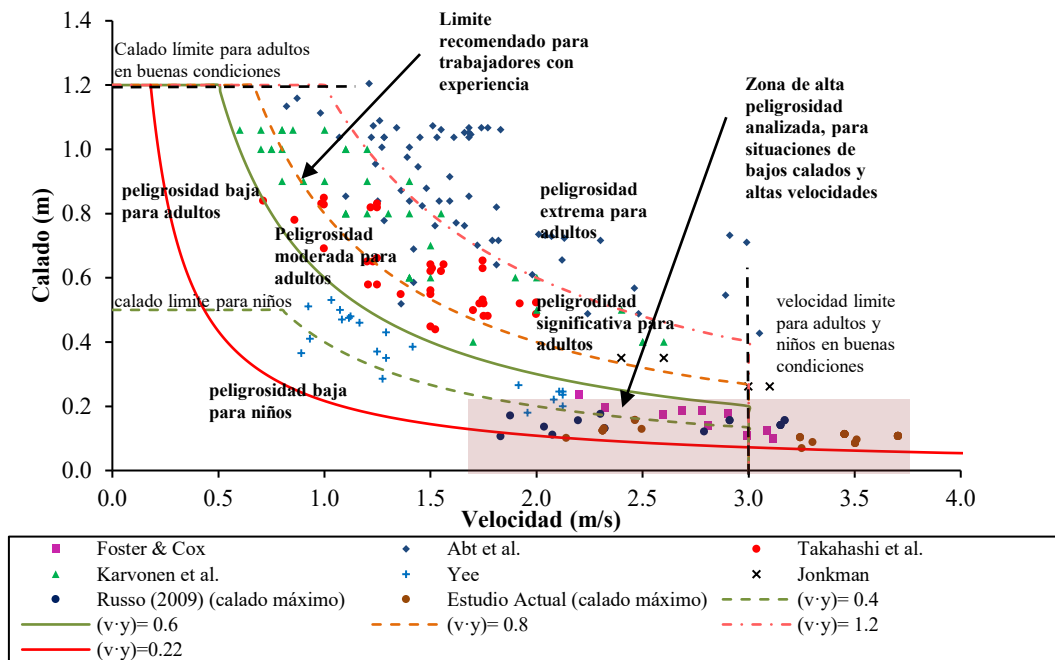


**Figura III-53.** Valores del producto  $(v \cdot y)$  indicando el nivel de peligrosidad como función de la altura  $(H)$  y peso  $(P)$  de la persona ensayada para todas las fuentes de datos experimentales, superponiendo los resultados de Russo (2009) y los propios del presente estudio. Fuente original: Cox *et al.* (2010)

En la Figura III-53 se observan tres zonas según el nivel de peligrosidad para los grupos de población propuestos: peligrosidad baja (■) para niños y adultos, peligrosidad moderada (■) para algunos adultos, con  $(v \cdot y) = 0.8$  como límite superior para adultos experimentados, y peligrosidad significativa (■) para la mayoría de adultos, con valores de  $(v \cdot y)$  más altos ( $(v \cdot y) > 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) delimitando la zona de peligrosidad extrema para todos los adultos. Se observa como todos los datos se encuentran ubicados en la zona definida para adultos, cuando las personas ensayadas eran no solo adultos sino niños también, encontrándose incluso los puntos de éstos en el límite inferior del producto altura por peso (niño de 9 años de edad) y en el límite superior (niño de 11 años de edad). Parece por tanto esta división por áreas no ser representativa, para la clasificación de niños, adultos y bebés, únicamente con motivo del producto altura por peso. Incluso prácticamente la totalidad de los valores se encuentran por debajo del umbral de seguridad para niños en cuanto al producto calado por velocidad.

Finalmente, en la Figura III-54, se observa la superposición los datos de Russo (2009) y los obtenidos en este estudio, así como el umbral de seguridad  $(v \cdot y_{max}) = 0.22 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  definido para los datos del presente estudio. Comparando con las propuestas de umbrales de la Guía AR&R (Cox *et al.*, 2010) según los sectores de población, se llega de nuevo a la conclusión que los límites de seguridad para la estabilidad de personas cuando éstas caminan a través de un flujo de agua de escorrentía en zona urbana son significativamente inferiores. Además las velocidades del flujo de agua de escorrentía que se pueden dar en una calle pueden superar con creces el límite de velocidad (3.0 m/s) propuesto por la Guía AR&R (Cox *et al.*, 2010), con lo que no parece apropiado en este caso dicha limitación. En cuanto a la limitación de calado propuesta (1.2 m), se encuentra muy por encima de los órdenes de magnitud que pueden darse de manera habitual en las calles de una ciudad. Queda por tanto abierto el criterio de limitación del calado a criterios propios de cada ciudad, como puede ser por ejemplo la altura del bordillo de la acera (15 cm habitualmente

en ciudades españolas), y como ya propuso Nanía (1999) indicando el criterio de calado máximo de Mendoza (30 cm) y el de Denver (45 cm) junto a su criterio de estabilidad al deslizamiento propuesto (Figura II-13).



**Figura III-54.** Rangos de peligrosidad propuestos como una función de calado y velocidad, comparados con los datos experimentales disponibles y superponiendo los resultados de Russo (2009) y los propios del presente estudio. Fuente original: Cox *et al.* (2010)

### III.9. Síntesis y conclusiones

Hay un consenso general, de acuerdo con el estado de la cuestión estudiado, en las variables que definen la peligrosidad (calado y velocidad) para personas expuestas a inundaciones. Se presentaron en el capítulo del estado de la cuestión formulaciones límites o umbrales, función de las variables hidráulicas calado y velocidad, que delimitan la zona de estabilidad para personas expuestas a corrientes de agua.

En esta investigación se ha llevado a cabo un completo estudio experimental sobre la estabilidad de peatones ante inundaciones pluviales ocurridas en zonas urbanas. Mediante un modelo físico de laboratorio se han llevado a cabo ensayos a escala real reproduciendo las condiciones de flujo más habituales (bajos calados y altas velocidades) cuando ocurre una inundación en una típica calle de una ciudad. Se ha ensayado con una muestra de 26 sujetos, los cuales realizaban los ensayos con diferente calzado, manos libres u ocupadas y buenas o malas condiciones de visibilidad. El umbral definido bajo todos los puntos de inestabilidad obtenidos se ha definido por el producto  $(v \cdot y) = 0.22 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , considerando calados máximos en la sección de estudio, muy por debajo de los criterios convencionales de  $(v \cdot y) = 0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . La representación de todos los puntos de inestabilidad junto con los propuestos por otros autores y directrices indica que tales criterios no son adecuados cuando se trata de evaluar la estabilidad de peatones expuestos a las típicas

inundaciones pluviales urbanas. Además, aspectos como el primer paso desde la acera en seco a la calzada inundada y la evaluación de la respuesta emocional de los sujetos ensayados han sido considerados en el análisis de peligrosidad.

Por lo tanto, en esta investigación se propone un criterio de estabilidad para peatones mucho más restrictivo que debería ser tenido en cuenta en un futuro por los responsables en la toma de decisiones sobre la gestión del riesgo de inundaciones en zonas urbanas. Este nuevo criterio además es una herramienta muy útil para el diseño del sistema de drenaje urbano, regulado por las administraciones municipales, el cual limitaría la cantidad de esorrentía de circulación por nuestras calles para asegurar la seguridad de los peatones.

## *Capítulo IV*

# *Estudio experimental de la estabilidad de vehículos ante inundaciones*

### **IV.1. Introducción y objetivos**

Los vehículos son componentes que hoy en día están muy presentes en las ciudades y, aunque desde el punto de vista medioambiental existen muchas discusiones al respecto, parece que la tendencia en número de vehículos es ascendente. Por tanto, éstos son parte imprescindible a considerar cuando se dan inundaciones en las ciudades y, como se argumentó en el capítulo introductorio, merecen el análisis de la peligrosidad a la que se ven sometidos en dichas inundaciones. Se trata de elementos cuya peligrosidad se determina con el análisis del inicio de pérdida de estabilidad, ya sea por flotación, deslizamiento o vuelco. Por un lado los vehículos presentan ventajas en su análisis, con respecto al estudio de la inestabilidad de personas, puesto que la maniobrabilidad, habilidades y aspectos psicológicos de las personas no se tienen en cuenta, pero por otro lado la integridad de las personas que ocupen el vehículo puede verse afectada a la vez (daños intangibles). Este concepto fue tenido en cuenta en el criterio de estabilidad de vehículos propuesto por la AR&R (Shand *et al.*, 2011), considerando en una misma gráfica los límites de inestabilidad de flotación (calado máximo) y de deslizamiento (velocidad mínima) con la función límite de estabilidad para peatones (calado x velocidad), que separaba la zona segura e insegura en cuanto a la estabilidad de éstos en caso de abandonar el vehículo.

Los daños tangibles producidos en y por los vehículos pueden ser directos, afectando al vehículo, o indirectos cuando, una vez perdida la estabilidad, se encuentran en suspensión y pueden colisionar con cualquier estructura urbana al ser arrastrados por el flujo del agua. Es posible entender por tanto a los vehículos como grandes escombros arrastrados por el agua que pueden representar cuantiosos daños económicos y suponer graves consecuencias para la seguridad de las personas. Es un claro ejemplo la gran inundación producida en Boscastle (Reino Unido) el 16 de agosto de 2004, ocasionada por una lluvia extrema de 200 mm en 5 horas de duración, que supuso millones de libras en reparaciones de daños y un arrastre de más de un centenar de vehículos. Dicho arrastre de vehículos ocasionó el bloqueo de un puente que llegó a colapsar agravando notablemente los daños producidos. Dicho evento, uno de los más dañinos de los últimos años en el Reino Unido, sirvió de motivación para retomar el análisis de la



inestabilidad de vehículos (Teo, 2010), tras siete años sin investigaciones en inestabilidad de vehículos después de los estudios de Keller y Mitsch (1993). Sucesos de este tipo, con mayores o menores consecuencias, no dejan de producirse; y en España en los últimos años también se han producido inundaciones urbanas muy dañinas, como la acaecida en Tenerife el 19 de octubre de 2014 con 139.2 litros por metro cuadrado caídos en unas 15 horas (Figura IV-1). Estos datos solo fueron superados el 22 de marzo de 2002 en los últimos 70 años, y en esta ocasión supuso la paralización completa de la ciudad e incluso se produjo el fallecimiento de una mujer de 56 años al ser arrastrada por la escorrentía. Gran cantidad de vehículos fueron arrastrados también, ocasionando daños económicos significativos. Se trata por tanto de una problemática importante en todas las ciudades del mundo que debe ser estudiada con la rigurosidad que merece.

La estabilidad de los vehículos, quedará comprometida cuando las variables hidráulicas, calado y velocidad, superen un cierto umbral. Estas variables ya fueron tenidas en cuenta ( $y$ ,  $v$ ,  $v \cdot y$ ) para determinar la estabilidad de los peatones y, en este caso, se considerarán igualmente pero relacionándolas con las características de los vehículos. Son varias las características que pueden influir en la estabilidad de un vehículo, pero en esencia será el peso, la altura libre hasta el suelo, la superficie en planta y la hidrodinámica de la forma del vehículo en la dirección del flujo las que afecten al grado de inestabilidad del mismo.



**Figura IV-1.** Inundación producida en Tenerife el 10 de octubre de 2014 (139.2 l/m<sup>2</sup> en unas 15 horas)

Desde los primeros vehículos, éstos han ido adaptándose a las nuevas tecnologías y adoptando formas con medidas diferentes. Algunos de estos cambios, como una mejor forma aerodinámica, benefician la estabilidad, pero por el contrario la adopción de menores alturas libres hasta el suelo favorece la inestabilidad. Se trata por tanto de factores que requieren ser estudiados desde el punto de vista de la estabilidad de vehículos cuando se ven sometidos a una corriente de agua, aunque estos parámetros van modificándose a lo largo del tiempo y cada vez se encuentran más variedades de modelos. En este sentido, los estudios requeridos deben ofrecer soluciones lo más generalistas posibles que puedan garantizar límites de seguridad para cualquier tipo de vehículo, ya sea actual o más antiguo.

Hasta el momento, los estudios experimentales sobre estabilidad de vehículos en inundaciones se han llevado a cabo a partir de modelos a diferentes escalas y cuyos resultados, asegurando exhaustivamente los principios de semejanza de Froude, fueron escalados a prototipo. Sin embargo la variedad de los vehículos ensayados no parece la adecuada para poder obtener resultados generalistas para el gran abanico de vehículos que circulan por nuestras ciudades. En este capítulo se analizará experimentalmente la inestabilidad de una muestra significativa de modelos de vehículos a escala y cuyos resultados, cumpliendo rigurosamente la semejanza de Froude, pueden ser escalados a prototipo. Este capítulo se inicia con el estudio del sistema de fuerzas actuantes sobre un vehículo situado en un flujo de agua, y se describen los experimentos llevados a cabo para determinar el umbral de inestabilidad de los vehículos envueltos en situaciones de inundación. Se presenta finalmente una metodología experimental para la obtención de umbrales de seguridad para cualquier vehículo, en base a sus características físicas.

## IV.2. Fuerzas hidrodinámicas actuantes sobre el vehículo

Atendiendo a una situación en la que un vehículo aparcado se encuentra parcialmente sumergido, las fuerzas que actuarían sobre éste serían por un lado las debidas a la acción del agua, **fuerza de arrastre ( $F_D$ )** y de **empuje vertical ( $F_v$ )**, y por otro las producidas por la reacción del terreno, la **fuerza normal ( $F_N$ )** y la de **rozamiento entre el neumático y el terreno ( $F_R$ )**.

La fuerza de arrastre del agua se define analíticamente como:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w v^2 C_d A \quad \text{[IV-1]}$$

siendo,

- $\rho_w$ : Densidad del agua
- $v$ : Velocidad del agua
- $C_d$ : Coeficiente de arrastre que depende del flujo y la forma del obstáculo. Dependerá del número de Reynolds.
- $A$ : Área sumergida y proyectada en el plano perpendicular a la dirección del flujo

En situaciones hidrostáticas, es decir, cuando el agua no presente velocidad de aproximación al vehículo, el empuje vertical se debe únicamente a la **fuerza de Flotación ( $F_b$ )**, debido a la menor densidad del vehículo con respecto a la del agua. Sin embargo, cuando se trata de un flujo en movimiento (hidrodinámica), el empuje vertical se debe a la acción conjunta de la **fuerza de Flotación ( $F_b$ )** y de la **Fuerza de ascensión ( $F_L$ )**.

La fuerza de flotación se define analíticamente, según la teoría de Arquímedes, como:

$$F_b = \gamma_w \cdot V_w \quad \text{[IV-2]}$$

siendo,

- $\gamma_w$ : Peso específico del agua y
- $V_w$ : Volumen del agua desplazada por el vehículo

La fuerza de ascensión se define analíticamente como:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_w v^2 C_L A \quad \text{[IV-3]}$$

siendo,

- $\rho_w$ : Densidad del agua
- $v$ : Velocidad del agua
- $C_L$ : Coeficiente de ascensión que depende del flujo y la forma del obstáculo. Dependerá del número de Reynolds.
- $A$ : Área sumergida y proyectada en el plano perpendicular a la dirección del flujo

Considerando una situación de inestabilidad por deslizamiento, el equilibrio se daría cuando la fuerza de arrastre del agua fuera igual a la fuerza de rozamiento del vehículo con el terreno. Sin embargo, si se considera la inestabilidad únicamente por flotación, el punto de equilibrio se daría cuando el empuje vertical (igual a  $F_b$  en condiciones hidrostáticas) fuera igual a la fuerza gravitacional (en función del peso del vehículo).

Se define el peso efectivo o sumergido ( $F_G$ ) como la fuerza resultante de la diferencia de la fuerza gravitacional ( $F_g$ ) y el empuje vertical ( $F_v$ ).

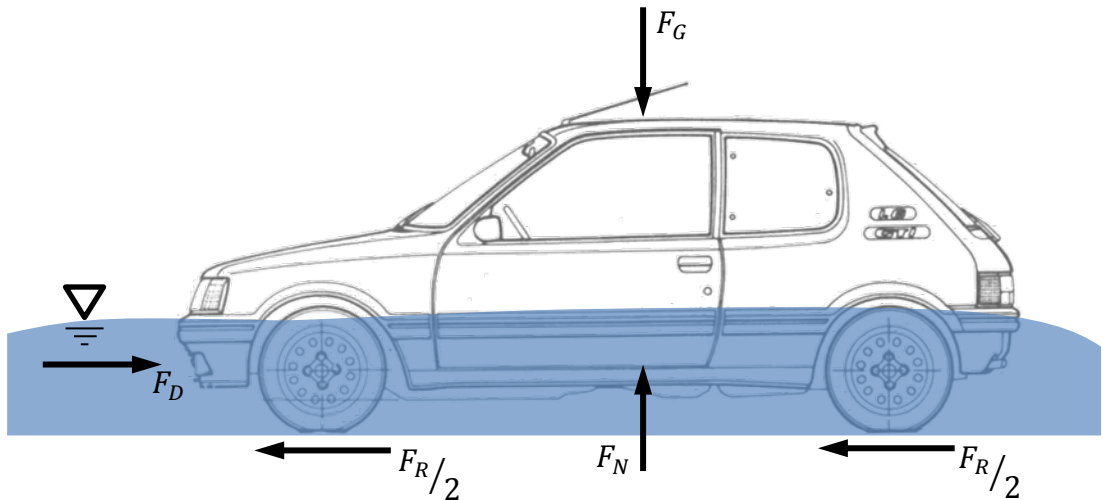
$$F_G = F_g - F_v \quad \text{[IV-4]}$$

siendo,

- $F_g = \gamma_c \cdot V_c$ , con  $\gamma_c$ : peso específico del vehículo y  $V_c$ : volumen del vehículo
- $F_v = F_b + F_L$

Por lo tanto, un **peso efectivo** positivo ofrece estabilidad en cuanto a la flotación (aunque no garantiza su estabilidad por deslizamiento). Respecto a la fuerza de rozamiento, se repartiría una cuarta parte en cada rueda, o lo que es lo mismo la mitad de la fuerza de rozamiento en cada eje, delantero y trasero. En la Figura IV-2 se representa el sistema de fuerzas descrito hasta el momento.

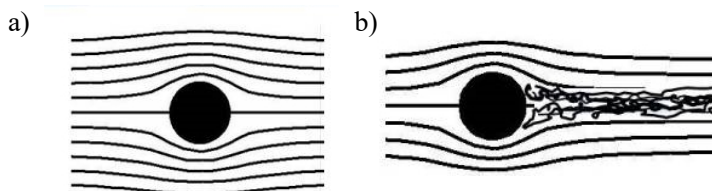
Para que el sistema de fuerzas descrito hasta el momento sea acorde con el planteamiento, se deben cumplir dos hipótesis fundamentales: 1) las cuatro ruedas deben estar bloqueadas, para que no rueden y puedan ofrecer resistencia al deslizamiento; y 2) se considera el vehículo estanco, de manera que su densidad sea inferior a la del agua, y así éste pueda flotar. Obviamente se trata de simplificaciones de la realidad, puesto que los vehículos aparcados pueden tener bloqueadas dos de las ruedas (eje trasero habitualmente), y no las cuatro; y por otro lado el nivel de estanqueidad de los vehículos es muy variable. En el segundo supuesto se podría considerar que si bien en una situación real los vehículos no ofrecen total estanqueidad, éstos tardarían en llenarse de agua más tiempo del necesario para que el flujo de agua actuase y ejerciera la fuerza de flotación que desestabilizara al mismo (Kramer *et al.* 2016). En cualquier caso, parece obvio pensar que esta hipótesis está del lado de la seguridad.



**Figura IV-2.** Principales fuerzas actuando sobre un vehículo estacionado y parcialmente sumergido

Por supuesto las situaciones reales son mucho más complejas, debido a la impredecibilidad del agua, por lo que se debe considerar este sistema como una simplificación de la realidad, motivo por el cual se llevan a cabo ensayos experimentales que ayuden a entender mejor las inestabilidades de los vehículos sometidos a las fuerzas de un flujo de agua.

Cuando un flujo de agua pasa a través de un obstáculo, un vehículo en este caso, se ejerce una fuerza tangencial sobre la superficie de éste. En el caso en que el flujo no tenga gran velocidad, esta fuerza será la principal. Cuando las condiciones de flujo presentan mayores velocidades el comportamiento hidráulico es muy diferente, pues en la parte trasera del vehículo se produce una separación de las líneas de corriente en forma de pequeñas estelas. Este segundo comportamiento produce una diferencia de presión entre la parte delantera y trasera del vehículo que genera la denominada resistencia de forma. La combinación de la resistencia de superficie y de forma resulta en la fuerza de arrastre que actuará sobre el vehículo. En la Figura IV-3 se observa un ejemplo de un cuerpo sumergido, en el primer caso para un flujo a baja velocidad cuyas líneas de corriente definen la silueta del obstáculo y en el segundo caso una velocidad superior que hace que las líneas de corriente pierdan esa continuidad en la parte posterior del obstáculo, generando pequeñas estelas como efecto de la turbulencia.



**Figura IV-3.** Líneas de corriente a través de un cuerpo sumergido. a) Situación laminar y b) situación turbulenta

Respecto a la fuerza de arrastre, aparece la incertidumbre asociada al coeficiente de arrastre, que a su vez puede distinguirse en dos fases en el caso de vehículos, cuando el nivel del agua no

ha llegado al chasis y cuando éste ha sobrepasado ese nivel. En la primera situación serán únicamente las ruedas del vehículo las que serán sometidas a la fuerza del agua y viéndose comprometida la estabilidad del vehículo en menor medida que para la segunda situación. En el segundo caso la fuerza de arrastre del agua encuentra mayor superficie de actuación y dicha fuerza por tanto será mayor, así como la proximidad al punto de inestabilidad del vehículo. El coeficiente de arrastre en el primer caso debe ser diferente al segundo; algunos autores (Keller y Mitsch, 1993) propusieron un valor de  $C_d = 1.10$  cuando el nivel de agua está por debajo del chasis del vehículo, asumiendo formas cilíndricas de las ruedas y de  $C_d = 1.15$  cuando el nivel de agua superaba el chasis del vehículo, asumiendo en este caso una forma de prisma rectangular. Por otro lado, este coeficiente es variable en la realidad, pero debe ser tenido en cuenta como un valor constante como así lo hicieron todos los autores hasta el momento.

La fuerza de rozamiento entre el neumático y el terreno es la reacción producida cuando actúa la fuerza de arrastre el agua. Esta fuerza de rozamiento es la que ofrece la seguridad ante inestabilidades de deslizamiento de los vehículos y será mayor cuanto mayor sea el peso del vehículo y la adherencia neumático-terreno. La expresión de la fuerza de rozamiento es la siguiente:

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad \text{[IV-5]}$$

siendo,

- $\mu$ : el coeficiente de rozamiento entre el neumático y el terreno
- $F_N$ : la fuerza normal de reacción del terreno, que será igual al peso efectivo ( $F_G$ ) siempre que el vehículo se encuentre en una superficie horizontal.

El valor del coeficiente de rozamiento dependerá no solo del material de los neumáticos de los vehículos, sino de la combinación del material de los neumáticos y de la superficie del terreno en el que se encuentre. En este sentido dicho coeficiente en ningún caso será el mismo, sino que se darán rangos de valores. Las mediciones de algunos autores (Gerard, 2006) para el coeficiente de rozamiento entre neumático y carretera inundada estaban comprendidas entre 0.25 y 0.75. Se trata por tanto de un factor fundamental en la estabilidad al deslizamiento de los vehículos parcialmente inundados.

Se ha descrito, por tanto, en este apartado un sistema de fuerzas ideal, en el que se ven involucrados parámetros fundamentales para la estabilidad de vehículos como son el coeficiente de rozamiento y el coeficiente de arrastre, que requieren de experimentación para obtener resultados óptimos, para cada tipo de vehículo.

### IV.3. Escalas de los modelos de vehículos a ensayar (Teoría de modelos)

Los modelos reducidos, modelos físicos o modelos hidráulicos son una técnica para resolver problemas de ingeniería hidráulica, consistente en el ensayo de una réplica del problema a escala. La réplica reducida es lo que llamamos modelo, ante la realidad que llamamos prototipo. Los modelos en ingeniería hidráulica son aún necesarios porque el cálculo hidráulico no ha alcanzado la competencia suficiente para sustituirlos completamente. El cálculo es imperfecto debido principalmente a la complejidad de los fenómenos de turbulencia y la dificultad que imponen los contornos reales y tridimensionales.

La base de los modelos reducidos es la teoría de la semejanza. Un modelo físico escalado es completamente semejante a su prototipo y no presentará efectos de escala si satisface la semejanza mecánica, es decir que cumpla la semejanza geométrica, cinemática y dinámica. La semejanza geométrica requiere semejanza en cuanto a la forma, es decir que el modelo será  $\lambda$  veces menor en las tres direcciones del espacio. La semejanza cinemática ya implica la geométrica, pero además requiere de semejanza de movimiento, es decir relaciones constantes de velocidad, aceleración y caudal entre modelo y prototipo en todo momento. La semejanza dinámica además de las dos anteriores requiere que todas las fuerzas en ambos sistemas (modelo y prototipo) sean idénticas. Las fuerzas más relevantes en la mecánica de fluidos son: la fuerza inercial, la fuerza gravitacional, la fuerza viscosa, la fuerza de tensión superficial, la fuerza elástica de compresión y la fuerza de presión. La semejanza dinámica completa entre modelo y prototipo es imposible, es decir, cada fuerza presente en el problema se reduce de una manera diferente (no en la misma proporción) de prototipo a modelo. Sin embargo, el modelo puede ser aún una buena representación del movimiento real si una fuerza es tan dominante sobre las otras (es decir, si representa la casi totalidad de la resultante, igualada a las fuerzas de inercia) que también, a pesar de la diferente proporción en que se reducen, es dominante en el modelo. Los problemas de obras hidráulicas en lámina libre son dominados por la fuerza gravitatoria. La ley de semejanza en este caso, llamada semejanza de Froude (números de Froude iguales en modelo y prototipo,  $F_{r_m} = F_{r_p}$ ), garantiza que esta fuerza en su proporción con la resultante, se reproduce correctamente en el modelo. Las escalas de semejanza más útiles que se deducen de la semejanza de Froude son la de la velocidad  $\lambda_v = \sqrt{\lambda}$  y la del caudal  $\lambda_Q = \lambda^{5/2}$ , siendo  $\lambda = \frac{l_p}{l_m}$  la escala geométrica; con  $l_p$ : longitud del prototipo, y  $l_m$ : longitud del modelo. Si una fuerza menor (de viscosidad, de tensión superficial...) toma el modelo una importancia como para alterar el movimiento, hablamos de un efecto de escala. La correcta elección de  $\lambda$  debe ser resultado de una optimización económica y técnica, y dicho factor de escala debe estar comprendido en un rango tal que los efectos de escala a pesar de estar siempre presentes, no influyan en los resultados de manera significativa. Algunas apreciaciones a tener en cuenta son las descritas por Heller (2011):

- Los experimentos con modelos físicos hidráulicos siempre presentan efectos de escala si  $\lambda \neq 1$ , puesto que es imposible modelar correctamente todas las relaciones de las fuerzas presentes (números adimensionales). El asunto relevante es si los efectos de escala pueden ser o no despreciables.
- Cuanto mayor sea el factor de escala, más incorrecto será la modelación de todas las relaciones de fuerzas, desviándose más de las relaciones de fuerzas del prototipo y se esperan mayores efectos de escala. En cualquier caso la elección de  $\lambda$  no es criterio suficiente para evitar efectos de escala significantes. El grado de los efectos de escala depende del fenómeno o parámetro que se analice en un cierto modelo puesto que la importancia relativa de las fuerzas envueltas en el fenómeno puede ser diferente. Que un parámetro, como puede ser el caudal, no se vea significativamente afectado por los efectos de escala no implica que otros parámetros, como la concentración de aire, puedan verse afectados en gran medida. Cada parámetro requiere su propio análisis de afectación de los efectos de escala.
- Puesto que las fuerzas de los fluidos en un modelo son más dominantes que en su prototipo, los efectos de escala normalmente tienen un efecto de amortiguación.

Ciertos parámetros como la altura relativa de ola, el caudal relativo o el transporte relativo de volumen de arena son normalmente menores en el modelo que en su prototipo. El juicio sobre si la predicción basada en el modelo infra o sobrevalora los resultados es por lo tanto en ocasiones posible.

En el presente estudio experimental se han utilizado vehículos a escala 1:18 y 1:14, es decir 18 y 14 veces más pequeños en las tres direcciones del espacio. Las variables de calado y velocidad resultantes en los ensayos deberán ser por tanto escaladas 18 y 14 veces respectivamente para el caso de los calados, y  $\sqrt{18}$  y  $\sqrt{14}$  veces respectivamente para el caso de las velocidades. Las fuerzas ejercidas en el modelo, para cumplir la semejanza de Froude, deberán ser multiplicadas por  $\lambda_F = \lambda^3$  para escalarse a prototipo. Esta última conversión lleva a que las densidades de los modelos ensayados y los vehículos prototipo deban ser iguales para cumplirse la semejanza de Froude, puesto que:

$$(F_g)_p = \lambda^3 \cdot (F_g)_m; \text{ Subíndices p, m: prototipo y modelo}$$

$$F_g = mg \rightarrow m = \rho \cdot V$$

$$\rho_p \cdot V_p \cdot g = \lambda^3 \cdot \rho_m \cdot V_m \cdot g \rightarrow V_p = \lambda^3 \cdot V_m \text{ ("g" no puede variar)}$$

$$\boxed{\rho_p = \rho_m}$$

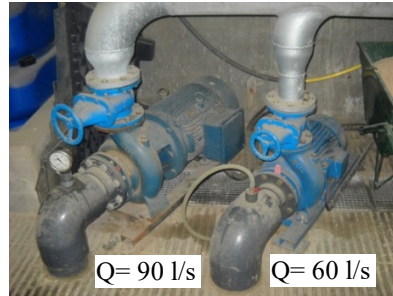
[IV-6]

Por tanto, éste será un requisito fundamental de los modelos a ensayar, para cumplir rigurosamente la semejanza de Froude y poder escalar los resultados directamente a prototipo. El coeficiente de rozamiento entre los neumáticos del modelo y el terreno del lugar de los ensayos debe estar en el mismo rango en el que se encontraría el vehículo prototipo, cumpliéndose que  $(F_R)_p = \lambda^3 \cdot (F_R)_m$ .

#### IV.4. Descripción de las instalaciones del laboratorio

Para llevar a cabo los ensayos experimentales de inestabilidad de vehículos ante inundaciones se han utilizado las instalaciones disponibles en el laboratorio de hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (ECA) en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universitat Politècnica de Catalunya. El laboratorio dispone de varios suministros de agua y en este caso se ha utilizado un sistema de bombeo compuesto por dos bombas de aspiración no sumergidas en paralelo, con una capacidad nominal de bombeo de 90 l/s la mayor y de 60 l/s la menor (Figura IV-4), y que conectan a una conducción principal de acero DN 200 mm. El agua impulsada por el sistema de bombeo es aspirada de un depósito enterrado, situado bajo el suelo del laboratorio, y que suministra agua a diferentes modelos mediante control de válvulas.

Para los ensayos de este estudio se ha utilizado un canal de cajeros de cristal y solera de baquelita, con unas dimensiones de prácticamente 20 m de longitud y una sección transversal de 60 cm de ancho y 60 cm de alto (Figura IV-5). Dispone de un vertedero motorizado aguas abajo, con el que se puede establecer la condición de contorno (calado) aguas abajo cuando se trabaja con régimen lento. La pendiente longitudinal del canal se puede variar mediante un sistema de gatos hidráulicos desde pendiente 0 % hasta 4 %. Esta instalación, en adelante, será mencionada como *canal de pendiente variable*.

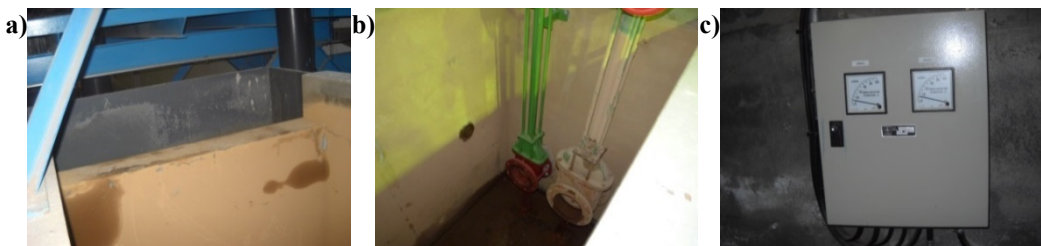


**Figura IV-4.** Bombas de impulsión del laboratorio de hidráulica



**Figura IV-5.** Canal de pendiente variable

El sistema de bombeo descrito alimenta al canal de pendiente variable, impulsando inicialmente el agua hacia un depósito de nivel constante que presenta un vertedero rectangular a un lado (Figura IV-6a) y dos compuertas motorizadas a otro (Figura IV-6b). Estas compuertas, mediante un cuadro de control (Figura IV-6c), tendrán una cierta abertura que proporcione el caudal de paso deseado hacia el canal de pendiente variable. El vertedero rectangular aliviará el agua sobrante que no pase a través de las compuertas, para ser conducida de nuevo al depósito enterrado desde donde será impulsada de nuevo por el sistema de bombeo (sistema de recirculación). El agua que pasa por la abertura de las compuertas es frenada por dos muros de grava antes de ser almacenada en un depósito anexo con un vertedero triangular para el control del caudal suministrado al canal de pendiente variable.



**Figura IV-6.** a) Vertedero de recirculación. b) Compuertas hacia vertedero triangular. c) Cuadro de control de compuertas

El control del caudal se realiza mediante el vertedero triangular, a partir de la obtención de la carga hidráulica sobre el vértice de éste, con ayuda de un limnómetro situado en una posición tal que la lectura del vértice del vertedero triangular es de 8.90 cm y por tanto será el “cero” de las diferentes lecturas (Figura IV-7).





Figura IV-7. Vertedero triangular y limnómetro

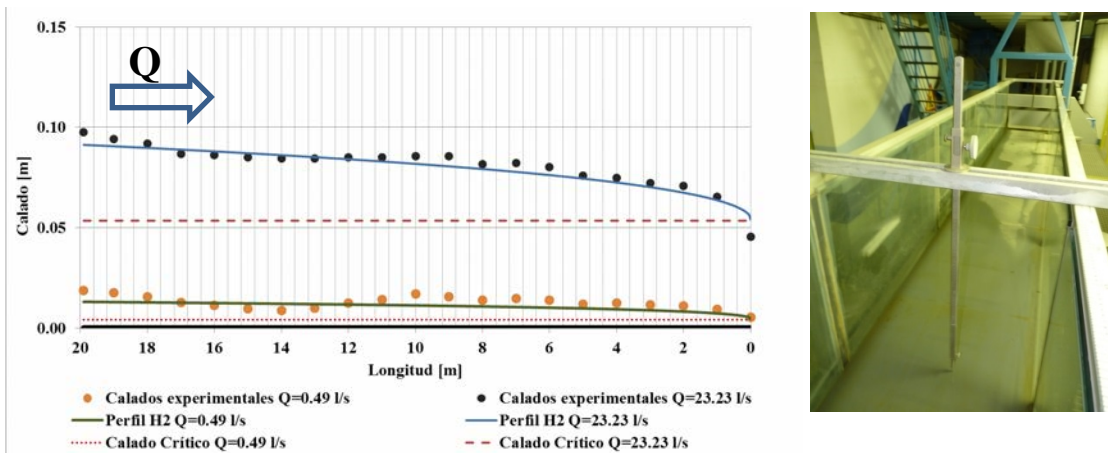


Figura IV-8. Calibración del coeficiente de Manning del canal de pendiente variable y limnómetro para la toma de datos

La rugosidad del canal de pendiente variable ha sido calibrada a partir de datos experimentales obteniendo un valor del coeficiente de Manning de 0.010. Para ello se ha suministrado en primer lugar un caudal de 23.23 l/s, obteniendo los calados con la ayuda de un limnómetro, de resolución hasta la décima de milímetro, en cada metro a lo largo del canal. De igual manera para un caudal de 0.49 l/s se tomaron los calados en cada metro. Resolviendo numéricamente la ecuación diferencial de las curvas de remanso mediante el método de Runge Kutta de cuarto orden para los dos caudales ensayados, con condición de contorno de calado crítico aguas abajo y pendiente horizontal, se ha modificado el coeficiente de Manning hasta obtener la lámina de agua (perfil H2) que se observa en la Figura IV-8.

#### IV.5. Estudio y planificación de las necesidades de los ensayos experimentales. Construcción de un modelo local de pendiente variable.

El objetivo principal de los ensayos experimentales llevados a cabo en este estudio con vehículos a escala es determinar el umbral de inestabilidad para sus correspondientes vehículos prototipo, cuando estos se ven afectados por el sistema de fuerzas (Figura IV-2) ocasionado por la acción del agua en situaciones de inundación. Para llevar a cabo dicho estudio, en primer lugar, se debe analizar el dominio conjunto de puntos (velocidad-calado) de inestabilidad obtenido por los autores que hasta el momento han investigado sobre este tema. Para ello se requiere la

representación en una gráfica velocidad-calado de todos los resultados obtenidos por los diferentes investigadores que llevaron a cabo experimentos de inestabilidad con vehículos a escala, tal y como se representó en detalle en el segundo capítulo de este documento. En esta ocasión, para la planificación de los ensayos experimentales se han representado todos los puntos de inestabilidad sin distinguir entre autores, con el objetivo de definir únicamente el dominio de trabajo y analizar toda la zona comprendida por la nube de puntos de los diferentes autores (Figura IV-9). Se incorpora además la función [IV-7], obtenida a partir de igualar la expresión del número de Froude a la unidad, es decir fijando régimen crítico. De esta manera se distinguen dos zonas en el dominio de puntos, la correspondiente a régimen rápido o supercrítico y la zona correspondiente a régimen lento o subcrítico, separadas por la función [IV-7], asumiendo un caudal rectangular en el ensayo.

$$y_c = \frac{v_c^2}{g} \tag{IV-7}$$

siendo,

- $y_c$ : calado crítico
- $v_c$ : velocidad crítica
- $g$ : aceleración de la gravedad

Por último, como criterio de estabilidad más restrictivo se han representado también las funciones propuestas en la guía AR&R (Shand *et al.*, 2011), para vehículos pequeños, grandes y todoterreno.

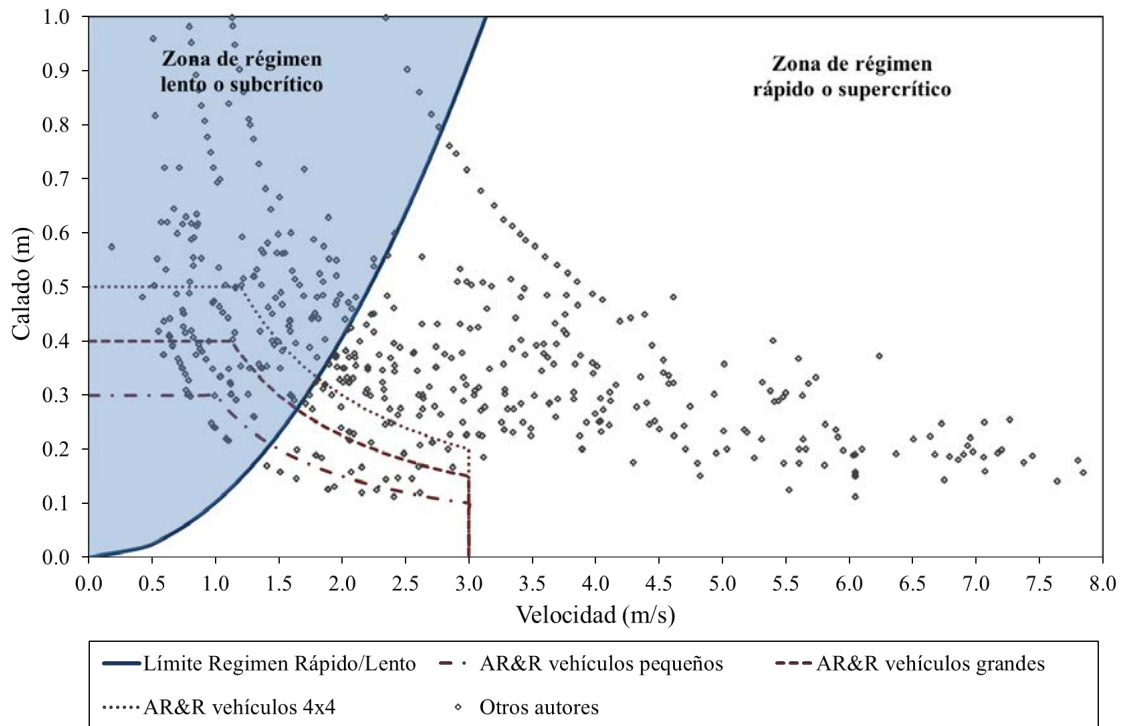
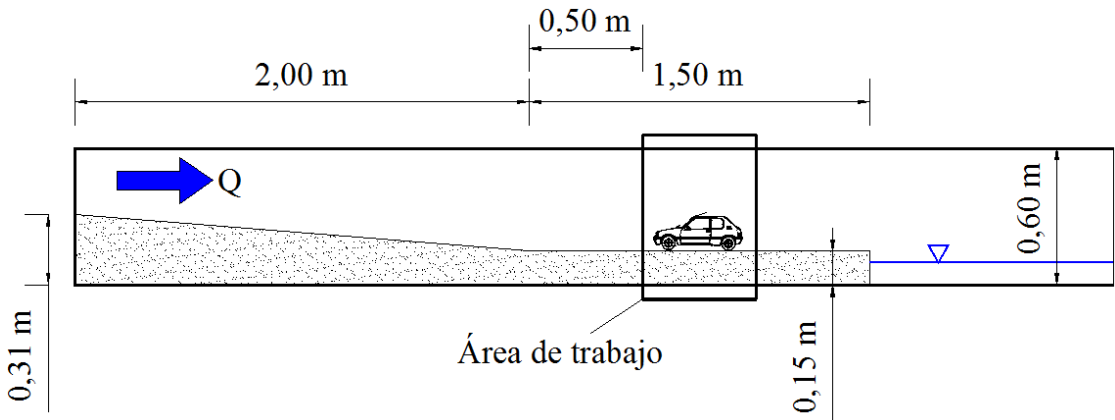


Figura IV-9. Dominio de puntos de inestabilidad de vehículos analizado por la totalidad de autores considerados en este trabajo

Estas representaciones delimitan la distribución de puntos de inestabilidad a comprobar en los ensayos experimentales. Las zonas de diferente régimen serán tratadas de manera independiente, de forma que los puntos a comprobar en cada zona serán obtenidos de manera diferente en cuanto a la configuración del modelo utilizado para los ensayos. La representación de los criterios de estabilidad propuesto por la guía AR&R (Shand *et al.*, 2011) delimitan el umbral inferior de seguridad definido hasta el momento, con lo cual se comprobarán puntos calado-velocidad por debajo de estos umbrales para asegurar la validez de dicho criterio.

Los puntos velocidad-calado a comprobar se representan según familias, tal que éstos cubren el dominio completo del gráfico velocidad-calado estudiado por los diversos investigadores hasta el momento. Los puntos de cada familia irán creciendo en intensidad, es decir mayor velocidad y calado, a modo de escalones, obteniéndose cada escalón aumentando el caudal de ensayo. La propuesta de puntos de ensayo se representa en la Figura IV-11 y Figura IV-12, para una escala de trabajo de 1:18, agrupándose en nueve familias para la zona de régimen rápido y ocho para la zona de régimen lento. Para obtener tales combinaciones de puntos se propone la construcción de una rampa local, de unos dos metros de longitud, dentro del canal de pendiente variable del laboratorio. Dicha rampa continúa con 1.5 metros de superficie en horizontal y elevada 15 cm por encima de la solera del canal de pendiente variable, lugar en el que el vehículo se encontrará para verse sometido a las condiciones hidráulicas fruto de la combinación del caudal de ensayo y la pendiente establecida. En la Figura IV-10 se representa un esquema del modelo de pendiente local descrito.



**Figura IV-10.** Esquema del modelo de pendiente local diseñada para los ensayos de estabilidad de vehículos

Con el objetivo de ofrecer continuidad entre la zona de pendiente y la zona horizontal, en la que se sitúa el coche, el modelo ha sido construido en chapa de acero galvanizado de 1.2 mm de espesor, la cual permite ser doblada un cierto ángulo sin plastificar para establecer la pendiente deseada al modelo. En la Figura IV-13 se observa un plano del modelo (alzado, planta y perfil transversal) con mayor detalle que el esquema anterior, en el que se distingue con un tramado más oscuro la zona de pendiente (situada completamente en horizontal) y una separación de 2 mm entre ésta y la zona horizontal para permitir el curvado de la chapa al fijar la pendiente deseada. Aguas abajo del modelo, en la zona horizontal, se ha colocado una tajadera a modo de vertedero de altura

variable, que permite modificar la condición de contorno cuando la pendiente del modelo se fija a 0% y por tanto se trabaja en régimen lento.

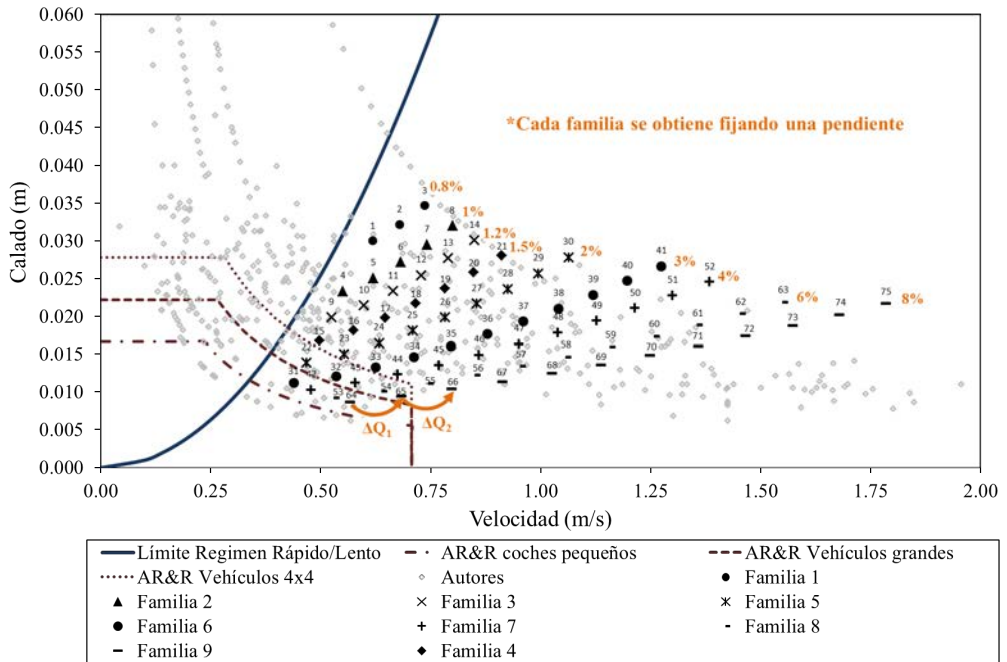


Figura IV-11. Propuesta de puntos de ensayo en la zona de domino de régimen rápido. Escala de trabajo 1:18

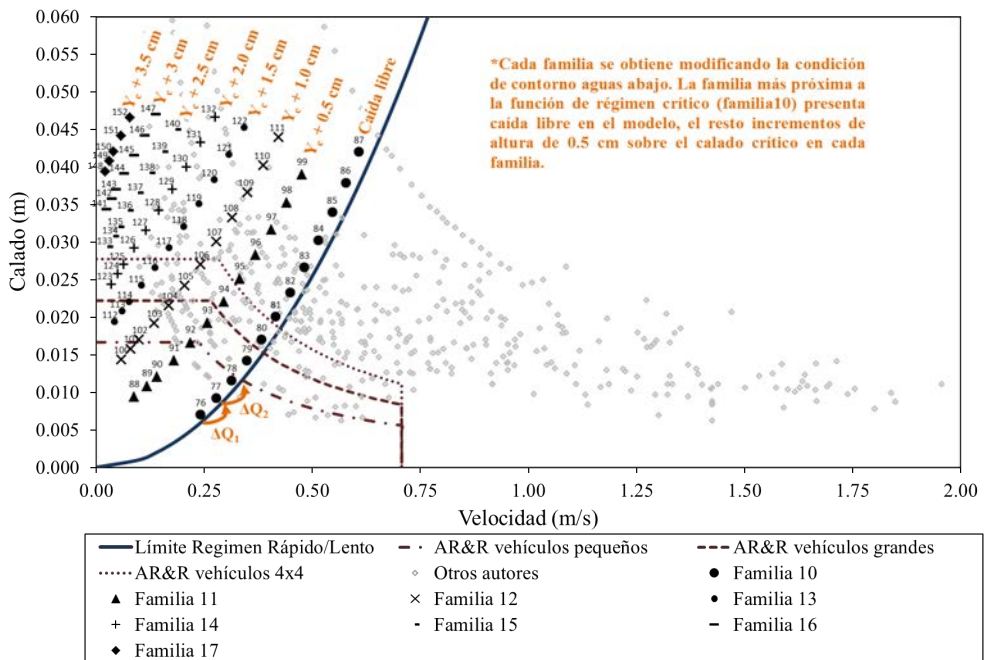
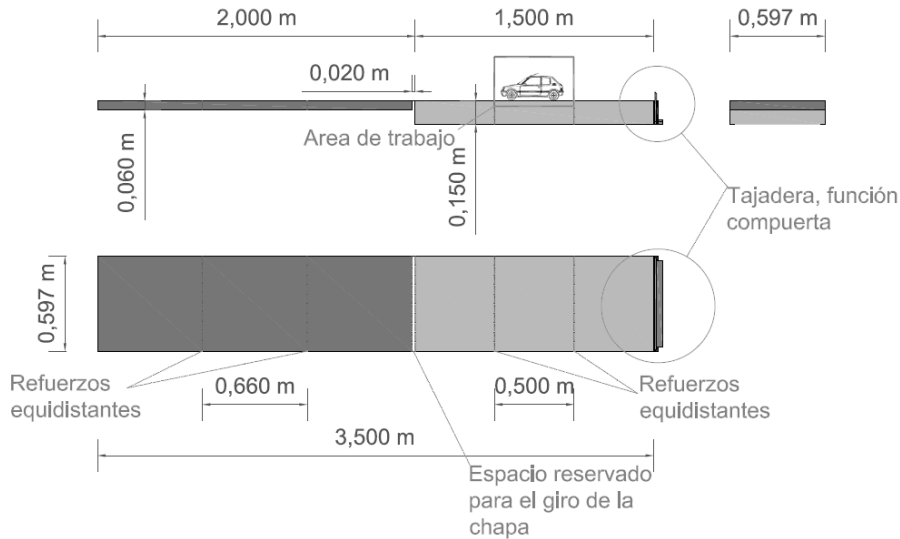


Figura IV-12. Propuesta de puntos de ensayo en la zona de domino de régimen lento. Escala de trabajo 1:18



**Figura IV-13.** Plano detallado del modelo de pendiente local variable

La necesidad de construcción de dicho modelo local de pendiente viene dada por varios motivos:

- Mayor agilidad en el cambio de pendiente que para el canal completo
- La localización de este modelo aguas arriba del canal evita grandes tiempos de espera hasta considerar el flujo estable
- Ahorro de tiempo y esfuerzo, al situarse el modelo muy próximo al cuadro de control de las compuertas
- Permite múltiples combinaciones de velocidades y calados con el vehículo en posición horizontal. En este sentido no hay descomposición vectorial del peso de éste, como sí lo habría al modificar la pendiente del canal, y por tanto los resultados obtenidos se pueden comparar directamente con los resultados obtenidos por el resto de investigadores
- Permite trabajar tanto el régimen rápido, estableciendo pendiente, como en régimen lento, situando el modelo totalmente horizontal
- Al presentar 15 cm de elevación sobre la solera del canal, se puede colocar un pequeño vertedero de altura variable, que permite controlar la condición de contorno aguas abajo (para condiciones de régimen lento) directamente en el modelo local, sin necesidad de trabajar con el vertedero del canal situado a prácticamente 20 metros de distancia.

En definitiva, el modelo construido dentro del canal de pendiente variable ofrece la flexibilidad necesaria, en cuanto a variabilidad de combinaciones de velocidades y calados, y una gran operatividad, en cuanto a que optimiza los tiempos de los ensayos gracias a la localización y a la posibilidad de fijar las condiciones de contorno en el propio modelo local. En la Figura IV-14 se observa el modelo una vez instalado en el canal, con la zona de pendiente completamente horizontal, dispuesto para trabajar en condiciones de régimen lento. Se observa también la tajadera y las fijaciones disponibles para establecer la altura deseada de vertedero aguas abajo del modelo.



**Figura IV-14.** Modelo de pendiente local variable construido y colocado aguas arriba del canal

Para conseguir los valores de velocidad y calado representados en la Figura IV-11 y Figura IV-12, para la planificación de los ensayos, se ha desarrollado un sencillo modelo numérico. En primer lugar, en condiciones de régimen rápido (Figura IV-15), se asume inicialmente (se comprueba en laboratorio) que en la zona de pendiente se desarrolla el calado normal, por tanto para las condiciones de caudal y pendiente establecidas el calado normal en la pendiente será la condición de contorno aguas arriba para la zona horizontal. Conocida la geometría del canal e impuesta una pendiente constante, el régimen permanente y uniforme da lugar a un calado constante, el calado normal, que se calcula a partir de la ecuación  $i=I$ , siendo  $i$ : la pendiente geométrica del modelo y  $I$ : la pendiente motriz. Esta última se ha evaluado a partir de la fórmula de Manning [IV-8].

$$I = \frac{n^2 v^2}{R_h^{4/3}} \quad \text{ó} \quad v = \frac{1}{n} I^{1/2} R_h^{2/3} \quad \text{[IV-8]}$$

siendo,

- $n$  [-]: coeficiente de Manning
- $v$  [m/s]: velocidad media del flujo en la sección
- $R_h$  [m]: radio hidráulico. Se evalúa como el cociente entre el área mojada y el perímetro mojado en una sección.

Por tanto, imponiendo régimen uniforme  $I=i$ , y expresando la fórmula de Manning como función del caudal de circulación,  $Q = v \cdot A_w$ , siendo  $A_w$ : área mojada del flujo, se obtiene la siguiente expresión:

$$Q = \frac{A_w}{n} i^{1/2} R_h^{2/3} \quad \text{[IV-9]}$$

Se trata de una expresión función del calado normal  $y_n$ :

$$Q(y_n) = \frac{B \cdot y_n}{n} i^{1/2} \left[ \frac{B \cdot y_n}{B + 2y_n} \right]^{2/3}$$

Puesto que se trata de una ecuación no lineal, el calado normal debe ser obtenido mediante iteraciones, para lo cual se ha utilizado el método numérico de Newton-Raphson, que se define con la expresión [IV-10], siendo  $i$  el contador de iteraciones.

$$y_{n(i+1)} = y_{n(i)} - \frac{f(y_{ni})}{f'(y_{ni})} \quad \text{[IV-10]}$$

La función  $f(y_n)$  y su derivada  $f'(y_n)$  a considerar en el método de Newton-Raphson se presentan en la expresión [IV-11] y [IV-12] respectivamente.

$$f(y_n) = Q - \frac{B \cdot y_n}{n} i^{1/2} \left[ \frac{B \cdot y_n}{B + 2y_n} \right]^{2/3} \quad \text{[IV-11]}$$

$$f'(y_n) = -\frac{B^{5/3} \cdot i^{1/2}}{n} \frac{2}{3} \left[ \frac{y_n}{B + 2y_n} \right]^{1/3} \frac{B}{(B + 2y_n)^2} \quad \text{[IV-12]}$$

Las iteraciones finalizan cuando el error, definido en la expresión [IV-13], es prácticamente nulo.

$$Error [\%] = \frac{y_{ni} - y_{n(i+1)}}{y_{ni}} \quad \text{[IV-13]}$$

De esta manera se determinan los calados normales para cada una de las combinaciones de pendientes y caudales que dan lugar a cada uno de los casos de estudio en situación de régimen rápido y que se listan más adelante. La modelación de la superficie libre en la zona horizontal del modelo se realiza a partir de la integración directa de la ecuación diferencial ordinaria conocida como ecuación de las curvas de remanso [IV-14].

$$\frac{dy}{dx} = \frac{i - I}{1 - Fr^2} \quad \text{[IV-14]}$$

El método numérico utilizado para su resolución es el método de Runge-Kutta de 4º orden (Subramanya, 2009):

dado,

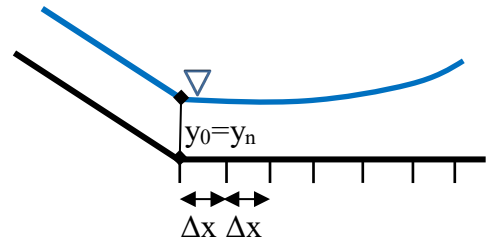
$$\frac{dy}{dx} = f(x, y); \quad y(x_0) = y_0$$

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_0} = f(x_0, y_0)$$

y a partir de la discretización del dominio (zona del modelo horizontal), en intervalos  $\Delta x$ , se calculan las variables instrumentales:

$$\begin{aligned} K_1 &= f(x_1, y_1) \\ K_2 &= f\left(x_i + \frac{1}{2}\Delta x, y_i + \frac{1}{2}K_1\Delta x\right) \\ K_3 &= f\left(x_i + \frac{1}{2}\Delta x, y_i + \frac{1}{2}K_2\Delta x\right) \\ K_4 &= f\left(x_i + \frac{1}{2}\Delta x, y_i + \frac{1}{2}K_3\Delta x\right) \end{aligned}$$

Se puede calcular por tanto el valor del calado en una sección  $y_{i+1}$  a partir del valor del calado en la sección precedente  $y_i$  a partir de la expresión [IV-13]. Dada una condición inicial  $(x_0, y_0) \rightarrow (i = 0)$  se calcula  $y_{0+1} = y_1$ , y después  $y_2 \dots$ . Se trata de un método que ofrece una excelente precisión aunque no permite incorporar fenómenos locales (y pérdidas de carga localizadas) en el cálculo.



$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4)\Delta x \quad \text{[IV-15]}$$

En este caso la integración se ha realizado desde aguas arriba hasta aguas abajo, considerando como condición inicial  $(x_0, y_0)$  la posición de la sección en el punto de inicio de la zona del modelo horizontal y el calado normal obtenido en la pendiente.

Tras el cálculo de la superficie libre en la zona horizontal se determina el valor del calado en la sección de control (Figura IV-10), situada a 0.5 m del final de la pendiente. El vehículo se sitúa unos 10 cm aguas abajo de ésta tal y como se describirá en apartados sucesivos. Una vez obtenido el calado numéricamente en dicha sección (en los experimentos se medirá el calado en cada caso), y conociendo el caudal de ensayo, se puede determinar la velocidad media de la sección:

$$v = \frac{Q}{A_w(y)}$$

siendo,

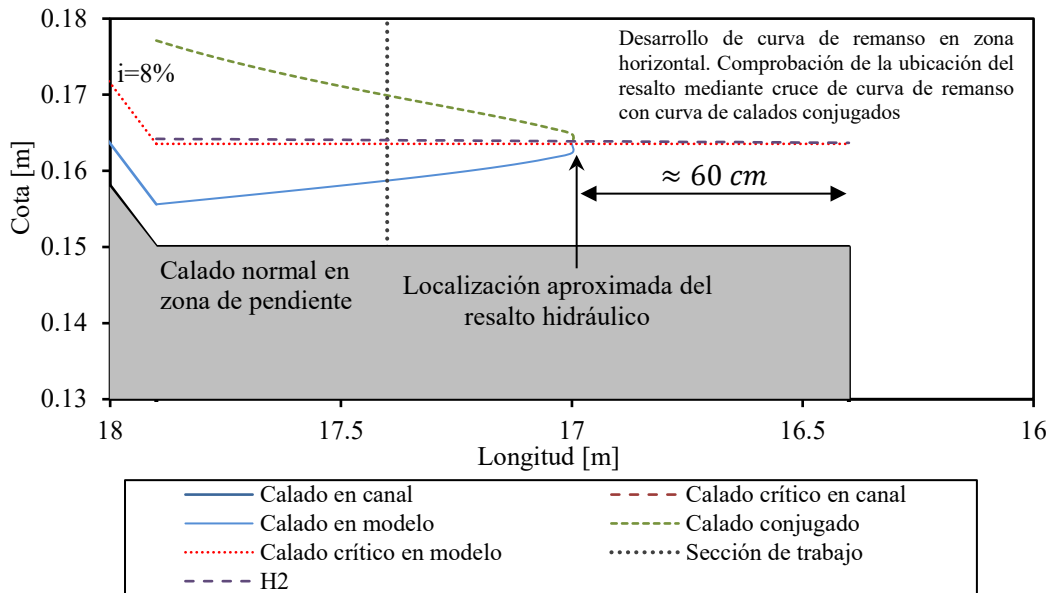
- $A_w(y)$ : área mojada, determinada como el producto del calado por el ancho del canal (0.6 m)
- $Q$ : caudal del ensayo

De esta manera, para condiciones de flujo en régimen rápido se pueden calcular los 74 puntos (velocidad y calado) en la sección de control, con los que evaluar la inestabilidad de los vehículos a escala, propuestos en la zona de régimen rápido según se observa en la Figura IV-11.

Para caudales de ensayo bajos o pendientes poco pronunciadas, cabe la posibilidad de que se genere un resalto, es decir que el régimen rápido no se produzca en la totalidad de la zona horizontal del modelo debido a una débil intensidad del flujo. La localización del resalto en la sección de control o próximo a ella imposibilitaría determinar correctamente el calado y la velocidad en esa sección, con lo que se requiere prever la localización de éste para las diferentes combinaciones de pendientes y caudales. Para estimar la posición del resalto se determina en primer lugar la curva conjugada correspondiente a los calados conjugados de la curva de remanso H3 que se produce en la zona horizontal del modelo. Para ello se calcula el calado conjugado en cada una de las secciones a lo largo de los 1.5 m de la zona horizontal, empleando para ello la ecuación de Belanger [IV-16].

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad \text{[IV-16]}$$





**Figura IV-15.** Lámina de agua calculada del modelo físico de pendiente local variable. Condiciones de régimen rápido o supercrítico;  $Q$ : 2.96 l/s y 8% de pendiente

A su vez se debe representar el perfil de lámina libre que se daría en situación de régimen lento en la zona horizontal del modelo, y que daría lugar a una curva H2. Para el desarrollo de esta última se ha realizado la integración directa desde aguas abajo hacia aguas arriba, utilizando el mismo método de Runge-Kutta de 4º orden, e imponiendo como condición de contorno el calado crítico. La localización del resalto se prevé que se dé en la sección de cruce de la curva H2 con la curva conjugada de la H3, tal y como se describe gráficamente en el ejemplo de la Figura IV-15, para un caudal de ensayo de 2.96 l/s y una pendiente del 8%. En este ejemplo la localización del resalto se estima que se dé a unos 60 cm desde la sección más aguas abajo del modelo.

Los 77 puntos de comprobación, situados en la zona de régimen subcrítico, distribuidos en 8 familias de curvas e indicados en la Figura IV-12, se determinan realizando un procedimiento similar al realizado para la situación en régimen rápido o supercrítico. En este caso se realiza una integración numérica directa a partir del método de Runge-Kutta de 4º orden, desde aguas abajo hasta aguas arriba, desarrollándose una curva H2 en los 3.5 m completos del modelo. En este caso la pendiente impuesta es del 0% para asegurar régimen lento a lo largo de todo el modelo. Puesto que la longitud disponible para ubicar el vehículo es mucho mayor que en el caso anterior, la sección de control en la que se calculan los valores de calado y velocidad se propone justo en el final de la pendiente, es decir 0.5 m aguas arriba de la sección propuesta para el caso de régimen rápido. Cada familia de puntos se obtendrá modificando la condición de contorno aguas abajo, de manera que la familia más próxima a la función de régimen crítico (familia 10) es la que se obtiene cuando la condición de contorno aguas abajo es el calado crítico. El resto de familias de curvas se irán obteniendo mediante incrementos de 0.5 cm en la condición de contorno aguas abajo, utilizando el vertedero de altura variable colocado en el modelo.

Mediante el desarrollo de esta herramienta numérica se ha planificado la cobertura de puntos (pares de valores velocidad-calado) en todo el dominio de análisis. Se trata de una planificación sistemática de incrementos de la intensidad del flujo, de manera que en la comprobación de cada familia de puntos el último punto a ensayar será el que suponga la inestabilidad del vehículo. La unión de los diferentes puntos de inestabilidad (uno de cada familia) generará una curva umbral entre la zona estable e inestable de cada vehículo ensayado. En el *Anejo C Planificación numérica de cobertura de puntos (velocidad-calado) para los ensayos experimentales de inestabilidad de vehículos* se listan las configuraciones establecidas para la obtención de cada uno de los puntos, es decir la combinación de caudal y pendiente o caudal y condición de contorno aguas abajo, para situación en régimen rápido y lento respectivamente.

Se ha llevado a cabo el ajuste del coeficiente de Manning del modelo numérico, a partir de la obtención de calados experimentales en 9 puntos situados en el eje central del modelo, con una mayor densidad en la zona horizontal de éste, tal y como se muestra en el esquema de la Figura IV-16. Dichos calados se han tomado para dos caudales de ensayo, 6.26 l/s y 17.75 l/s. Los calados medidos se recogen en la Tabla IV-1.

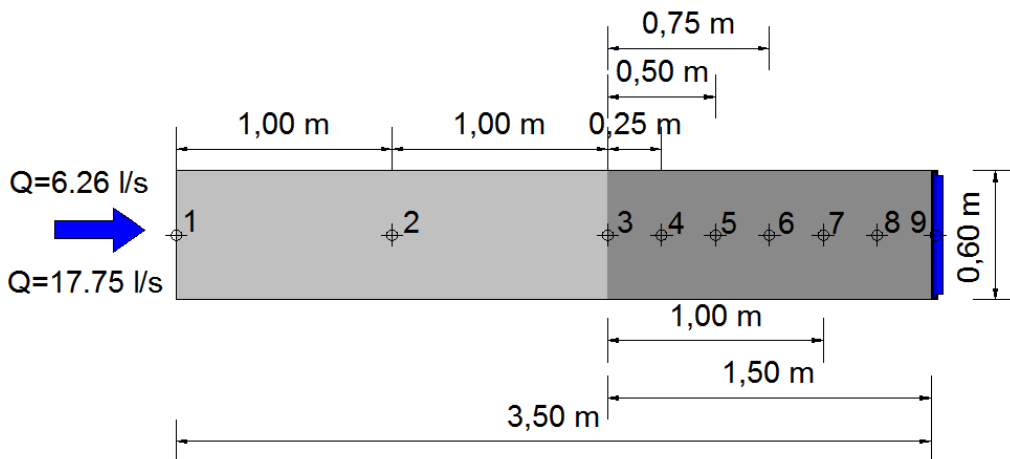
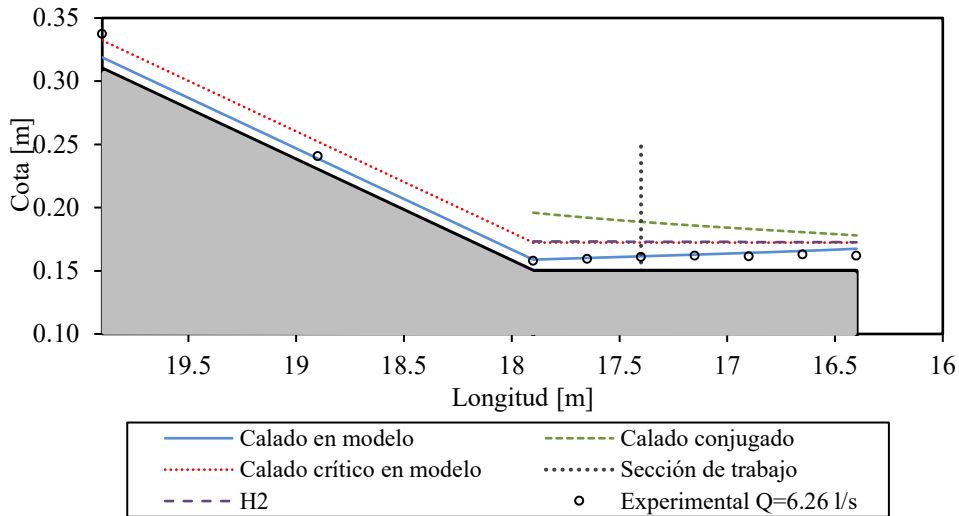


Figura IV-16. Localización de los puntos de medición experimental de calados

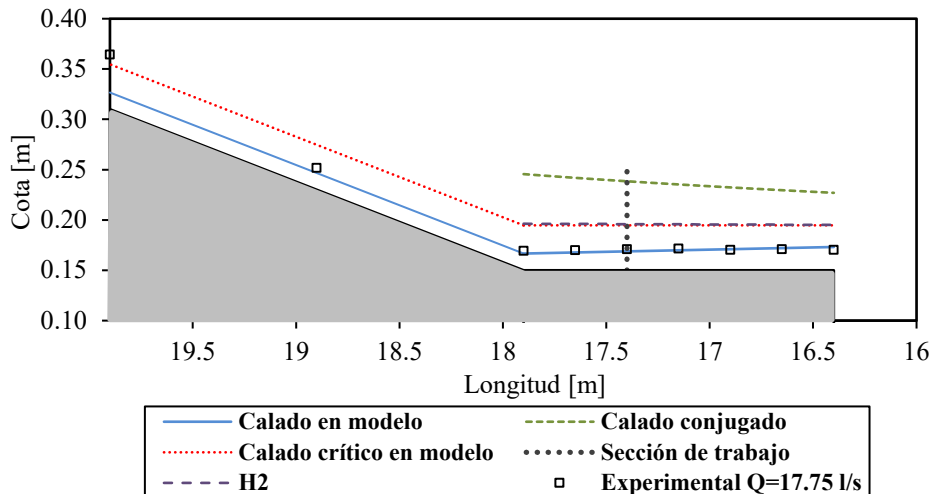
Tabla IV-1 Calados experimentales en los 9 puntos de comprobación

Punto	Posición (m)	Calado (Q=6.26 l/s) (m)	Calado (Q=17.75 l/s) (m)
1	19.90	0.0275	0.0543
2	18.90	0.0107	0.0217
3	17.90	0.0081	0.0193
4	17.65	0.0095	0.0201
5	17.40	0.0111	0.0209
6	17.15	0.0121	0.0215
7	16.90	0.0116	0.0205
8	16.65	0.0131	0.0210
9	16.40	0.0120	0.0203



**Figura IV-17.** Comparación del modelo numérico con los calados tomados experimentalmente para  $Q=6.26$  l/s

El coeficiente de Manning que ofrecía una mejor reproducción de la lámina libre experimental fue de un valor de 0.010. Se calibró el valor del coeficiente para el caudal de 6.26 l/s (Figura IV-17) y se validó para el caudal de 17.75 l/s (Figura IV-18). La correspondencia del valor numérico con el experimental en la zona de pendiente únicamente es correcta en el último punto, lo cual indica que la longitud de la pendiente es suficiente para el desarrollo del calado normal, hipótesis adoptada en el cálculo numérico. Se observa como los calados se van ajustando según se avanza en la pendiente hacia la zona horizontal, pues el desarrollo de la curva de remanso tiende al calado normal, impuesto en la última sección de la zona de pendiente y primera de la zona horizontal.



**Figura IV-18.** Comparación del modelo numérico con los calados tomados experimentalmente para  $Q=17.75$  l/s

#### IV.6. Elección y características de los vehículos a escala ensayados y sus prototipos

La elección de los vehículos a escala para realizar los ensayos de estabilidad ante corrientes de agua es fundamental, puesto que los resultados obtenidos deben ser escalados a prototipo para que sean aplicables en situaciones reales de inundaciones. Se debe enfocar este estudio para que pueda ser aplicado de la manera más generalista posible, para que dado un coche real se le pueda asociar una curva de estabilidad tal que se tengan garantías que el vehículo permanecerá estable si las condiciones hidráulicas a las que se vea sometido sean inferiores a las que determinan dicha curva.

Para llevar a cabo la elección de los vehículos se ha elaborado una lista de 54 turismos como muestra representativa de aquellas marcas y modelos que circulan por nuestras ciudades (Tabla IV-2). Dicha muestra recoge vehículos de diversas características; desde vehículos de menos de una tonelada de peso hasta otros próximos a tres toneladas o de alturas libres hasta el suelo de apenas 10 cm hasta más de 20 cm.

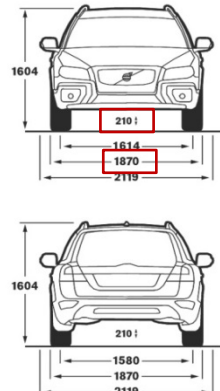
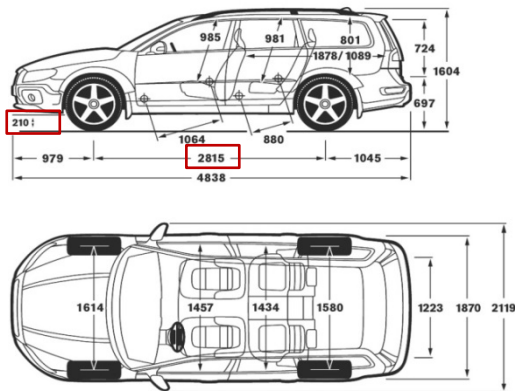
Éstas últimas son algunas de las variables físicas de los vehículos que indican mayor o menor estabilidad ante situaciones de corrientes de agua. Por ejemplo, cuanto mayor altura libre hasta el suelo más calado será necesario para que la fuerza de empuje vertical del agua haga efecto sobre el vehículo. La fuerza gravitacional [IV-4], basada en el peso del vehículo, es una fuerza estabilizadora, en mayor medida cuanto más pesado sea el vehículo. Y otras dimensiones físicas como la superficie en planta del vehículo también influye en la estabilidad de estos, puesto que a menor superficie en planta se desplaza menos volumen de agua para un mismo calado y por tanto la fuerza de flotación [IV-2] es menor. Agrupando estas variables físicas, las cuales son fácilmente accesibles en las fichas técnicas para cualquier vehículo, se propone un coeficiente de estabilidad ( $SC$ ) para cualquier vehículo según la expresión [IV-17].

$$SC = \frac{GC \cdot M_c}{PA} \quad \text{[IV-17]}$$

donde,

- $SC [kg/m]$ : Coeficiente de estabilidad
- $GC [m]$ : Altura libre del vehículo
- $M_c [kg]$ : Peso en vacío del vehículo
- $PA [m^2]$ : Área en planta del vehículo. Calculado como la longitud por la anchura indicados en la ficha técnica.

Las variables del numerador de la expresión [IV-17], reflejan que un valor mayor de éstas suponen más estabilidad para el vehículo, y por el contrario, cuanto más área en planta más fuerza de flotación actuará para un mismo calado, con lo cual más inestabilidad. Se trata de un simple indicador que aporta una idea sobre la estabilidad de los vehículos y que puede ser fácilmente comparado entre más modelos.



$$SC = \frac{GC \cdot M_c}{PA}$$

$$SC = \frac{0.21 \cdot 1,854}{4.838 \times 1.870}$$

$$SC[\text{kg/m}] = 43.03$$

Volvo XC70 D4 (181 CV) man/aut

Peso: 1,854 kg

**Figura IV-19.** Ejemplo de cálculo del coeficiente de estabilidad para el vehículo Volvo XC70

En la Tabla IV-2 se recoge la muestra de vehículos representativa comentada anteriormente, asociando a cada vehículo su coeficiente de estabilidad y ordenados de menor a mayor.

**Tabla IV-2** Muestra de vehículos representativos, características físicas y coeficiente de estabilidad

Marca	Modelo	Long. [mm]	Ancho [mm]	Alto [mm]	Peso vacío [kg]	Volumen aprox. [m <sup>3</sup> ]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Altura libre [mm]	SC [Kg/m]
Volkswagen	Golf MK1 GTi 3p	3,815	1,630	1,395	840	8.67	96.8	125	16.9
Ford	Focus	4,337	1,839	1,500	1,392	11.96	116.4	100	17.5
Peugeot	205 GTi	3,705	1,572	1,355	875	7.89	110.9	120	18.0
Renault	Laguna 2.0 16v 140cv	4,695	1,811	1,445	1,302	12.29	106.0	120	18.4
Fiat	Dynamique R-Link 5P	3,380	1,380	1,405	600	6.55	91.6	145	18.7
Renault	Megane 1.5 dci eco2 90 cv expression 5p	4,302	1,808	1,471	1,215	11.44	106.2	120	18.7
Seat	Ibiza 1.2i	3,683	1,610	1,421	910	8.43	108.0	124	19.0
Peugeot	208 Active 2015	3,962	1,739	1,460	948	10.06	94.2	140	19.3
Volkswagen	Beetle 2005-2010	4,130	1,720	1,501	1,157	10.66	108.5	119	19.4
Renault	Clio Sport RS	3,812	1,639	1,417	1,035	8.85	116.9	120	19.9
Peugeot	207 SW RC 2010	4,156	1,748	1,510	1,353	10.97	123.3	111	20.7
Volvo	S60 2010-2013	4,628	2,096	1,483	1,680	14.39	116.8	124	21.5
Toyota	Yaris 5p 1.0 VVT-I	3,785	1,694	1,529	985	9.80	100.5	140	21.5
Volkswagen	Scirocco 2014	4,257	1,811	1,407	1,280	10.85	118.0	130	21.6
Seat	León Cupra R MK1 1999	4,184	1,742	1,439	1,320	10.49	125.9	120	21.7
Peugeot	Coupé 407	4,815	1,868	1,399	1,799	12.58	143.0	110	22.0
Volkswagen	Passat 2.5LManual 2013	4,868	1,835	1,487	1,436	13.28	108.1	138	22.2
Renault	Twingo Societe 2013 dCi 75	3,607	1,654	1,470	980	8.77	111.7	137	22.5
Toyota	Avensis 1.6 VVTI	4,641	1,760	1,481	1,255	12.10	103.7	150	23.0
Seat	Toledo IV 1.2 MT	4,482	1,706	1,461	1,175	11.17	105.2	150	23.1
Opel	Corsa C 1.3 CDTI	3,817	1,645	1,440	1,035	9.04	114.5	140	23.1
BMW	i3	3,999	1,775	1,578	1,270	11.20	113.4	130	23.3
Toyota	Auris Touring Sports 1.8 Hybrid	4,560	1,760	1,460	1,335	11.72	113.9	140	23.3
BMW	M5	4,855	1,846	1,512	1,830	13.55	135.0	117	23.9
Toyota	iQ 100G CVT 1.0 (2010)	2,985	1,680	1,500	890	7.52	118.3	135	24.0
Toyota	Corolla Spacio II 1.8 AT	4,240	1,695	1,610	1,170	11.57	101.1	155	25.2

Marca	Modelo	Long. [mm]	Ancho [mm]	Alto [mm]	Peso vacío [kg]	Volumen aprox. [m <sup>3</sup> ]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Altura libre [mm]	SC [Kg/m]
Skoda	Fabia 1.2 MPI/55kW Elegance	4,000	1,642	1,522	1,070	10.00	107.0	158	25.7
Mini	Cooper	3,660	1,688	1,400	1,150	8.65	133.0	139	25.9
BMW	650	5,007	1,894	1,392	1,940	13.20	147.0	127	26.0
Honda	Accord	4,945	1,845	1,480	1,631	13.50	120.8	147	26.3
Volkswagen	Jetta 2.0L TDI Highline AT	4,659	1,778	1,453	1,439	12.04	119.6	159	27.6
Peugeot	Partner Combi 2002-2008	4,140	1,720	1,800	1,163	12.82	90.7	170	27.8
Opel	Astra J 1.3d MT	4,419	1,814	1,510	1,373	12.10	113.4	165	28.3
Mercedes	Clase C	4,581	1,770	1,448	1,540	11.74	131.2	150	28.5
Volkswagen	Polo Highline Diesel	3,970	1,682	1,453	1,145	9.70	118.0	168	28.8
Seat	Altea Freetrack 2.0 TDI CR 140 CV 4WD	4,493	1,788	1,622	1,615	13.03	123.9	160	32.2
Peugeot	Tepee 4x4 Dangel EXTREME 1.6 Vti 98 (E5)	4,380	1,810	1,801	1,320	14.28	92.5	200	33.3
Renault	Kangoo Combi 1.5 DCI Professional SL 70 cv	4,213	1,799	2,133	1,389	16.17	85.9	183	33.5
Volkswagen	Tiguan 2.0T FWD Manual	4,433	1,809	1,665	1,539	13.35	115.3	175	33.6
Ford	Transit	4,863	1,974	1,997	1,708	19.17	89.1	190	33.8
Mitsubishi	ASX LS 5 Door Wagon Manual	4,295	1,770	1,525	1,325	11.59	114.3	195	34.0
Mercedes	GLA	4,417	1,804	1,494	1,505	11.90	126.4	183	34.6
Bentley	Continental GT Speed	4,806	1,943	1,394	2,395	13.02	184.0	142	36.4
Range Rover	Evoque	4,355	1,965	1,635	1,700	13.99	121.5	215	42.7
Opel	Zafira B 1.9d AT	4,467	1,801	1,635	2,190	13.15	166.5	160	43.6
Volkswagen	Touareg	4,795	1,940	1,709	2,153	15.90	135.4	201	46.5
Volvo	XC60 2008-2013	4,628	1,890	1,709	1,830	14.95	122.4	231	48.3
Audi	Q7	5,086	1,983	1,737	2,370	17.52	135.3	206	48.4
Opel	Vivaro 2.0 (AC)	4,782	1,904	1,965	2,700	17.89	150.9	164	48.6
BMW	X6	4,876	1,983	1,684	2,380	16.28	146.2	202	49.7
Volvo	XC90 2007-2014	4,811	1,900	1,781	1,976	16.28	121.4	231	49.9
Porsche	Cayenne Turbo	4,846	1,939	1,702	2,290	15.99	143.2	213	51.9
Mitsubishi	Montero/Pajero	4,900	1,875	1,870	2,310	17.18	134.5	235	59.1
Mercedes	G55 AMG	4,662	1,864	1,931	2,580	16.78	153.8	220	65.3

El coeficiente de estabilidad descrito hasta el momento tiene sentido en caso de que se consideraran los vehículos con un neumático idéntico y sobre una misma superficie, es decir con un mismo coeficiente de rozamiento. Este coeficiente no presenta tanta facilidad de obtención como los parámetros tenidos en cuenta hasta ahora, pues no se encuentra en la ficha técnica del vehículo. Se define en este caso el coeficiente de estabilidad modificado, según la expresión [IV-18].

$$SC_{mod} = \frac{GC \cdot M_c}{PA} \cdot \mu \quad \text{[IV-18]}$$

donde,

- $SC_{mod}$  [kg/m]: Coeficiente de estabilidad modificado
- $\mu$ : coeficiente de rozamiento

Se ha comprobado dicho coeficiente de estabilidad modificado para los estudios de Shu *et al.* (2011), por haber ensayado más de un vehículo a escala, para poder compararlos, y haber

determinado el coeficiente de rozamiento de éstos. En la Tabla IV-3 se recogen las características de los vehículos estudiados, así como el coeficiente de estabilidad modificado asociado a cada uno. Por otro lado, en la Figura IV-20 se representan las curvas de estabilidad obtenidas, sobre las que se indica el coeficiente de estabilidad asociado a cada vehículo. Con dicho indicador se estiman los niveles de estabilidad de los vehículos, situándose la curva asociada al vehículo de mayor coeficiente de estabilidad en la parte superior, y la asociada al de menor coeficiente en la parte inferior.

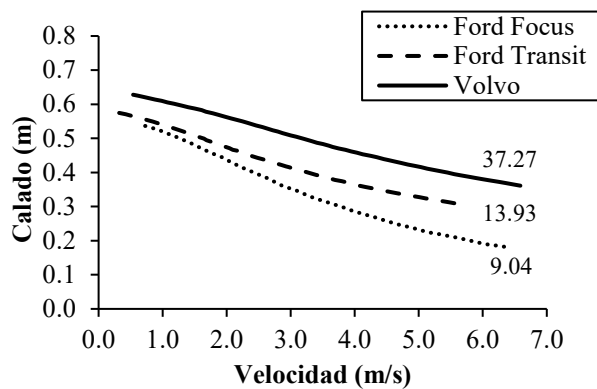
**Tabla IV-3** Características de los vehículos estudiados por Shu *et al.* (2011)

Ref.	Vehículo	Long. <sup>1</sup> [mm]	Ancho <sup>1</sup> [mm]	Peso vacío <sup>2</sup> [kg]	Altura libre <sup>3</sup> [mm]	$\mu$	SC <sub>mod</sub> [Kg/m]
Shu <i>et al.</i> (2011)	Ford Focus	4,320	1,782	1,392	100	0.50	9.04
	Ford Transit	4,860	1,980	1,809	190	0.39	13.93
	Volvo XC90	4,806	1,890	2,155	231	0.68	37.27

<sup>1</sup> Longitud del modelo escalado a prototipo

<sup>2</sup> Peso del modelo escalado a prototipo

<sup>3</sup> Altura libre obtenida de las fichas técnicas de los vehículos prototipo



**Figura IV-20.** Representación conjunta de las funciones límite de estabilidad propuestas por Shu *et al.* (2011)

Se asume por tanto que el coeficiente de estabilidad modificado propuesto es adecuado para poder comparar niveles de estabilidad entre diferentes vehículos. Será éste por tanto una estimación de la posición de las curvas de estabilidad para los vehículos a escala ensayados en este estudio.

En la Figura IV-22 se recogen los vehículos escogidos, de entre los 54 que forman la muestra, así como sus características geométricas, peso, relación de densidades entre el modelo y el prototipo y el coeficiente de estabilidad asociado a cada uno. Los vehículos a escala escogidos, como se comentó anteriormente, se han visto limitados por la disponibilidad de éstos en el mercado. Si bien la disponibilidad de vehículos tipo die-cast es muy amplia, éstos tienen un peso muy superior al que debieran para cumplir el requisito de misma densidad que su prototipo [IV-4] ( semejanza de Froude). Por lo tanto se ha recurrido a vehículos de radiocontrol, lo cual permite que sean más ligeros y el ajuste de peso pueda realizarse añadiendo pequeños sobrepesos hasta cumplir el requisito de misma densidad que su prototipo [IV-4]. Este tipo de vehículos de

radiocontrol no presenta una variedad muy amplia de modelos habituales que se encuentran en nuestras ciudades, por ese motivo el número de vehículos escogidos se ha limitado a la disponibilidad en el mercado.

Cada uno de los vehículos a escala ha requerido una preparación previa a los ensayos; en primer lugar se deben extraer los diferentes mecanismos interiores que permiten el radiocontrol, para que éste se componga únicamente de chasis hueco y la base que sustenta los ejes y las ruedas. Posteriormente se han rellenado de espuma ligera para que éstos sean estancos al agua y por último se ha ajustado el peso de éstos para que la relación de densidades entre modelo y prototipo sea lo más próximo posible a la unidad. Se requiere hacer estanco el vehículo a escala para evitar una entrada de agua en éstos incontrolable y variable en cada uno de ellos. En cualquier caso esta asunción deja del lado de la seguridad los resultados, puesto que la entrada de agua favorece la estabilidad del vehículo. La relación de densidades entre el prototipo y el modelo se ha determinado según la expresión [IV-19].

$$\rho_p = \frac{M_p}{V_p} = \frac{M_p}{l_p \cdot b_p \cdot h_p}; \rho_m = \frac{M_m}{V_m} = \frac{M_m}{l_m \cdot b_m \cdot h_m}$$

$$\frac{\rho_p}{\rho_m} = \frac{M_p \cdot (l_m \cdot b_m \cdot h_m)}{M_m \cdot (l_p \cdot b_p \cdot h_p)} \quad \text{[IV-19]}$$

siendo,

- $\rho_p, \rho_m$ : densidad del prototipo y modelo respectivamente
- $M_p, M_m$ : peso del prototipo y modelo respectivamente
- $V_p, V_m$ : volumen del prototipo y modelo respectivamente
- $l_p, l_m$ : longitud del prototipo y modelo respectivamente
- $b_p, b_m$ : ancho del prototipo y modelo respectivamente
- $h_p, h_m$ : altura del prototipo y modelo respectivamente

Puesto que el volumen exacto del vehículo prototipo no es un dato fácilmente accesible, se determina tanto el volumen del modelo, como del prototipo según el producto de las tres dimensiones conocidas: longitud, anchura y altura. Se comete un error significativo, pero se acepta al cometerse el mismo error en ambos, prototipo y modelo, y al requerir la relación de densidades entre ambos esta ratio será la misma que con los valores de volumen reales. Un valor del ratio de densidades superior a uno indica que se debe añadir peso al vehículo a escala, e inferior a 1 que éste debe ser aligerado para cumplir el requisito de densidades [IV-6].



Figura IV-21. Algunos vehículos a escala rellenos de espuma ligera



Tabla IV-4 Características de los modelos de vehículos seleccionados para los ensayos de estabilidad

Id.	Esc.	Modelo	Long. [mm]	Ancho [mm]	Alto [mm]	GC [mm]	GC esc. [mm]	GC real [mm]	Peso vacío [kg]	Vol. aprox. [m <sup>3</sup> ]	$\rho_m$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_p/\rho_m$	SC (Prototipo)	SC (Modelo)	SC <sub>mod</sub> (Modelo)
1	1:14	BMW 650	355	132	103	6	84	127	0.709	0.00483	146.9	1.00	26.0	17.8	10.3
2.1	1:18	Mini Cooper	205	92	76	8	126	139	0.192	0.00143	134.0	0.99	25.9	26.4	14.7
2.2	1:24	Mini Cooper	152	71	60	5.5	120	139	0.087	0.00065	134.4	0.99	25.9	23.2	12.7
2.3	1:14	Mini Cooper	262	120	102	10	154	139	0.426	0.00321	132.8	1.00	25.9	29.2	15.6
3	1:14	BMW 13	287	122	114	10	154	130	0.464	0.00399	116.2	0.98	23.3	28.6	16.5
4	1:14	Mercedes GLA	315	125	107	12	168	183	0.542	0.00421	128.6	0.98	34.6	32.4	18.0
5	1:18	Mercedes Clase C	255	98	80	9	162	150	0.268	0.00200	134.1	0.98	28.5	31.3	18.8
6	1:14	Range Rover Evoque	312	140	115	12	168	215	0.610	0.00502	121.4	1.00	42.7	32.8	19.0
7	1:14	Porsche Cayenne Turbo	345	139	122	13	182	213	0.838	0.00585	143.2	1.00	51.9	44.5	23.2
8	1:18	Bentley Continental GT Speed	266	108	77	10	180	142	0.407	0.00221	184.0	1.00	36.4	45.9	28.7
9	1:14	Volkswagen Touareg	345	135	120	16	224	201	0.768	0.00559	137.4	0.99	46.5	51.7	30.5
10	1:14	BMW X6	347	140	120	16	224	202	0.852	0.00583	146.2	1.00	49.7	55.0	33.2
11	1:14	Audi Q7	370	135	130	18	252	206	0.878	0.00649	135.2	1.00	48.4	62.0	36.6
12	1:14	Mercedes G55 AMG	334	133	138	20	280	220	0.943	0.00613	153.8	1.00	65.3	83.2	50.3

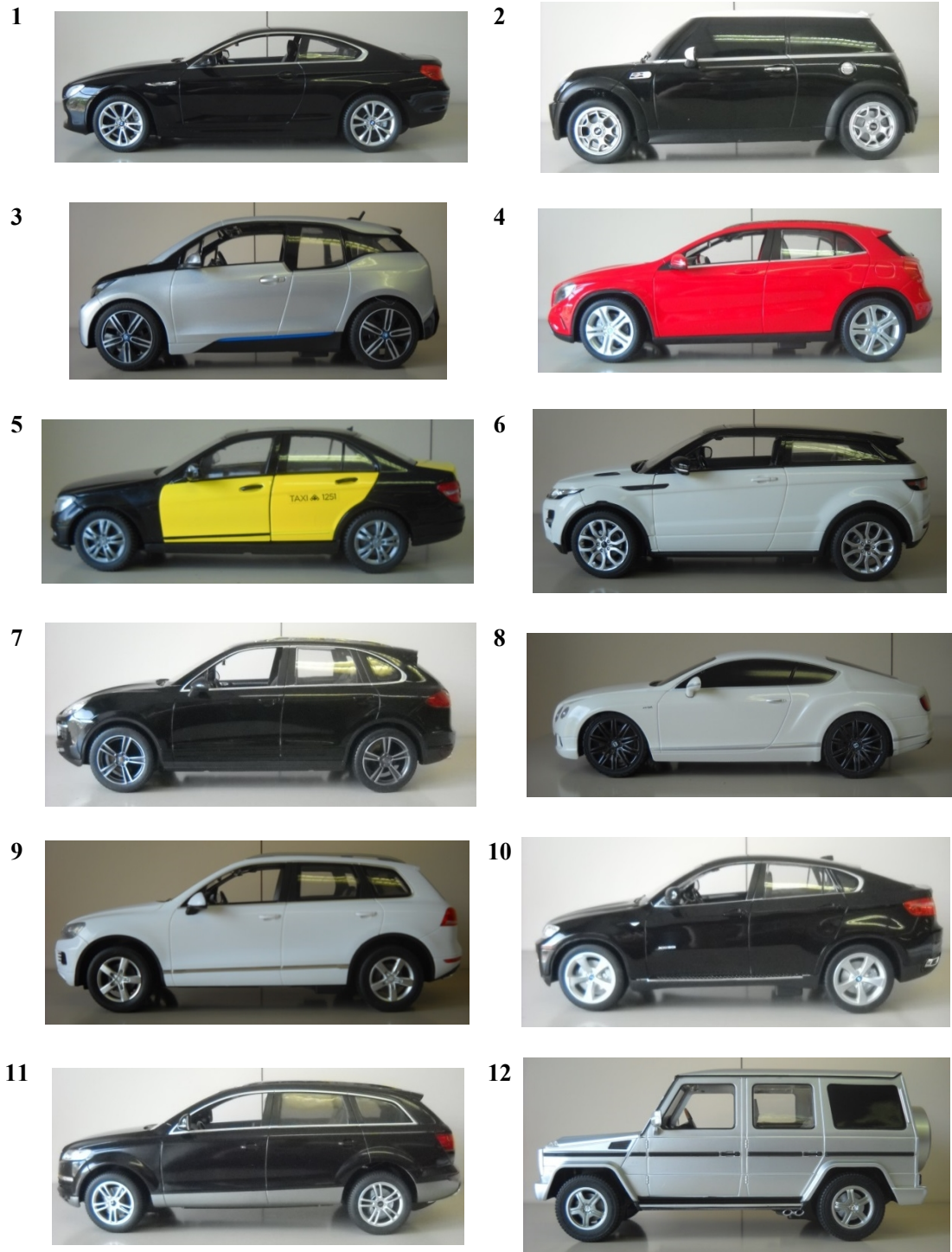


Figura IV-22. Vehículos a escala ensayados

## IV.7. Campaña experimental

La campaña experimental para el análisis de la estabilidad de vehículos enfrentados a corrientes de agua, se ha llevado a cabo en el laboratorio de hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (ECA) en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universitat Politècnica de Catalunya. Para ello ha sido necesaria la construcción de un modelo físico, descrito anteriormente, que proporciona una pendiente variable, y de esa manera se consiguen las combinaciones de variables hidráulicas (velocidad y calado) deseadas. Se han ensayado una total de 12 tipos de vehículos a escala, para los cuales se ha determinado su curva de estabilidad, así como el coeficiente de rozamiento y el calado de flotación de cada uno de ellos. En este apartado se describe la manera como se han llevado a cabo estos ensayos, la instrumentación necesaria y otras comprobaciones y análisis como el grado de influencia de los efectos de escala en los resultados, así como los resultados obtenidos.

### IV.7.1. Determinación de los caudales de ensayo

Como se ha comentado anteriormente, las bombas del laboratorio proporcionan un caudal nominal de 90 l/s la mayor y 60 l/s la menor de ellas. En este estudio, a causa de las escalas de trabajo, los caudales de estudio son inferiores al 50% del proporcionado por la menor de las bombas por lo que únicamente se ha trabajado con esta última. Para determinar el caudal de paso por el canal, y por tanto por el modelo de pendiente local variable, se debe medir el caudal de paso sobre el vertedero triangular de 90° de abertura (Figura IV-23). Se ha utilizado el método de Kindsvater-Shen (Kulin *et al.*, 1975), aplicando un coeficiente de desagüe efectivo para vertederos triangulares parcialmente contraídos [IV-20].

$$Q = 1.366 \cdot h^{5/2} \quad \text{[IV-20]}$$

donde,

- $Q [m^3/s]$  es el caudal que pasa por el vertedero
- $h [m]$  es la carga hidráulica sobre el vértice del vertedero



**Figura IV-23.** Esquema de un vertedero triangular (a), vertedero real (b) y limnómetro (c)

Para determinar la carga de agua ( $h$ ) sobre el vertedero fue necesario tomar en primera instancia la lectura del limnómetro (con precisión a décima de milímetro) (Figura IV-23c) en el vértice de éste, lo que se conoce como el “cero” de las lecturas. En este caso el cero del vertedero

es de 8.90 cm. La carga de agua sobre el vértice de éste se determina como diferencia entre la lectura del limnómetro en la superficie libre del agua y el cero del vertedero.

En la Figura IV-24 se muestra la curva caudales-lectura en vertedero y se indican los caudales que se han ensayado. Se trata de un rango de caudales comprendido entre 0.49 l/s ( $v=0.021\text{m/s}$ ) y 23.23 l/s ( $v=1.78\text{m/s}$ ), que para una escala de trabajo de  $\lambda = 18$  corresponde a (cumpliendo la semejanza de Froude  $Q_p = \lambda^{5/2} \cdot Q_m$ )  $0.67\text{ m}^3/\text{s}$  ( $v=0.09\text{ m/s}$ ) y  $31.93\text{ m}^3/\text{s}$  ( $v=7.5\text{ m/s}$ ), y para una escala de  $\lambda = 14$  correspondería a  $0.36\text{ m}^3/\text{s}$  ( $v=0.08\text{ m/s}$ ) y  $17.04\text{ m}^3/\text{s}$  ( $v=6.68\text{ m/s}$ ). Se han utilizado saltos de caudal que responden a incrementos de 1 cm en la carga hidráulica sobre el vertedero, comenzando por 4 cm de carga correspondientes a 0.44 l/s. El ajuste del nivel se realiza mediante el control de la compuerta, cuyo manejo es especialmente sensible para caudales muy bajos. En la Figura IV-25 se muestra un detalle del control de abertura de la compuerta y del ajuste de nivel según la lectura del limnómetro.

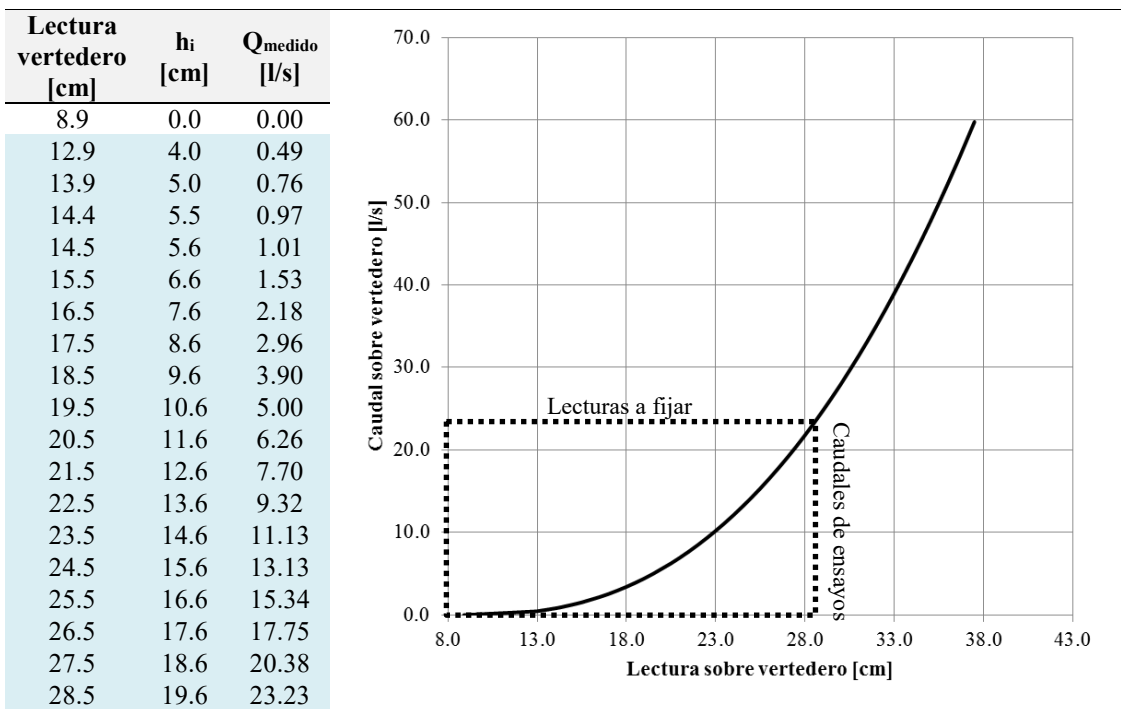


Figura IV-24. Curva de caudales del vertedero. Caudales de ensayo y lecturas de vertedero



Figura IV-25. Indicador de abertura de la compuerta y nivel y lectura de limnómetro

### IV.7.2. Obtención de datos experimentales

El objetivo principal de los ensayos con los vehículos a escala es la obtención de curvas límite de estabilidad a partir de la unión de los puntos de inestabilidad del vehículo a escala, ante un flujo de agua, en un gráfico velocidad-calado. Por tanto, las medidas a obtener en los ensayos son estas dos variables hidráulicas en cada uno de los casos experimentales, velocidad y calado. Estas medidas deben ser tomadas en la sección de trabajo que, tal y como se describió anteriormente, se encuentra a 0.5 m del cambio de pendiente del modelo en la zona de análisis de régimen rápido, y justo en la sección del final de pendiente, cuando el análisis que se haga sea en la zona de régimen lento. La planificación de los ensayos se realizó en base al desarrollo del modelo numérico de la lámina de agua sobre el modelo de pendiente local variable, mediante el cual se estimaban los puntos de comprobación (velocidad y calado) de la estabilidad de los vehículos a escala. Obviamente dichos valores serán orientativos, siendo los valores experimentales los que formen la curva de estabilidad de cada vehículo. Se medirá por tanto el calado en el centro del canal mediante un limnómetro (Figura IV-8), comprobando varios calados en la misma sección de trabajo que verifiquen la uniformidad de la misma para poder obtener la velocidad media de la sección según la expresión [IV-21].

$$v = \frac{Q}{A_w} = \frac{Q}{B \cdot y} \quad \text{[IV-21]}$$

donde,

- $v$ : velocidad media en la sección de trabajo
- $Q$ : caudal circulante conocido
- $A_w$ : área mojada de la sección
- $B$ : ancho del canal, 0.6 m
- $y$ : calado medido en el punto medio de la sección de trabajo

Por lo tanto, el único dato a medir para cada caudal es el calado en el punto medio de la sección de trabajo, siempre que se verifique la uniformidad de la sección. Estos valores diferirán de los obtenidos numéricamente, pero cubrirán el dominio de trabajo de forma similar a la que lo hacían los primeros.

### IV.7.3. Casos de estudio

Cada uno de los casos de estudio corresponde a puntos situados en cada una de las familias que cubren el dominio de trabajo descrito anteriormente y representado en la Figura IV-11 y la Figura IV-12 para condiciones hidráulicas de régimen rápido y lento respectivamente. El régimen lento se dará cuando el modelo de pendiente local presente pendiente nula, y el régimen rápido se conseguirá estableciendo pendiente. Una vez establecida la geometría en el modelo de pendiente local que ofrezca las condiciones hidráulicas (velocidad-calado) de una de las familias de puntos, se procede a incrementar el caudal hasta llegar a la inestabilidad de cada uno de los vehículos. Una vez obtenido el punto de inestabilidad de dicha rama para todos los vehículos a escala, se modifica la configuración del modelo de pendiente local para que se determinen puntos en la siguiente rama. Este procedimiento se realiza sistemáticamente hasta evaluar las condiciones de estabilidad de todos los vehículos a escala para todas las familias de puntos. Las configuraciones del modelo

de pendiente local y rango de caudales ensayados se resumen a continuación, distinguiendo entre la zona del dominio correspondiente a régimen rápido y lento:

En condiciones de régimen lento:

- **Caudales:** desde 0.49 l/s hasta 15.34 l/s
- **Pendiente del modelo:** 0% en todo caso
- **Condición de contorno aguas arriba:** Ninguna
- **Condición de contorno aguas abajo:** desde caída libre (calado crítico), con incrementos de 0.5 cm hasta 3.5 cm

En condiciones de régimen rápido:

- **Caudales:** desde 2.96 l/s hasta 23.23 l/s
- **Pendiente del modelo:** 0.8%, 1.0 %, 1.2 %, 1.5 %, 2.0 %, 3.0 %, 4.0 %, 6.0 % y 8.0%.
- **Condición de contorno aguas arriba:** calados normales desarrollados como resultado de la combinación de cada una de las pendientes y caudales.
- **Condición de contorno aguas abajo:** Ninguna

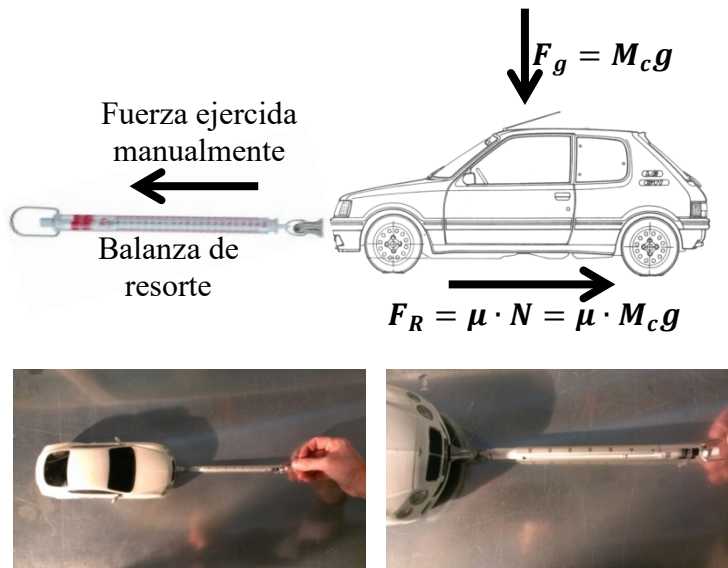
En caso de producirse resalto en las proximidades de la sección de estudio, esa situación no se consideró válida y no se llevó a cabo ensayo en tales condiciones.

#### *IV.7.4. Determinación del coeficiente de rozamiento entre el neumático y la superficie de ensayo*

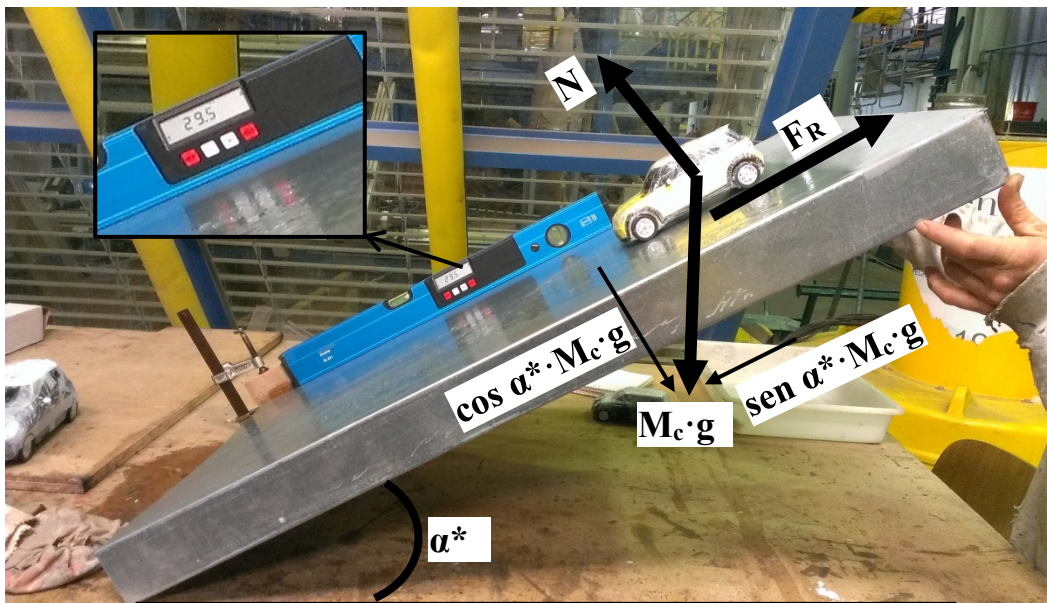
El coeficiente de rozamiento, tal y como se comentó anteriormente, es un parámetro fundamental en el estudio de la estabilidad de vehículos. Mayores coeficientes de rozamiento entre el neumático y la superficie de contacto favorecen a la estabilidad ante el deslizamiento, cuando el vehículo se ve sometido a la fuerza de arrastre del agua. El valor del coeficiente de rozamiento dependerá no solo del material de los neumáticos de los vehículos, sino de la combinación del material de los neumáticos y de la superficie del terreno en el que se encuentre. En este sentido dicho coeficiente en ningún caso será el mismo, sino que se darán rangos de valores. Los valores propuestos por algunos autores (Gerard, 2006), para el coeficiente de rozamiento entre neumático y carretera inundada, estaban comprendidos entre 0.25 y 0.75.

De la misma manera que se realizó para el diferente calzado, según descripción en el capítulo anterior, para cada uno de los vehículos a escala ensayados, se determinó previamente el coeficiente de rozamiento sobre la superficie de ensayo mojada, a partir de una balanza de resorte (Figura IV-26). Antes de realizar el ensayo se bloquearon las ruedas del vehículo a escala para que las ruedas ejercieran fuerza de rozamiento y no se produjera rotación de las mismas. Tras enganchar la balanza al vehículo a escala, mediante la pinza que lleva incorporada, se ejerce una cierta fuerza creciente de forma manual, hasta que el vehículo a escala se mueve. En ese instante, la fuerza ejercida manualmente es igual a la fuerza de rozamiento ( $F_R$ ) que el contacto neumático-suelo ofrece. A partir de ésta se obtiene el coeficiente de rozamiento ( $\mu$ ) como relación de la fuerza ejercida entre la gravitacional ( $\mu = F_R/M_c g$ ). No se han observado diferencias entre el coeficiente

de rozamiento cuando la fuerza se ejerce en dirección perpendicular al vehículo y paralela, de forma que se indica un único coeficiente de rozamiento.



**Figura IV-26.** Determinación del coeficiente de rozamiento neumático-terreno mediante una balanza de resorte



**Figura IV-27.** Determinación del coeficiente de rozamiento neumático-superficie mediante inclinación de la superficie

Habida cuenta de la importancia de este parámetro en la estabilidad del vehículo, se ha llevado a cabo un ensayo complementario para confirmar los resultados obtenidos mediante la balanza de resorte. Para ello se ha realizado el experimento que se muestra en la Figura IV-27. A partir de una

superficie metálica mojada, del mismo material que el modelo de pendiente local sobre el que se realizan los ensayos de estabilidad de los vehículos, se determina el ángulo ( $\alpha^*$ ) para el cual el vehículo desliza. Realizando un balance de fuerzas es sencillo llegar a la conclusión que el coeficiente de rozamiento  $\mu$  es igual a la tangente del ángulo que forma el plano inclinado. El ángulo del plano se incrementaba manualmente y se determinaba el valor exacto del ángulo mediante un nivel electrónico calibrado respecto a la horizontal.

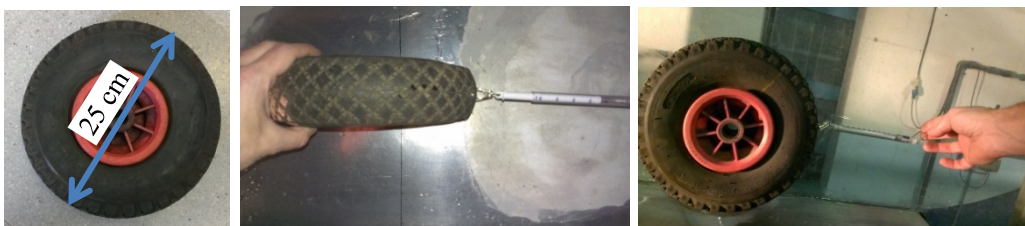
Aplicando ambos métodos se obtuvieron resultados muy similares. En la Tabla IV-5 se recogen los resultados obtenidos para cada uno de los vehículos a escala ensayados.

**Tabla IV-5** Coeficientes de rozamiento entre neumático y superficie del modelo de ensayos, determinado experimentalmente

Vehículo	Escala	Peso $M_c$ (g)	$\mu$
BMW 650	1:14	709	0.58
Mini Cooper	1:18	192	0.56
Mini Cooper	1:24	87	0.55
Mini Cooper	1:14	426	0.53
BMW i3	1:14	464	0.58
Mercedes GLA	1:14	542	0.56
Mercedes Clase C	1:18	268	0.60
Range Rover Evoque	1:14	610	0.58
Porsche Cayenne Turbo	1:14	838	0.52
Bentley Continental GT Speed	1:18	407	0.62
Volkswagen Touareg	1:14	768	0.59
BMW X6	1:14	852	0.60
Audi Q7	1:14	878	0.59
Mercedes G55 AMG	1:14	943	0.60

Tal y como se observa en la Tabla IV-5, todos los coeficientes de rozamiento obtenidos se encuentran comprendidos entre 0.52 y 0.62 dentro del rango (0.25 y 0.75) determinado por otros autores (Gerard, 2006).

Se ha realizado el ensayo también para una rueda real, de menores dimensiones que las de un coche, pero con el mismo material del neumático que un vehículo normal. El peso de la rueda era de 625 g y la fuerza ejercida con la balanza de resorte fue de 250 g cuando la rueda estaba colocada sobre el modelo de pendiente local, lo cual supone un coeficiente de rozamiento  $\mu = 0.4$ . También se realizó el ensayo sobre una superficie de hormigón mojado, al ser una superficie mucho más próxima a la capa de rodadura de las carreteras, debiendo ejercer una fuerza de 450 g para mover la rueda que equivale a  $\mu = 0.72$ . Ambos valores se encuentran comprendidos en el rango 0.25-0.75 (Gerard, 2006).



**Figura IV-28.** Determinación del coeficiente de rozamiento neumático-terreno de una rueda real, mediante una balanza de resorte



#### IV.7.5. Determinación de la inestabilidad por flotación

En los vehículos, la inestabilidad por flotación se dará en el momento en que la fuerza de flotación ( $F_b$ ) iguale a la fuerza gravitacional ( $F_g$ ) (en función del peso del vehículo), o según la definición del peso efectivo ( $F_G$ ) dada anteriormente [IV-22], en el momento que este último sea nulo.

$$F_G = F_g - F_b \quad \text{[IV-22]}$$

siendo,

- $F_g = \gamma_c \cdot V_c$ , con  $\gamma_c$ : peso específico del vehículo y  $V_c$ : volumen del vehículo
- $F_b = \gamma_w \cdot V_w$ , con  $\gamma_w$ : peso específico del agua y  $V_w$ : volumen del agua desplazada por el vehículo

Por tanto, la inestabilidad por flotación se dará cuando el calado de agua llegue a un cierto nivel tal que el volumen del agua desplazada por el vehículo sea el necesario para que la fuerza de flotación iguale a la gravitacional. En situaciones reales se suelen dar de forma combinada la inestabilidad por deslizamiento y flotación, pero para poder determinar el calado de flotación ( $h_b$ ) se debe omitir del sistema de fuerzas actuantes sobre el vehículo (Figura IV-2) la fuerza de arrastre del agua ( $F_D$ ). Para conseguir que únicamente actúe la fuerza de flotación se ha utilizado un recipiente como el que se muestra en la Figura IV-29, en el que, para cada ensayo, se ha colocado cada uno de los vehículos a escala escogidos y mediante un tubo de plástico de 20 mm de diámetro se ha introducido un pequeño caudal de agua hasta que el vehículo deja de tener contacto con el fondo. Una cinta métrica adherida exteriormente al recipiente y la correspondiente grabación en video de cada ensayo de flotación para cada vehículo a escala han permitido encontrar con suficiente exactitud el calado de flotación. Los calados de flotación ( $h_b$ ) para cada vehículo se recogen en la Tabla IV-6.

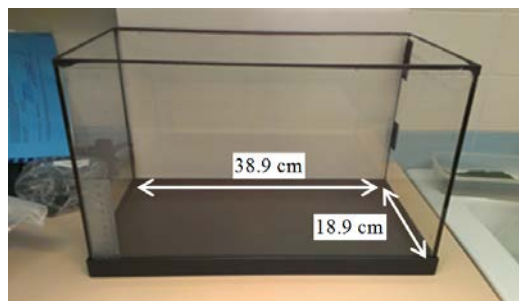


Figura IV-29. Recipiente para el ensayo de inestabilidad por flotación



Figura IV-30. Ejemplo de ensayos de inestabilidad por flotación

**Tabla IV–6** Calado de agua causante de la inestabilidad por flotación para los diferentes coches ensayados

Vehículo	Escala	Peso (kg)	$h_b$ (cm) (modelo)	$h_b$ (cm) (prototipo)
BMW 650	1:14	0.709	2.80	39.2
Mini Cooper	1:18	0.192	2.15	38.7
Mini Cooper	1:24	0.087	1.65	39.6
Mini Cooper	1:14	0.426	2.85	39.9
BMW i3	1:14	0.464	2.90	40.6
Mercedes GLA	1:14	0.542	3.10	43.4
Mercedes Clase C	1:18	0.268	2.50	45.0
Range Rover Evoque	1:14	0.610	3.30	46.2
Porsche Cayenne Turbo	1:14	0.838	3.80	53.2
Bentley Continental GT Speed	1:18	0.407	2.95	53.1
Volkswagen Touareg	1:14	0.768	3.60	50.4
BMW X6	1:14	0.852	4.25	59.5
Audi Q7	1:14	0.878	3.65	51.1
Mercedes G55 AMG	1:14	0.943	4.90	68.6

Los calados de flotación, han sido escalados a prototipo según la escala geométrica de cada vehículo ensayado, obteniendo calados comprendidos entre 38.7 y 68.6 cm, para el modelo Mini Cooper ( $e=1:18$ ) y Mercedes G55 AMG respectivamente.

Para la validación de los resultados, se tomaron medidas de calado con el vehículo dentro del recipiente y una vez extraído, de manera que conociendo la superficie en planta del recipiente (Figura IV-29) es posible determinar el volumen desplazado y por tanto también el peso de dicho volumen ( $\rho_{\text{agua}} \approx 1,000 \text{ kg/m}^3$ ). Dicho peso teóricamente debe ser equivalente al peso del vehículo si es que se ha determinado exactamente el punto de flotación, con lo que mediante el error porcentual entre el peso calculado y el real se pueden validar los resultados obtenidos con gran fiabilidad (Tabla IV–7). El mayor de los errores ha sido de 4.3% que se asume aceptable considerando el límite de precisión de la medida del calado y la posibilidad de entrada de una pequeña cantidad de agua en los vehículos que pueda variar en algún gramo el peso del vehículo.

**Tabla IV–7** Validación del calado de flotación de los diferentes modelos ensayados

Vehículo	Escala	$h_b$ (con coche) (cm)	$h_b$ (sin coche) (cm)	Volumen Desplazado (l)	Peso Desplazado (kg)	Error con respecto peso [%]
BMW 650	1:14	2.80	1.80	0.7352	0.735	-2.3%
Mini Cooper	1:18	2.15	1.90	0.1838	0.184	4.3%
Mini Cooper	1:24	1.65	1.53	0.0882	0.088	-1.4%
Mini Cooper	1:14	2.85	2.25	0.4411	0.441	-3.3%
BMW i3	1:14	2.90	2.25	0.4779	0.478	-3.0%
Mercedes GLA	1:14	3.10	2.35	0.5514	0.551	-0.3%
Mercedes Clase C	1:18	2.50	2.15	0.2573	0.257	4.0%
Range Rover Evoque	1:14	3.30	2.45	0.6249	0.625	-2.3%
Porsche Cayenne Turbo	1:14	3.80	2.65	0.8455	0.845	-0.2%
Bentley Continental GT Speed	1:18	2.95	2.40	0.4044	0.404	0.6%
Volkswagen Touareg	1:14	3.60	2.55	0.7720	0.772	-0.5%
BMW X6	1:14	4.25	3.10	0.8455	0.845	0.8%
Audi Q7	1:14	3.65	2.50	0.8455	0.845	3.7%
Mercedes G55 AMG	1:14	4.90	3.60	0.9558	0.956	-1.4%

#### IV.7.6. Influencia de los efectos de escala

Todo modelo que presente una relación de escala distinta a la unidad presentará efectos de escala, siempre que el fluido utilizado en el modelo sea igual al real (prototipo), puesto que solo una relación de fuerzas (número adimensional) puede ser fijada igual en modelo y prototipo. Sin embargo, en muchas ocasiones estos efectos de escala pueden ser despreciables. Heller (2011) describe cuatro tipos de comprobaciones: *análisis inspeccional*, *análisis dimensional*, *calibración* y *series de escalas*, con las que es posible cuantificar los efectos de escala, investigar como éstos afectan a los diferentes parámetros y establecer los criterios para poder considerarlos despreciables. Una vez identificados los efectos de escala, si fuera necesario minimizarlos, Heller (2011) describe tres métodos para hacerlo: evitación, compensación y corrección.

El *análisis inspeccional* opera con el conjunto de ecuaciones que describen el equilibrio de fuerzas hidrodinámicas. Incluye cualquier tipo de ecuación que matemáticamente traslade un fenómeno físico (por ejemplo las ecuaciones RANS). La semejanza requiere que tanto el modelo con el prototipo cumplan el mismo conjunto de ecuaciones. Este método solo puede aplicarse si la física del fenómeno es tal que las ecuaciones relevantes pueden ser formuladas. El análisis inspeccional permite una cuantificación de la importancia relativa de todos los términos involucrados y la definición de una escala mínima para la cual se evitan los efectos de escala significativos.

El *análisis dimensional* es la herramienta más ampliamente utilizada en la mecánica de fluidos experimental, permitiendo realizar de una manera sencilla y directa la formulación implícita del criterio de semejanza dinámica. Este método se basa en el teorema de  $\pi$  de Buckingham (1914). Un problema físico con  $n - r$  parámetros independientes y adimensionales  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-r}$  siendo  $r$  el número mínimo de dimensiones (longitud [L], masa [M] o tiempo [T]) necesario para describir las dimensiones de esos  $n$  parámetros. La semejanza requiere que cada uno de esos parámetros adimensionales sea igual entre el modelo y el prototipo. Estos parámetros adimensionales incluyen las relaciones geométricas, así como las relaciones de fuerzas (Número de Froude, Reynolds, Weber, Cauchy y Euler).

Estos parámetros adimensionales permiten una presentación general de resultados y ya que éstos son función de otros parámetros adimensionales, no requieren relaciones de escala para escalarlos. El número de ensayos necesario es normalmente reducido ya que el número de parámetros físicos que caracterizan el fenómeno se reduce de  $n$  a  $n - r$ . Sin embargo, en contraste con el análisis inspeccional, la importancia relativa de los parámetros adimensionales se desconoce. El análisis adimensional resulta ser una arbitrariedad en la determinación de las condiciones de semejanza si el fenómeno incluye más de seis parámetros  $n$ . Aun así, se trata de un método ampliamente utilizado. Es recomendable su utilización únicamente cuando el nivel del entendimiento teórico del fenómeno no permita el análisis inspeccional.

La semejanza entre modelo y prototipo puede ser conseguida si los ensayos en el modelo físico son llevados a cabo según configuraciones para las cuales existen datos reales del prototipo (*método de calibración*). Si los parámetros relativos coinciden bien entre el modelo y el prototipo, no se esperan efectos de escala significativos y se puede decir que se ha alcanzado la semejanza entre el modelo y el prototipo. Este hecho aporta la confianza de que los resultados del modelo para otras configuraciones de ensayos pueden ser aplicados en el prototipo sin que se produzcan

grandes desviaciones. Un prerequisite imprescindible para este método es disponer de datos fiables de prototipo. Las desviaciones observadas entre el modelo y el prototipo, pese a la semejanza cinemática, pueden ayudar a cuantificar los efectos de escala y corregirlos para otras configuraciones de ensayos o determinar de qué manera estos efectos de escala están afectando a los resultados (sobre o infravalorando).

Para el *método de series de escala* se considerarán al menos tres modelos de semejanza cinemática de diferente relación de escala  $\lambda$ , con los que se realizarán los mismos ensayos y se compararán los resultados escalados a prototipo. El mayor de los modelos actúa como punto de referencia, como si se tratara del prototipo al utilizar el método de calibración. Las desviaciones de los resultados adimensionales del menor de ellos comparado con el mayor se deben a los efectos de escala. Este método permite cuantificar los efectos de escala o al menos indicar de qué manera, estos efectos modifican los resultados y la definición de un criterio límite si fuera posible. Los inconvenientes son el gran esfuerzo experimental en comparación con los otros tres métodos y la incerteza de si el mayor de los modelos está afectado por efectos de escala no despreciables.

Para el presente estudio experimental se ha llevado a cabo el método de series de escala, de manera que se han ensayado tres vehículos a diferentes escalas, según se indica en la Tabla IV-8, y comprobado los resultados obtenidos tras ser escalados a prototipo en cada caso.

**Tabla IV-8** Modelos Mini Cooper a diferentes escalas, ensayados para comprobar la influencia de los efectos de escala

Id	Escala	Modelo	Longitud [mm]	Ancho [mm]	Alto [mm]	GC [mm]	Peso vacío [kg]	Volumen aprox. [m³]	Densidad [kg/m³]	Relación densidades $\rho_p/\rho_m$
2	1:24	Mini Cooper	152	71	60	5.5	0.087	0.00065	134.4	0.99
	1:18		205	92	76	8	0.192	0.00143	134.0	0.99
	1:14		262	120	102	10	0.426	0.00321	132.8	1.00



**Figura IV-31.** Modelos Mini Cooper a escalas 1:14, 1:18 y 1:24

Para cada una de las configuraciones del modelo de pendiente local, pendiente y caudal de circulación, se han determinado los puntos de inestabilidad para cada vehículo, y en posición paralela y perpendicular al flujo. De esta manera se obtienen parejas de puntos de inestabilidad en cada caso. De cada pareja de puntos se propone como límite para el vehículo aquel que presenta un menor producto velocidad por calado ( $v \cdot y$ ). De esta manera se trata con aquellos puntos que se acercan más al límite de inestabilidad de cada vehículo, siendo en ocasiones los obtenidos para una orientación paralela al flujo y en otras para una orientación perpendicular. Para altas velocidades suele presentarse la inestabilidad en orientación perpendicular y para velocidades bajas se produce para orientaciones paralelas al flujo. Se producen además ciertos efectos en el flujo debido a la

escala del vehículo frente al ancho del canal que se describen en el apartado de resultados, pero que explican también la elección del menor producto ( $v \cdot y$ ) de cada pareja.

Los primeros ensayos llevados a cabo fueron los correspondientes al modelo Mini Cooper, en las tres escalas disponibles. Los resultados obtenidos se muestran numéricamente en la Tabla IV-9 para la escala 1:24, en la Tabla IV-10 para la escala 1:18 y en la Tabla IV-11 para la escala 1:14. La representación conjunta de estos puntos, escalados a prototipo, debería ofrecer una misma tendencia y un elevado coeficiente de correlación, si es que la semejanza de Froude es válida en este caso. En la Figura IV-32 se muestra la representación de los puntos de inestabilidad para los tres modelos, así como las ecuaciones que mejor se ajustan al conjunto de puntos. Se observa una misma tendencia grupal y se obtiene un valor de  $R^2=0.93$ , al hacer un ajuste de un polinomio de segundo orden, y un valor de  $R^2=0.89$  al ajustar de forma más realista una función  $(v \cdot y)=0.45$ . Es obvio que, en el caso del ajuste polinómico, el hecho de que el calado crezca a la vez que lo hace la velocidad, una vez superado el valor de 3 m/s, no es realista. Se trata en ese caso de una mera comprobación de la tendencia común de todos los valores de puntos de inestabilidad para las tres escalas del modelo Mini Cooper, sin intención de que dicha función ofrezca sentido físico.

Queda validada por tanto la idoneidad de la utilización de la semejanza de Froude en este fenómeno, pudiendo escalar directamente los resultados obtenidos en el modelo a valores en prototipo.

**Tabla IV-9** Puntos de inestabilidad para modelo Mini Cooper (e:1/24)

Mini Cooper (e: 1/24)								
Perpendicular			Paralelo			$(v \cdot y)_{\min}$ [m <sup>2</sup> /s]	$v$ (m/s) (Prototipo) min	$y$ (m) (Prototipo) min
$v$ (m/s) (Prototipo)	$y$ (m) (Prototipo)	$(v \cdot y)$ [m <sup>2</sup> /s]	$v$ (m/s) (Prototipo)	$y$ (m) (Prototipo)	$(v \cdot y)$ [m <sup>2</sup> /s]			
0.00	0.40	0.00	-	-	-	0.000	0.00	0.40
3.26	0.16	0.51	3.26	0.16	0.509	0.509	3.26	0.16
0.89	0.39	0.35	0.89	0.39	0.352	0.352	0.89	0.39
1.16	0.39	0.45	1.16	0.39	0.450	0.450	1.16	0.39
1.85	0.21	0.39	1.85	0.21	0.385	0.385	1.85	0.21
2.73	0.19	0.53	2.73	0.19	0.531	0.531	2.73	0.19
2.37	0.30	0.72	2.26	0.24	0.552	0.552	2.26	0.24
0.94	0.38	0.35	0.94	0.38	0.355	0.355	0.94	0.38

**Tabla IV-10** Puntos de inestabilidad para modelo Mini Cooper (e:1/18)

Mini Cooper (e: 1/18)								
Perpendicular			Paralelo			$(v \cdot y)_{\min}$ [m <sup>2</sup> /s]	$v$ (m/s) (Prototipo) min	$y$ (m) (Prototipo) min
$v$ (m/s) (Prototipo)	$y$ (m) (Prototipo)	$(v \cdot y)$ [m <sup>2</sup> /s]	$v$ (m/s) (Prototipo)	$y$ (m) (Prototipo)	$(v \cdot y)$ [m <sup>2</sup> /s]			
0.00	0.39	0.00	-	-	-	0.00	0.00	0.39
1.84	0.29	0.53	1.84	0.29	0.53	0.53	1.84	0.29
2.29	0.17	0.40	2.29	0.17	0.40	0.40	2.29	0.17
3.60	0.16	0.56	4.02	0.18	0.71	0.56	3.60	0.16
1.03	0.36	0.37	1.03	0.36	0.37	0.37	1.03	0.36
1.20	0.39	0.47	1.14	0.38	0.43	0.43	1.14	0.38
1.98	0.20	0.40	1.98	0.20	0.40	0.40	1.98	0.20
2.73	0.17	0.45	3.32	0.19	0.63	0.45	2.73	0.17
2.24	0.25	0.56	2.05	0.23	0.47	0.47	2.05	0.23
1.24	0.42	0.52	1.12	0.39	0.44	0.44	1.12	0.39

Tabla IV–11 Puntos de inestabilidad para modelo Mini Cooper (e:1/14)

Mini Cooper (e: 1/14)								
Perpendicular			Paralelo			$(v \cdot y)_{\min}$ [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo) min	y (m) (Prototipo) min
v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]			
0.00	0.40	0.00	-	-	-	0.00	0.00	0.40
1.69	0.29	0.49	1.69	0.29	0.49	0.49	1.69	0.29
2.58	0.19	0.49	2.51	0.18	0.45	0.45	2.58	0.19
2.64	0.17	0.45	2.64	0.17	0.45	0.45	2.64	0.17
3.94	0.15	0.61	4.24	0.17	0.71	0.61	3.94	0.15
1.07	0.43	0.46	1.01	0.40	0.40	0.40	1.07	0.43
1.38	0.42	0.57	1.31	0.37	0.49	0.49	1.38	0.42
2.58	0.22	0.57	2.54	0.18	0.46	0.46	2.58	0.22
3.58	0.18	0.65	3.57	0.19	0.69	0.65	3.58	0.18
2.36	0.28	0.67	2.20	0.24	0.53	0.53	2.36	0.28
1.49	0.46	0.68	1.26	0.40	0.51	0.51	1.49	0.46

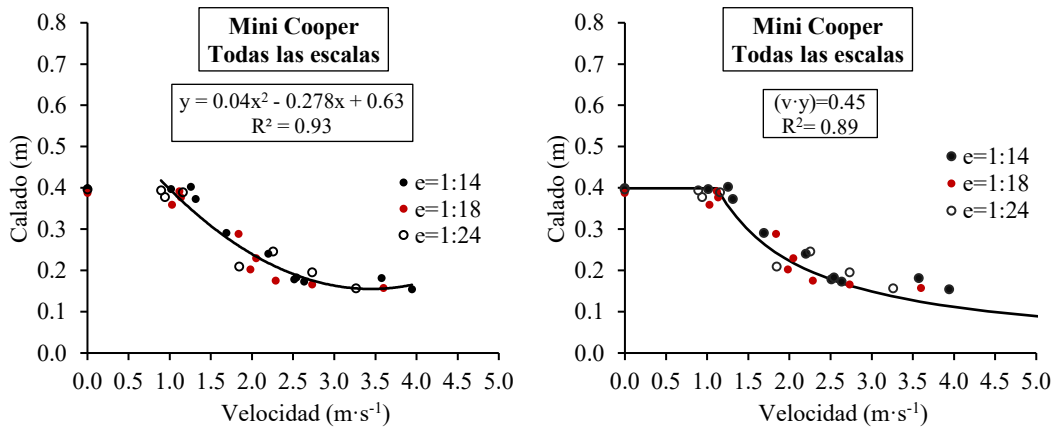


Figura IV-32. Representación de los puntos de inestabilidad de los Modelos Mini Cooper a escalas 1:14, 1:18 y 1:24. Ajuste polinómico, a la izquierda, y ajuste a una función  $(v \cdot y) = 0.45$ , a la derecha

#### IV.7.7. Umbrales de estabilidad preliminares

Tal y como se indicó en el apartado anterior, una vez determinados los pares de puntos de inestabilidad de cada vehículo, uno para orientación paralela al flujo y otro para orientación perpendicular, se determina el inferior de ellos en cuanto al producto  $(v \cdot y)$ . El menor de ellos será el más próximo al umbral de inestabilidad que se trata de definir. Los puntos de inestabilidad obtenidos experimentalmente para cada vehículo se recogen en la Tabla IV–12 hasta la Tabla IV–22. Se muestran los valores obtenidos para modelo así como el valor escalado, según la semejanza de Froude validada anteriormente, de velocidad y calado. Se indica también el valor del producto  $(v \cdot y)$  para cada punto, así como el valor inferior de cada pareja.

Los valores de inestabilidad al colocar el vehículo paralelo al flujo fueron tomados indistintamente por la parte frontal o trasera del vehículo, puesto que se observó que la posición del centro de gravedad de éste en ocasiones hacía flotar el vehículo antes por la parte delantera o trasera dependiendo del vehículo ensayado. Se ha procurado, en la medida de lo posible, que, al colocar los incrementos de peso, necesarios para ajustar la relación de densidades prototipo/modelo a la unidad, se desplace el centro de gravedad hacia la parte del motor. Se ha

comprobado que por lo general los vehículos en la realidad flotan antes por la parte trasera, indicativo que el centro de gravedad está más próximo a la posición del motor.

**Tabla IV–12** Puntos de inestabilidad para modelo BMW 650 (e:1/14)

BMW 650 (e: 1/14)								
Perpendicular			Paralelo			$(v \cdot y)_{\min}$ [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo) min	y (m) (Prototipo) min
v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]			
0.00	0.39	0.00	-	-	-	0.00	0.00	0.39
2.06	0.31	0.64	2.06	0.31	0.64	0.64	2.06	0.31
2.73	0.21	0.57	2.51	0.18	0.45	0.45	2.51	0.18
2.64	0.17	0.45	2.64	0.17	0.45	0.45	2.64	0.17
3.72	0.17	0.64	4.20	0.18	0.74	0.64	3.72	0.17
1.21	0.48	0.58	0.97	0.38	0.37	0.37	0.97	0.38
1.51	0.45	0.69	1.31	0.37	0.49	0.49	1.31	0.37
2.94	0.25	0.73	2.52	0.20	0.50	0.50	2.52	0.20
3.41	0.17	0.58	3.90	0.22	0.87	0.58	3.41	0.17
2.41	0.29	0.70	2.26	0.25	0.55	0.55	2.26	0.25
1.56	0.48	0.75	1.31	0.42	0.55	0.55	1.31	0.42

**Tabla IV–13** Puntos de inestabilidad para modelo BMW i3 (e:1/14)

BMW i3 (e: 1/14)								
Perpendicular			Paralelo			$(v \cdot y)_{\min}$ [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo) min	y (m) (Prototipo) min
v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]			
0.00	0.41	0.00	-	-	-	0.00	0.00	0.41
1.69	0.29	0.49	1.69	0.29	0.49	0.49	1.69	0.29
2.58	0.19	0.49	2.51	0.18	0.45	0.45	2.51	0.18
2.64	0.17	0.45	2.64	0.17	0.45	0.45	2.64	0.17
3.96	0.16	0.63	4.24	0.17	0.71	0.63	3.96	0.16
1.07	0.43	0.46	0.97	0.38	0.37	0.37	0.97	0.38
1.38	0.42	0.57	1.31	0.37	0.49	0.49	1.31	0.37
2.58	0.22	0.57	2.54	0.18	0.46	0.46	2.54	0.18
3.58	0.18	0.65	3.57	0.19	0.69	0.65	3.58	0.18
2.36	0.28	0.67	2.20	0.24	0.53	0.53	2.20	0.24
1.49	0.46	0.68	1.31	0.42	0.55	0.55	1.31	0.42

**Tabla IV–14** Puntos de inestabilidad para modelo Mercedes Gla (e:1/14)

Mercedes Gla (e: 1/14)								
Perpendicular			Paralelo			$(v \cdot y)_{\min}$ [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo) min	y (m) (Prototipo) min
v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]			
0.00	0.43	0.00	-	-	-	0.00	0.00	0.43
1.98	0.30	0.59	1.98	0.30	0.59	0.59	1.98	0.30
2.83	0.23	0.65	2.58	0.19	0.49	0.49	2.58	0.19
3.01	0.21	0.62	3.01	0.21	0.62	0.62	3.01	0.21
4.24	0.17	0.71	4.24	0.17	0.71	0.71	4.24	0.17
1.31	0.53	0.69	1.03	0.42	0.43	0.43	1.03	0.42
1.63	0.49	0.80	1.37	0.42	0.58	0.58	1.37	0.42
2.94	0.25	0.73	2.58	0.22	0.57	0.57	2.58	0.22
3.55	0.20	0.71	3.73	0.21	0.79	0.71	3.55	0.20
2.41	0.29	0.70	2.36	0.28	0.67	0.67	2.36	0.28
1.56	0.48	0.75	1.40	0.43	0.61	0.61	1.40	0.43

**Tabla IV–15** Puntos de inestabilidad para modelo Mercedes Clase C (e:1/18)

Mercedes Clase C (e: 1/18)								
Perpendicular			Paralelo			$(v \cdot y)_{\min}$ [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo) min	y (m) (Prototipo) min
v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]			
0.00	0.45	0.00	-	-	-	0.00	0.00	0.45
2.12	0.33	0.70	2.12	0.33	0.70	0.70	2.12	0.33
2.85	0.23	0.65	2.70	0.22	0.60	0.60	2.70	0.22
2.99	0.21	0.63	2.99	0.21	0.63	0.63	2.99	0.21
4.08	0.19	0.76	4.91	0.23	1.12	0.76	4.08	0.19
1.19	0.51	0.61	1.10	0.49	0.54	0.54	1.10	0.49
1.57	0.53	0.84	1.37	0.46	0.62	0.62	1.37	0.46
2.92	0.28	0.83	2.88	0.23	0.67	0.67	2.88	0.23
4.05	0.23	0.94	4.04	0.24	0.97	0.94	4.05	0.23
2.68	0.36	0.97	2.49	0.31	0.77	0.77	2.49	0.31
1.69	0.59	0.99	1.43	0.52	0.74	0.74	1.43	0.52

**Tabla IV–16** Puntos de inestabilidad para modelo Range Rover Evoque (e:1/14)

Range Rover Evoque (e: 1/14)								
Perpendicular			Paralelo			$(v \cdot y)_{\min}$ [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo) min	y (m) (Prototipo) min
v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]			
0.00	0.46	0.00	-	-	-	0.00	0.00	0.46
1.98	0.30	0.59	1.98	0.30	0.59	0.59	1.98	0.30
2.99	0.24	0.73	2.73	0.21	0.57	0.57	2.73	0.21
3.22	0.21	0.69	3.22	0.21	0.69	0.69	3.22	0.21
4.24	0.17	0.71	4.24	0.17	0.71	0.71	4.24	0.17
1.33	0.53	0.71	1.16	0.46	0.54	0.54	1.16	0.46
1.64	0.52	0.85	1.46	0.47	0.69	0.69	1.46	0.47
2.74	0.26	0.73	2.58	0.22	0.57	0.57	2.58	0.22
3.73	0.21	0.79	3.73	0.21	0.79	0.79	3.73	0.21
2.51	0.31	0.78	2.34	0.28	0.65	0.65	2.34	0.28
1.68	0.54	0.90	1.49	0.46	0.68	0.68	1.49	0.46

**Tabla IV–17** Puntos de inestabilidad para modelo Porsche Cayenne Turbo (e:1/14)

Porsche Cayenne Turbo (e: 1/14)								
Perpendicular			Paralelo			$(v \cdot y)_{\min}$ [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo) min	y (m) (Prototipo) min
v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]			
0.00	0.53	0.00	-	-	-	0.00	0.00	0.53
2.07	0.32	0.65	2.07	0.32	0.65	0.65	2.07	0.32
2.99	0.24	0.73	2.83	0.23	0.65	0.65	2.83	0.23
3.36	0.23	0.77	3.36	0.23	0.77	0.77	3.36	0.23
4.33	0.21	0.89	4.33	0.21	0.89	0.89	4.33	0.21
1.38	0.54	0.75	1.31	0.53	0.69	0.69	1.31	0.53
1.63	0.49	0.80	1.46	0.47	0.69	0.69	1.46	0.47
2.79	0.29	0.82	2.74	0.26	0.73	0.73	2.74	0.26
3.73	0.21	0.79	4.30	0.24	1.04	0.79	3.73	0.21
2.75	0.33	0.90	2.44	0.29	0.70	0.70	2.44	0.29
1.68	0.54	0.90	1.56	0.48	0.75	0.75	1.56	0.48



Tabla IV–18 Puntos de inestabilidad para modelo Bentley Continental GT Speed (e:1/18)

Bentley Continental GT Speed (e: 1/18)								
Perpendicular			Paralelo			$(v \cdot y)_{\min}$ [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo) min	y (m) (Prototipo) min
v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]			
0.00	0.53	0.00	-	-	-	0.00	0.00	0.53
2.24	0.39	0.87	2.24	0.39	0.87	0.87	2.24	0.39
3.31	0.33	1.08	3.15	0.23	0.74	0.74	3.15	0.23
3.42	0.26	0.90	3.42	0.26	0.90	0.90	3.42	0.26
4.25	0.21	0.91	4.67	0.22	1.02	0.91	4.25	0.21
1.37	0.62	0.84	1.25	0.57	0.71	0.71	1.25	0.57
1.85	0.63	1.16	1.55	0.54	0.84	0.84	1.55	0.54
3.11	0.34	1.06	2.92	0.28	0.83	0.83	2.92	0.28
4.03	0.26	1.03	4.03	0.26	1.03	1.03	4.03	0.26
2.84	0.40	1.13	2.68	0.36	0.97	0.97	2.68	0.36
1.82	0.68	1.23	1.59	0.56	0.89	0.89	1.59	0.56

Tabla IV–19 Puntos de inestabilidad para modelo Volkswagen Touareg (e:1/14)

Volkswagen Touareg (e: 1/14)								
Perpendicular			Paralelo			$(v \cdot y)_{\min}$ [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo) min	y (m) (Prototipo) min
v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]			
0.00	0.50	0.00	-	-	-	0.00	0.00	0.50
2.16	0.34	0.73	2.16	0.34	0.73	0.73	2.16	0.34
3.17	0.28	0.88	2.99	0.24	0.73	0.73	2.99	0.24
3.22	0.21	0.69	3.22	0.21	0.69	0.69	3.22	0.21
4.33	0.21	0.89	4.96	0.25	1.25	0.89	4.33	0.21
1.61	0.68	1.09	1.33	0.53	0.71	0.71	1.33	0.53
1.85	0.59	1.09	1.63	0.51	0.83	0.83	1.63	0.51
2.92	0.34	0.98	2.74	0.26	0.73	0.73	2.74	0.26
3.90	0.22	0.87	4.35	0.27	1.16	0.87	3.90	0.22
2.71	0.37	1.01	2.75	0.33	0.90	0.90	2.75	0.33
1.74	0.58	1.00	1.61	0.53	0.84	0.84	1.61	0.53

Tabla IV–20 Puntos de inestabilidad para modelo BMW X6 (e:1/14)

BMW X6 (e: 1/14)								
Perpendicular			Paralelo			$(v \cdot y)_{\min}$ [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo) min	y (m) (Prototipo) min
v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]			
0.00	0.60	0.00	-	-	-	0.00	0.00	0.60
2.42	0.37	0.89	2.42	0.37	0.89	0.89	2.42	0.37
3.26	0.31	1.00	3.18	0.29	0.92	0.92	3.18	0.29
3.65	0.26	0.95	3.77	0.30	1.13	0.95	3.65	0.26
4.33	0.21	0.89	4.96	0.25	1.25	0.89	4.33	0.21
1.61	0.68	1.09	1.38	0.56	0.77	0.77	1.38	0.56
1.95	0.63	1.23	1.64	0.52	0.85	0.85	1.64	0.52
2.97	0.36	1.08	2.85	0.31	0.89	0.89	2.85	0.31
3.90	0.22	0.87	4.35	0.27	1.16	0.87	3.90	0.22
2.71	0.37	1.01	2.75	0.33	0.90	0.90	2.75	0.33
1.74	0.58	1.00	1.68	0.54	0.90	0.90	1.68	0.54

**Tabla IV–21** Puntos de inestabilidad para modelo Audi Q7 (e:1/14)

Audi Q7 (e: 1/14)								
Perpendicular			Paralelo			$(v \cdot y)_{\min}$ [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo) min	y (m) (Prototipo) min
v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]			
0.00	0.51	0.00	-	-	-	0.00	0.00	0.51
2.42	0.37	0.89	2.42	0.37	0.89	0.89	2.42	0.37
3.35	0.32	1.08	3.20	0.30	0.95	0.95	3.20	0.30
3.81	0.30	1.14	3.81	0.30	1.14	1.14	3.81	0.30
4.78	0.23	1.08	4.96	0.25	1.25	1.08	4.78	0.23
1.61	0.68	1.09	1.38	0.56	0.77	0.77	1.38	0.56
1.85	0.59	1.09	1.63	0.51	0.83	0.83	1.63	0.51
2.97	0.36	1.08	2.79	0.29	0.82	0.82	2.79	0.29
4.30	0.24	1.04	4.51	0.28	1.25	1.04	4.30	0.24
2.71	0.37	1.01	2.75	0.33	0.90	0.90	2.75	0.33
1.71	0.61	1.05	1.65	0.56	0.92	0.92	1.65	0.56

**Tabla IV–22** Puntos de inestabilidad para modelo Mercedes G55 AMG (e:1/14)

Mercedes G55 AMG (e: 1/14)								
Perpendicular			Paralelo			$(v \cdot y)_{\min}$ [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo) min	y (m) (Prototipo) min
v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]	v (m/s) (Prototipo)	y (m) (Prototipo)	(v·y) [m <sup>2</sup> /s]			
0.00	0.69	0.00	-	-	-	0.00	0.00	0.69
2.76	0.45	1.24	2.76	0.45	1.24	1.24	2.76	0.45
3.77	0.38	1.42	3.39	0.31	1.05	1.05	3.39	0.31
3.87	0.32	1.25	3.87	0.32	1.25	1.25	3.87	0.32
5.12	0.25	1.27	5.12	0.25	1.27	1.27	5.12	0.25
1.86	0.80	1.49	1.50	0.63	0.95	0.95	1.50	0.63
2.13	0.70	1.48	1.85	0.59	1.09	1.09	1.85	0.59
3.21	0.46	1.48	2.97	0.36	1.08	1.08	2.97	0.36
4.71	0.30	1.41	4.93	0.32	1.56	1.41	4.71	0.30
2.89	0.45	1.30	2.78	0.40	1.11	1.11	2.78	0.40
1.96	0.75	1.48	1.74	0.58	1.00	1.00	1.74	0.58

En la Figura IV-33 y Figura IV-34 se recogen las representaciones de los puntos de inestabilidad para cada uno de los vehículos ensayados, así como el mejor ajuste obtenido para tales puntos. Los coeficientes de correlación obtenidos se encuentran comprendidos entre  $R^2= 0.88$  y  $R^2=0.99$ , ofreciendo por tanto buenas correlaciones. Las curvas de ajuste responden a polinomios de segundo orden con coeficientes muy similares, siendo curvas prácticamente paralelas que indican el grado de estabilidad del vehículo según crecen. En la Figura IV-35 se representan gráficamente todas las curvas de ajuste para cada vehículo, observando dicho paralelismo y relación con el grado de estabilidad de cada vehículo.

El concepto de grado de estabilidad se introdujo en apartados anteriores de este capítulo, previendo la idoneidad de asociar un coeficiente de estabilidad (SC) a cada vehículo que siendo modificado ( $SC_{mod}$ ) por el coeficiente de rozamiento ( $\mu$ ) nos indica el grado de estabilidad de éste. Siendo el orden de dichas curvas de ajuste correspondiente al orden de estabilidad de cada vehículo, según indica su coeficiente de estabilidad, queda comprobado que el  $SC_{mod}$  responde adecuadamente al grado de estabilidad de cualquier vehículo.

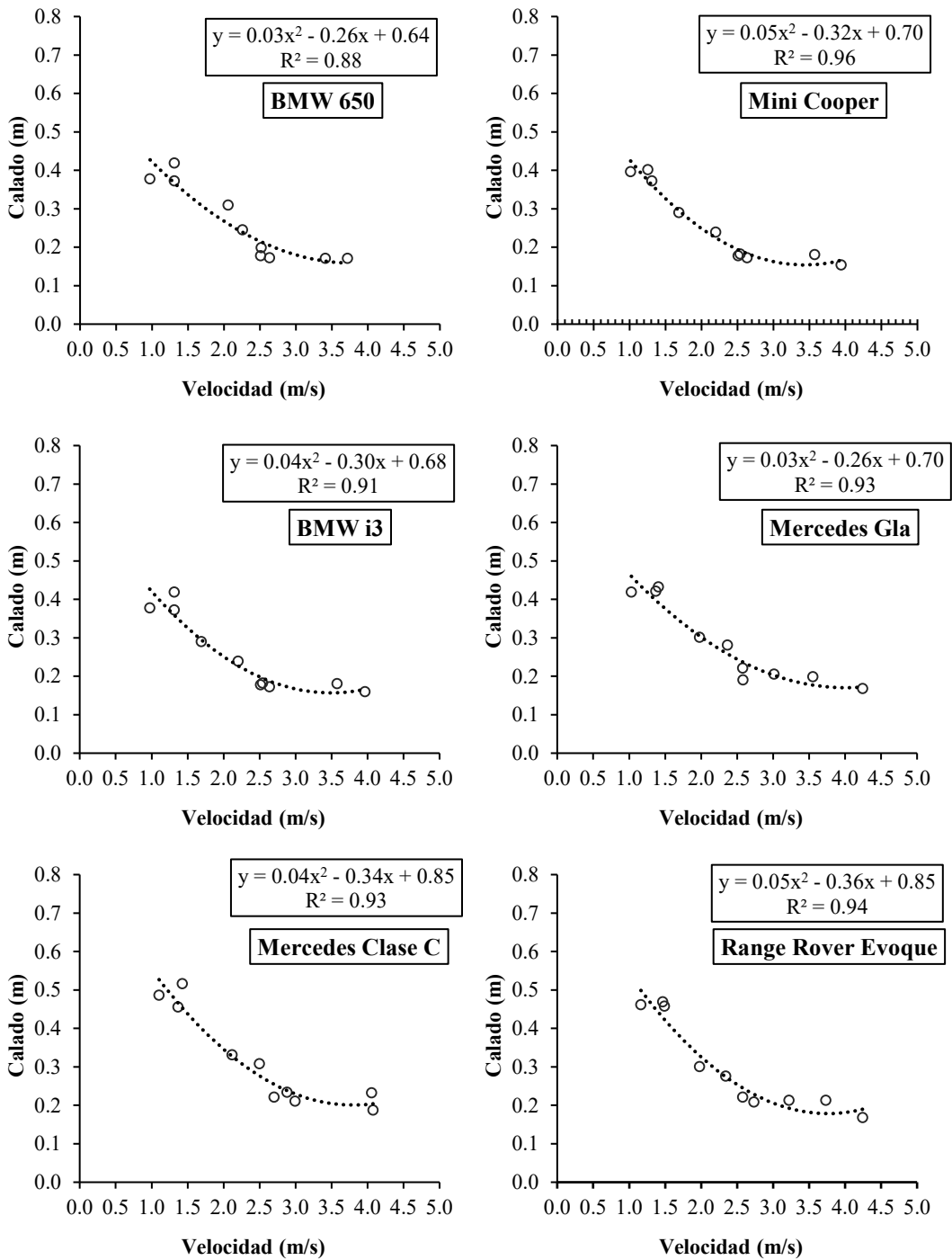


Figura IV-33. Ajuste preliminar de los puntos de inestabilidad para los diferentes vehículos (1 de 2)

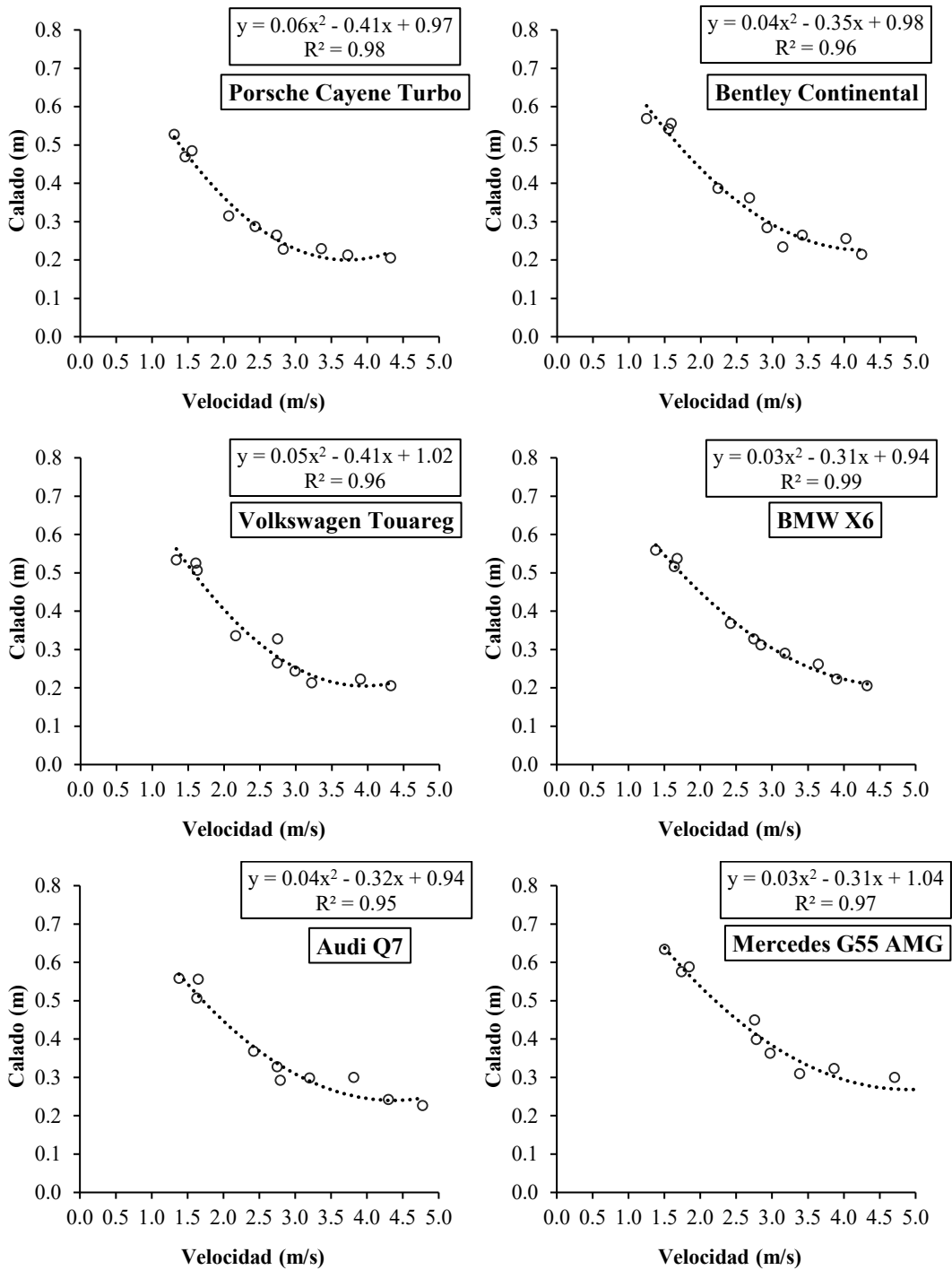


Figura IV-34. Ajuste preliminar de los puntos de inestabilidad para los diferentes vehículos (2 de 2)

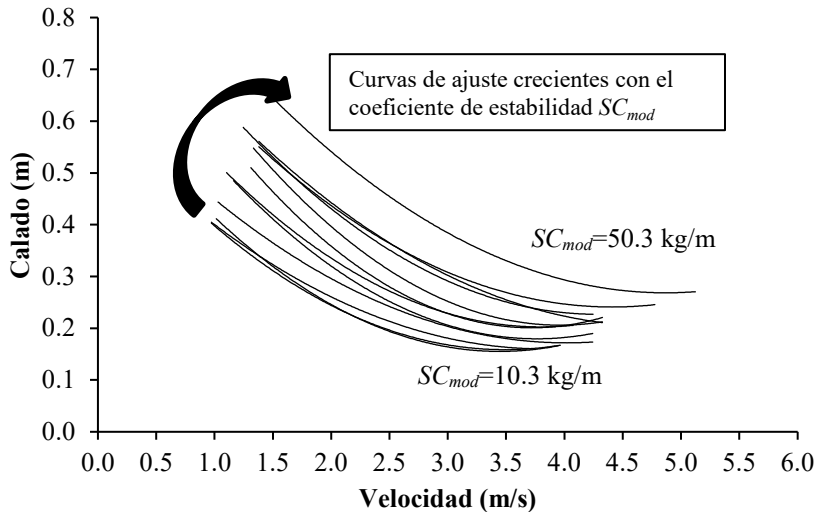


Figura IV-35. Abanico de curvas de ajuste de todos los vehículos ensayados

#### IV.7.8. Umbrales de estabilidad propuestos

Si bien las curvas de ajuste obtenidas nos ofrecen una gran correlación con los puntos de inestabilidad representados, se propone la determinación de funciones umbral lo más estándares posibles. Teniendo en cuenta además que el umbral de seguridad propuesto para personas en flujos de agua se ha establecido mediante una curva  $(v \cdot y)$ , se presenta en este apartado una función de umbral del tipo  $(v \cdot y)$  con el objetivo final de representar conjuntamente los límites de estabilidad para personas y vehículos con curvas análogas y conjuntamente en una misma gráfica. Además, tal y como se adelantó en el apartado de comprobación de la influencia de los efectos de escala, los polinomios de segundo orden suelen dar repuntes de calado al aumentar la velocidad.

En la Figura IV-36 y la Figura IV-37 se recogen las gráficas con los puntos de inestabilidad para cada vehículo, así como dos posibles curvas  $(v \cdot y)$ . La primera de ellas se ha establecido por el punto que presenta el menor producto  $(v \cdot y)$ , de manera que dicha curva sea la envolvente inferior del resto de puntos de inestabilidad. La segunda de las curvas es la correspondiente al mejor ajuste de los los puntos representados para la la función tipo  $(v \cdot y) = a_0$ . La constante  $a_0$  se ha obtenido minimizando el sumatorio de las diferencias entre la coordenada  $y_i$  de cada uno de los puntos de inestabilidad  $P_i(v_i; y_i)$  con la evaluación de la función  $y(v=v_i) = a_0/v$  en cada coordenada  $v_i$ . De esta forma se optimiza el ajuste de la función a una cierta  $a_0$  obteniendo el mayor coeficiente de correlación  $R^2$  posible en cada caso. En todos los casos de obtiene una correlación óptima, superior a  $R^2 = 0.8$  y en gran parte de los casos superior a  $R^2 = 0.9$ , por lo tanto, se acepta tal ajuste como correcto. Dicho umbral de estabilidad se debe ver formado no solo por la curva  $(v \cdot y)$ , sino también por una línea horizontal a la altura del calado de flotación ( $h_b(v=0)$ ) hasta que corta con la curva. Para velocidades bajas la inestabilidad del vehículo se produce siempre por flotación.

La curva envolvente inferior y la curva de ajuste se encuentran muy próximas. La primera se ve limitada en la mayoría de los casos por el punto de inestabilidad de menor velocidad, estando éste en ocasiones por encima (Mercedes Clase C en la Figura IV-34) o muy próximo por debajo del calado de flotación (BMW 650 y BMW i3 en la Figura IV-34). La precisión en la determinación

de la inestabilidad en tales circunstancias lleva a pensar que pueda existir cierto error y sea por tanto más adecuado aceptar como umbral de estabilidad la curva  $(v \cdot y)$  ajustada.

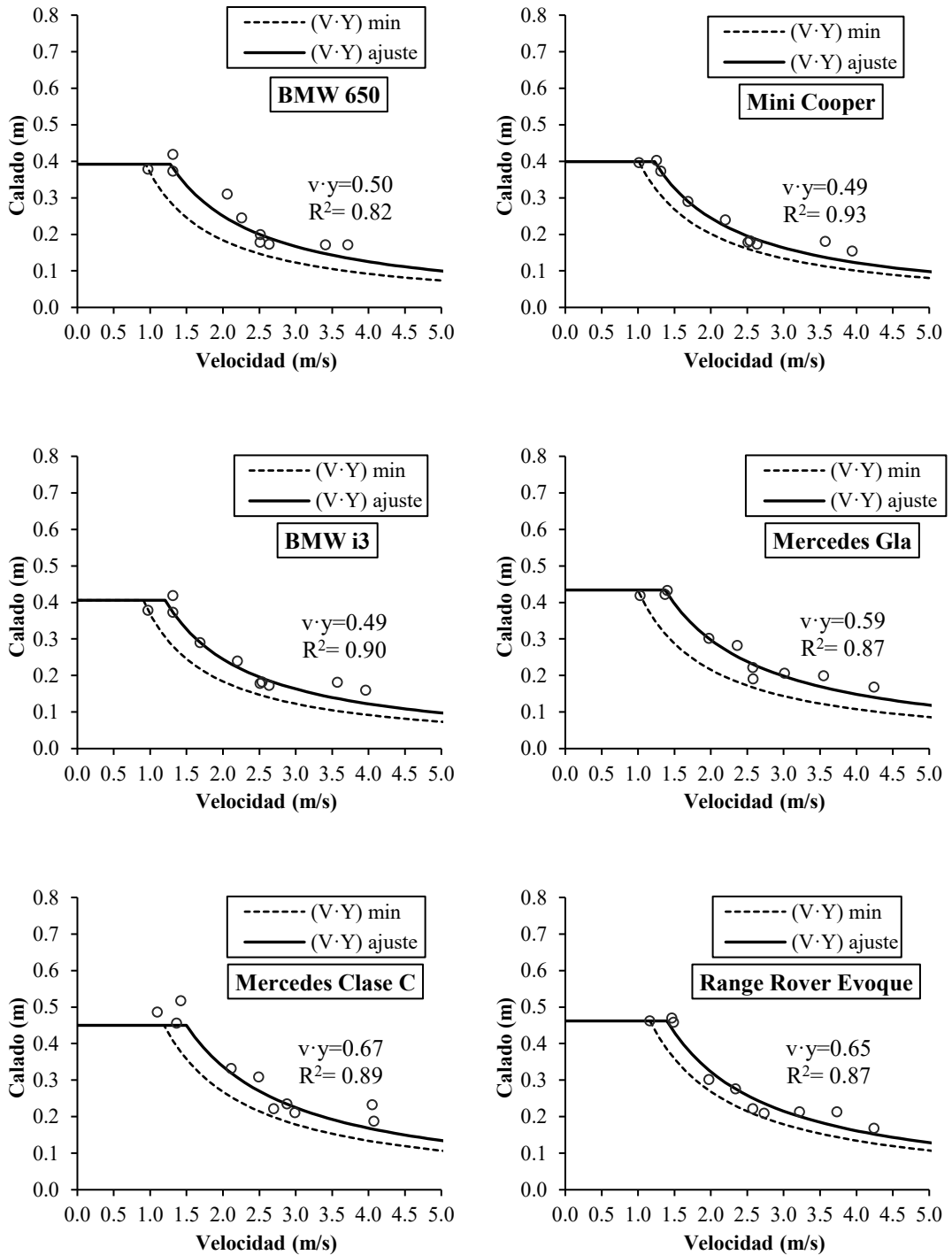


Figura IV-36. Ajuste de los puntos de inestabilidad para los diferentes vehículos mediante la función  $(v \cdot y)$  (1 de 2)

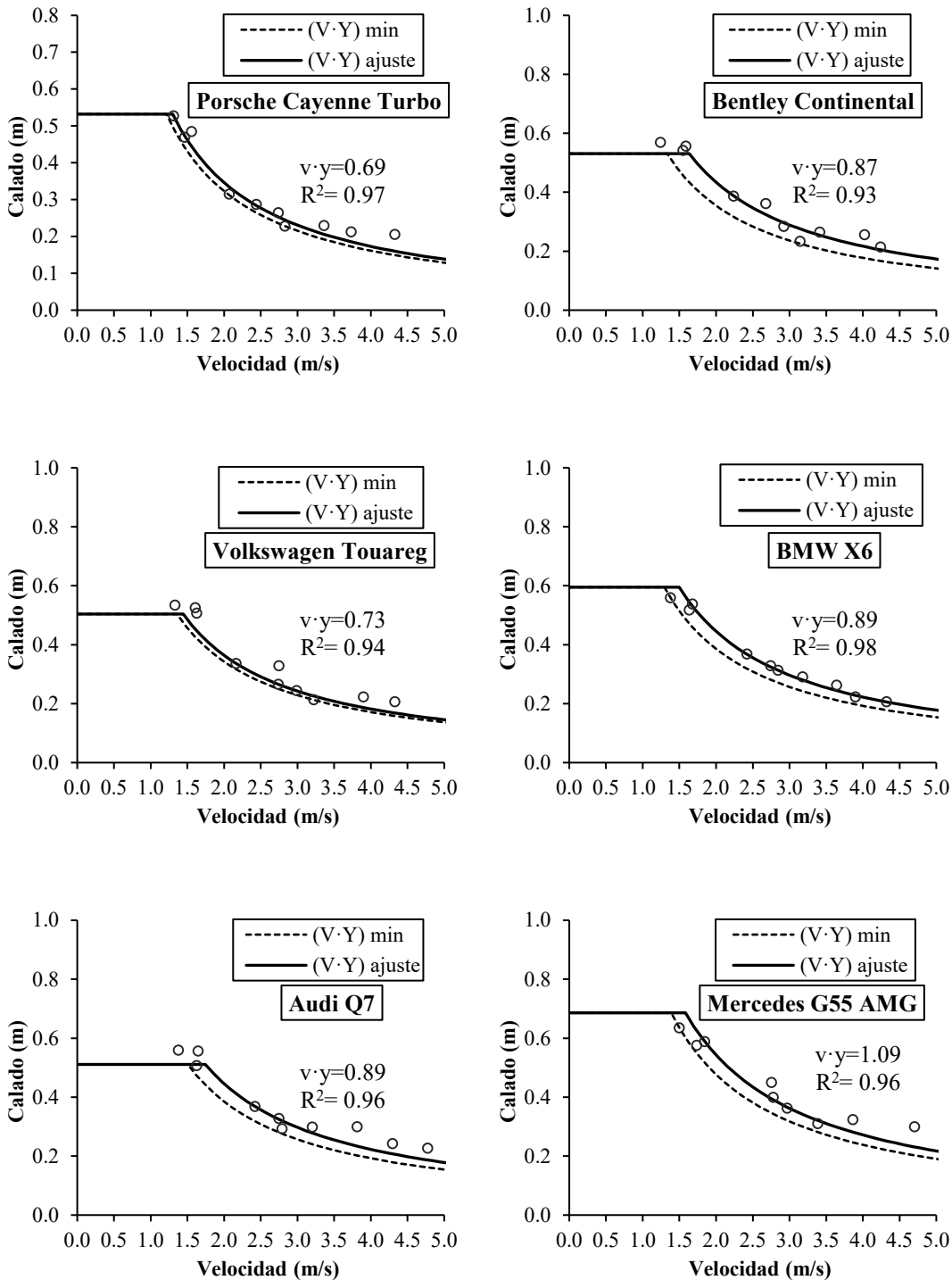


Figura IV-37. Ajuste de los puntos de inestabilidad para los diferentes vehículos mediante la función  $(v \cdot y)$  (2 de 2)

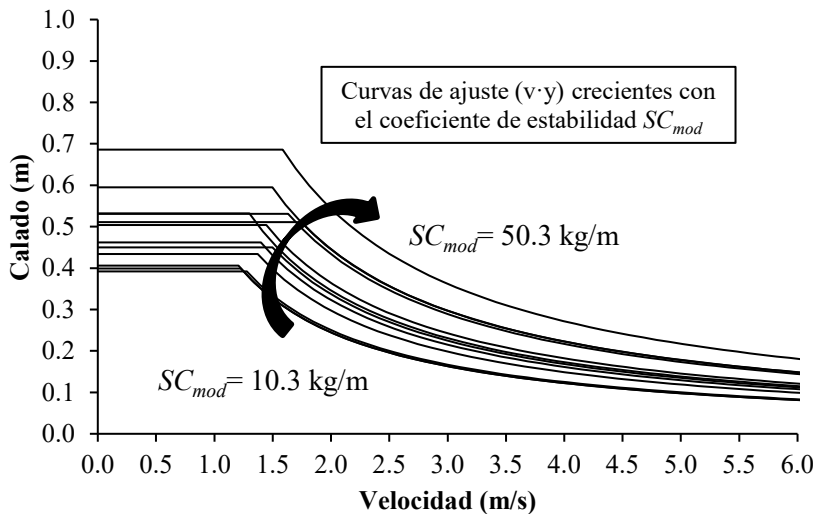


Figura IV-38. Abanico de curvas V·Y de ajuste propuestas para todos los vehículos ensayados

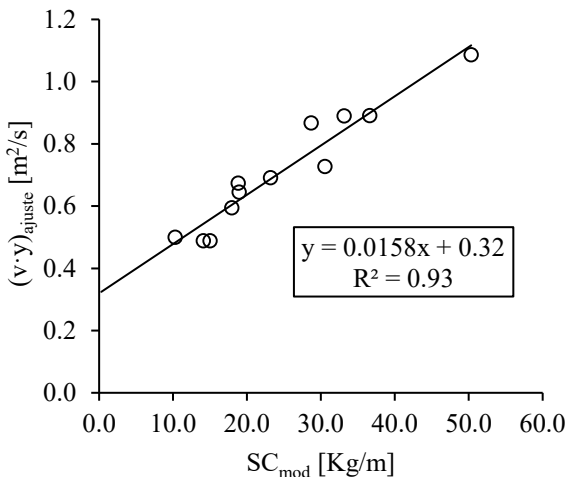
#### IV.8. Metodología de obtención del límite de estabilidad para un vehículo cualquiera

Una vez demostrado que el coeficiente de estabilidad modificado sigue una tendencia creciente, de la misma manera que lo hacen las curvas de estabilidad de los vehículos a escala ensayados, se ha determinado qué tipo de relación sigue dicho coeficiente con el valor de la constante de la curva  $(v \cdot y) = a_0$ . Representando en un gráfico  $SC_{mod} - (v \cdot y)_{ajuste}$  los pares de valores para cada vehículo (Tabla IV-23) se obtiene un buen ajuste lineal con un coeficiente de correlación de  $R^2 = 0.92$  (Figura IV-39). Tal correlación ofrece la posibilidad de obtener una expresión general para cualquier coche real, es decir que a partir del cálculo del coeficiente de estabilidad modificado ( $SC_{mod}$ ) se pueda obtener el valor  $a_0$  correspondiente a la constante de la curva de estabilidad  $(v \cdot y) = a_0$  de ese vehículo.

**Tabla IV-23** Valores de coeficientes de estabilidad modificados ( $SC_{mod}$ ) para cada vehículo y constante del mejor ajuste de la curva  $(v \cdot y)$  para los puntos de inestabilidad para cada vehículo

Modelo	$SC_{mod}$	$(v \cdot y)_{ajuste}$
BMW 650	10.3	0.50
Mini Cooper	14.1	0.49
BMW i3	15.0	0.49
Mercedes GLA	18.0	0.59
Mercedes Clase C	18.8	0.67
Range Rover Evoque	19.0	0.65
Porsche Cayenne Turbo	23.2	0.69
Bentley Continental GT Speed	28.7	0.87
Volkswagen Touareg	30.5	0.73
BMW X6	33.2	0.89
Audi Q7	36.6	0.89
Mercedes G55 AMG	50.3	1.09





**Figura IV-39.** Representación de la correlación lineal entre el valor de la constante de la curva (v·y) propuesta para cada vehículo y el coeficiente de estabilidad modificado asociado a cada uno de ellos

La expresión propuesta según el ajuste lineal obtenido es la siguiente:

$$(v \cdot y) = 0.0158 \cdot SC_{mod} + 0.32 \tag{IV-23}$$

Se observa, que dicha metodología está limitada para valores de umbral de (v·y)=0.32 m²/s que se dan para un coeficiente de estabilidad nulo. Con el ensayo de vehículos muy pequeños (tipo Smart) se podría verificar la zona de bajos SC<sub>mod</sub> (inferiores a 10 kg/m).

Y para definir completamente la curva de estabilidad de cada vehículo se debe calcular el calado de flotación de cada uno, de manera que la curva de estabilidad presente la discontinuidad en el punto de cruce de la línea horizontal que pasa por el calado de flotación y la propia curva (v·y). Puesto que los ensayos experimentales presentaban muy poca desviación con respecto a los valores teóricos, se asumen estos últimos como válidos para considerar en cualquier vehículo. El calado de flotación será obtenido imponiendo que el peso de agua desplazada por el vehículo sea igual al peso de éste. El desarrollo sería el siguiente:

$$V_{desp} \cdot \rho_w = M_c;$$

con  $V_{desp}$ : volumen de agua desplazada,  $\rho_w$ : densidad del agua y  $M_c$ : peso del vehículo.

$$V_{desp} = l_c \cdot b_c \cdot (h_b - GC) = \frac{M_c}{\rho_w}$$

con  $l_c$ : longitud del vehículo,  $b_c$ : ancho del vehículo,  $h_b$ : calado de flotación,  $GC$ : altura libre del vehículo. Despejando finalmente el calado de flotación se obtiene la expresión [IV-24].

$$h_b = \frac{M_c}{\rho_w \cdot l_c \cdot b_c} + GC \tag{IV-24}$$

La velocidad que determina el punto de discontinuidad o cambio de tendencia se obtiene igualando el calado de flotación  $h_b$  al calado de la curva  $y = a_0/v$ , según la expresión [IV-23].

$$v = \frac{M_c}{\rho_w \cdot l_c \cdot b_c \cdot a_0} + \frac{GC}{a_0} \tag{IV-25}$$

Por tanto, conociendo los datos geométricos de un vehículo cualquiera y a partir de las expresiones [IV-23], [IV-24] y [IV-25] es posible determinar la curva de estabilidad para cualquier vehículo. La única variable desconocida a priori, a la hora de calcular el coeficiente de estabilidad modificado, es el coeficiente de rozamiento  $\mu$ .

Puesto que estudios previos ([45], [29]) determinaron que el rango para el coeficiente de rozamiento entre un neumático y una carretera puede estar comprendido entre 0.25 y 0.75, se propone la determinación de un par de curvas  $(v \cdot y)_{\min}$  y  $(v \cdot y)_{\max}$  asociadas al valor del coeficiente de rozamiento mínimo y máximo respectivamente. De esta manera para cada vehículo se obtiene una zona de seguridad, por debajo de la curva asociada al valor mínimo del coeficiente de rozamiento, y una zona de incertidumbre situada entre ambas curvas.

En la Figura IV-40 se han representado de forma esquemática estas zonas. La zona de seguridad ofrece plenas garantías de estabilidad para el vehículo propuesto, pero un punto situado en la zona de incertidumbre generará inestabilidad al vehículo o no dependiendo del coeficiente de rozamiento en el momento de producirse la inundación. Existen múltiples combinaciones de situaciones que pueden hacer variar el coeficiente de rozamiento, ya sea el estado de conservación de la carretera, el tipo de neumático y/o antigüedad de éste, e incluso el tipo de pavimento en el que se encuentra el vehículo en ese momento.

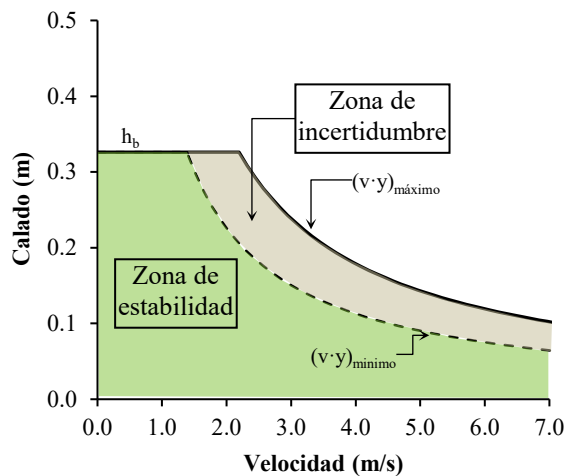


Figura IV-40. Esquema de la metodología general para determinación de la estabilidad de un vehículo cualquiera

### IV.9. Ejemplo práctico de la aplicación de la metodología propuesta

A partir de la metodología propuesta se determinan en este apartado los umbrales de estabilidad para vehículos que circulan habitualmente por las carreteras de España. Según informa la

Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC), los tres vehículos más vendidos en España son el Citroën C4, el Seat León y el Seat Ibiza (Figura IV-41).



Figura IV-41. Seat Ibiza, Citroën C4 y Seat León, de izquierda a derecha

Para determinar el umbral de estabilidad de un vehículo, según la metodología propuesta, únicamente se necesitan conocer las características físicas del vehículo, que se encuentran en las fichas técnicas de cada vehículo. En la Tabla II-25 se recogen las dimensiones y peso de los vehículos considerados.

Tabla IV-24 Dimensiones y pesos del modelo Citroën C4, Seat León y Seat Ibiza (año 2015)

	Longitud $l_c$ (m)	Ancho $b_c$ (m)	Área en planta PA ( $m^2$ )	Peso en vacío $M_c$ (kg)	Altura libre GC (mm)
<b>Citroën C4</b>	4.33	1.79	7.75	1280	143
<b>Seat León</b>	4.26	1.82	7.74	1286	145
<b>Seat Ibiza</b>	4.23	1.69	7.15	1110	124

A partir de estas dimensiones y pesos se debe calcular el coeficiente de estabilidad modificado de cada uno de los vehículos ( $SC_{mod}$ ) según la expresión [IV-18]. Puesto que este coeficiente depende del coeficiente de rozamiento, se calculan dos coeficientes, el mínimo y el máximo, considerando los valores de coeficiente de rozamiento extremos 0.25 y 0.75 respectivamente.

Con cada coeficiente de estabilidad modificado no hay más que entrar en la expresión [IV-23] o gráficamente, tal y como se observa en la Figura IV-42, para el vehículo Seat Ibiza. De esta manera se obtienen dos curvas ( $v \cdot y$ ), la máxima y la mínima.

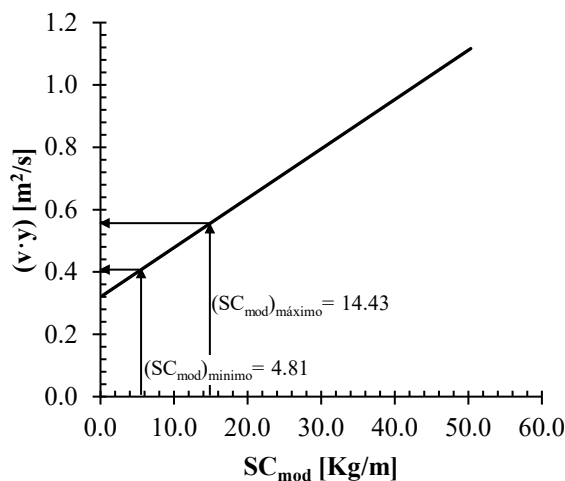


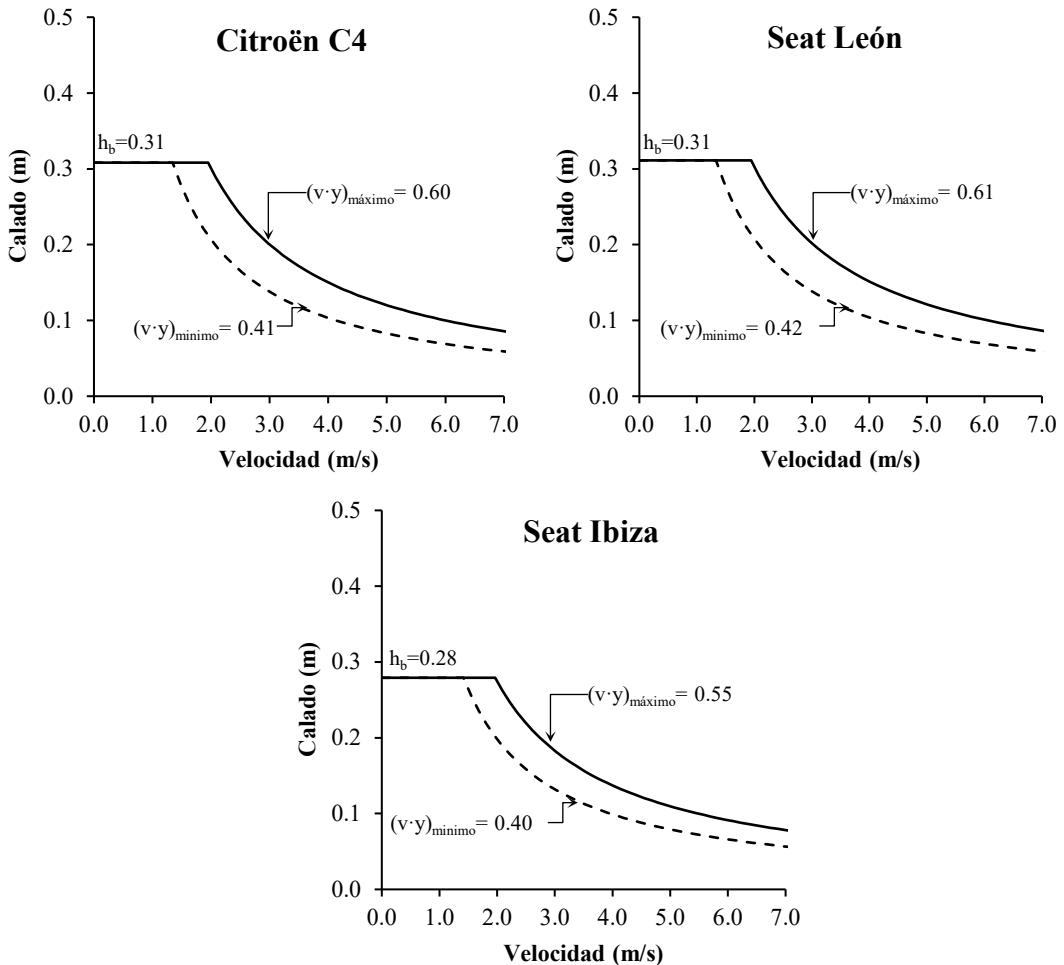
Figura IV-42. Determinación gráfica del umbral ( $v \cdot y$ ) en función del  $SC_{mod}$ , para el coche Seat Ibiza

Para cerrar el umbral de estabilidad solo queda determinar analíticamente el calado de flotación a partir de la expresión [IV-24] a partir de los datos de dimensiones y pesos de cada vehículo. Se recogen en la Tabla IV-25 los coeficientes de estabilidad, calados de flotación y umbrales de estabilidad calculados para el vehículo Citroën C4, Seat León y Seat Ibiza.

**Tabla IV-25** Coeficientes de estabilidad, calados de flotación y umbrales de estabilidad para los vehículos considerados

	SC (kg/m)	(SC <sub>mod</sub> ) <sub>min</sub> (kg/m)	(SC <sub>mod</sub> ) <sub>max</sub> (kg/m)	h <sub>b</sub> (m)	(v·y) <sub>min</sub> (m <sup>2</sup> /s)	(v·y) <sub>max</sub> (m <sup>2</sup> /s)
<b>Citroën C4</b>	23.62	5.90	17.71	0.31	0.41	0.60
<b>Seat León</b>	24.09	6.02	18.07	0.31	0.42	0.61
<b>Seat Ibiza</b>	19.24	4.81	14.43	0.28	0.40	0.55

En la Figura IV-43 se recogen los umbrales de estabilidad para los tres vehículos, el mínimo y el máximo, quedando la zona de incertidumbre comprendida entre ambos umbrales debido a la incertidumbre del coeficiente de rozamiento. Queda asegurada la estabilidad del vehículo para condiciones hidráulicas (calado y velocidad) situadas bajo el umbral mínimo.



**Figura IV-43.** Determinación gráfica del umbral (v·y) en función del SC<sub>mod</sub>, para el coche seat Ibiza

### IV.10. Validación de la metodología propuesta

La validación de la metodología propuesta se lleva a cabo a partir de la comparativa con los resultados experimentales obtenidos por Shu *et al.* (2011) y por Xia *et al.* (2013), para diferentes vehículos a escala.

En los trabajos de Xia *et al.* (2013) se estudiaron dos vehículos, el modelo Honda Accord y el Modelo Audi Q7, pero no se determinaron experimentalmente los coeficientes de rozamiento exactos. En cambio, sí se determinó el calado de flotación para ambos. Los valores de dimensiones y pesos considerados para los vehículos ensayados son los obtenidos de escalar dimensiones y pesos del vehículo modelo y no los correspondientes al vehículo real. Estos datos se recogen en la Tabla IV–26, así como los valores de los coeficientes de estabilidad modificados para cada uno de los dos modelos de vehículos.

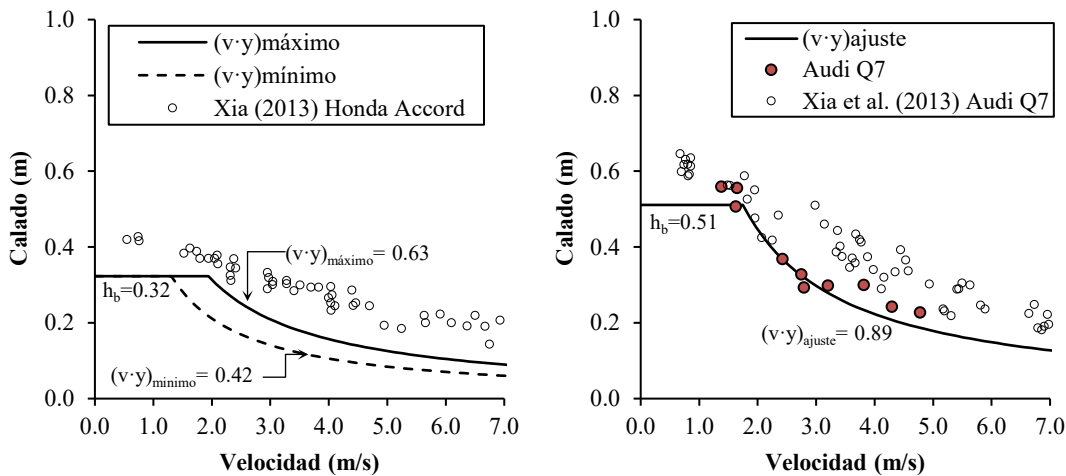
**Tabla IV–26** Características de los vehículos estudiados por Xia *et al.* (2013)

Ref.	Vehículo	Long. <sup>1</sup> [mm]	Ancho <sup>1</sup> [mm]	Peso vacío <sup>2</sup> [kg]	Altura libre <sup>3</sup> [mm]	$\mu$	$h_b$ [m]	SC <sub>mod</sub> [Kg/m]
Xia <i>et al.</i> (2013)	Honda Accord	4,970	1,876	1,638	147	0.25/0.75	0.45	6.47/19.41
	Audi Q7	5,110	1,960	2,346	252	0.25/0.75	0.67	14.75/44.27

<sup>1</sup> Longitud del modelo, escalada a prototipo

<sup>2</sup> Peso del modelo escalado a prototipo

<sup>3</sup> Altura libre obtenida de las fichas técnicas de los vehículos prototipo. Para el vehículo Audi Q7 se ha utilizado la obtenida de escalar la altura libre del modelo utilizado en el presenta estudio hasta prototipo.



**Figura IV-44.** Representación de los puntos experimentales de Xia *et al.* (2013) frente a las curvas límite de estabilidad propuestas

Para el primero de los modelos, Honda Accord, se han representado los puntos de inestabilidad obtenidos experimentalmente junto con las curvas de estabilidad calculadas según la metodología propuesta en este capítulo, para un coeficiente de rozamiento mínimo ( $\mu=0.25$ ) y uno máximo ( $\mu=0.75$ ). Todos los puntos experimentales se encuentran por encima de la curva correspondiente al máximo valor de coeficiente de rozamiento, lo cual es indicativo que dichos vehículos presentan un coeficiente de rozamiento superior a 0.75 o que el vehículo en realidad permite la entrada de

una cierta cantidad de agua, con lo que se incrementa la estabilidad de éste al verse aumentado el peso. El calado de flotación determinado experimentalmente,  $h_b=0.45$  m, es significativamente superior al calculado teóricamente,  $h_b=0.32$  m, lo cual parece indicar que se produce entrada de agua en el vehículo y por tanto requiere mayor volumen de agua desplazado para producir la inestabilidad por flotación.

El tratamiento para el modelo Audi Q7 se realiza de una manera diferente, al ser en este caso el mismo vehículo tratado en este estudio y el realizado por Xia *et al.* (2013). Se comparan directamente los valores experimentales de ambos estudios, representando también la curva de mejor ajuste propuesta para el modelo Audi Q7. En este caso la mayoría de los puntos de inestabilidad determinados por Xia *et al.* (2013) están ligeramente por encima de la curva propuesta, pero más próximos que el caso del modelo Honda Accord. En cualquier caso se observa que la altura de flotación determinada experimentalmente en este estudio es significativamente inferior a la obtenida por Xia *et al.* (2013), lo cual parece indicar que cierta cantidad de agua entraba en el vehículo ensayado, incrementando así el calado de flotación.

En los experimentos de Shu *et al.* (2011) se estudiaron tres vehículos, los modelos Ford Focus, Ford Transit y Volvo XC90, y si bien se determinaron experimentalmente los coeficientes de rozamiento exactos, no se llevaron a cabo experimentos para obtener el calado de flotación. En este caso también los valores de dimensiones y pesos considerados para los vehículos ensayados son los obtenidos de escalar dimensiones y pesos del vehículo modelo y no los correspondientes al vehículo real. Estos datos se recogen en la Tabla IV–28, así como los valores de los coeficientes de estabilidad modificados para cada uno de los tres modelos de vehículos.

**Tabla IV–27** Características de los vehículos estudiados por Shu *et al.* (2011)

Ref.	Vehículo	Long. <sup>1</sup> [mm]	Ancho <sup>1</sup> [mm]	Peso vacío <sup>2</sup> [kg]	Altura libre <sup>3</sup> [mm]	$\mu$	SC <sub>mod</sub> [Kg/m]
Shu <i>et al.</i> (2011)	Ford Focus	4,320	1,782	1,392	100	0.50	9.04
	Ford Transit	4,860	1,980	1,809	190	0.39	13.93
	Volvo XC90	4,806	1,890	2,155	231	0.68	37.27

<sup>1</sup> Longitud del modelo escalada a prototipo

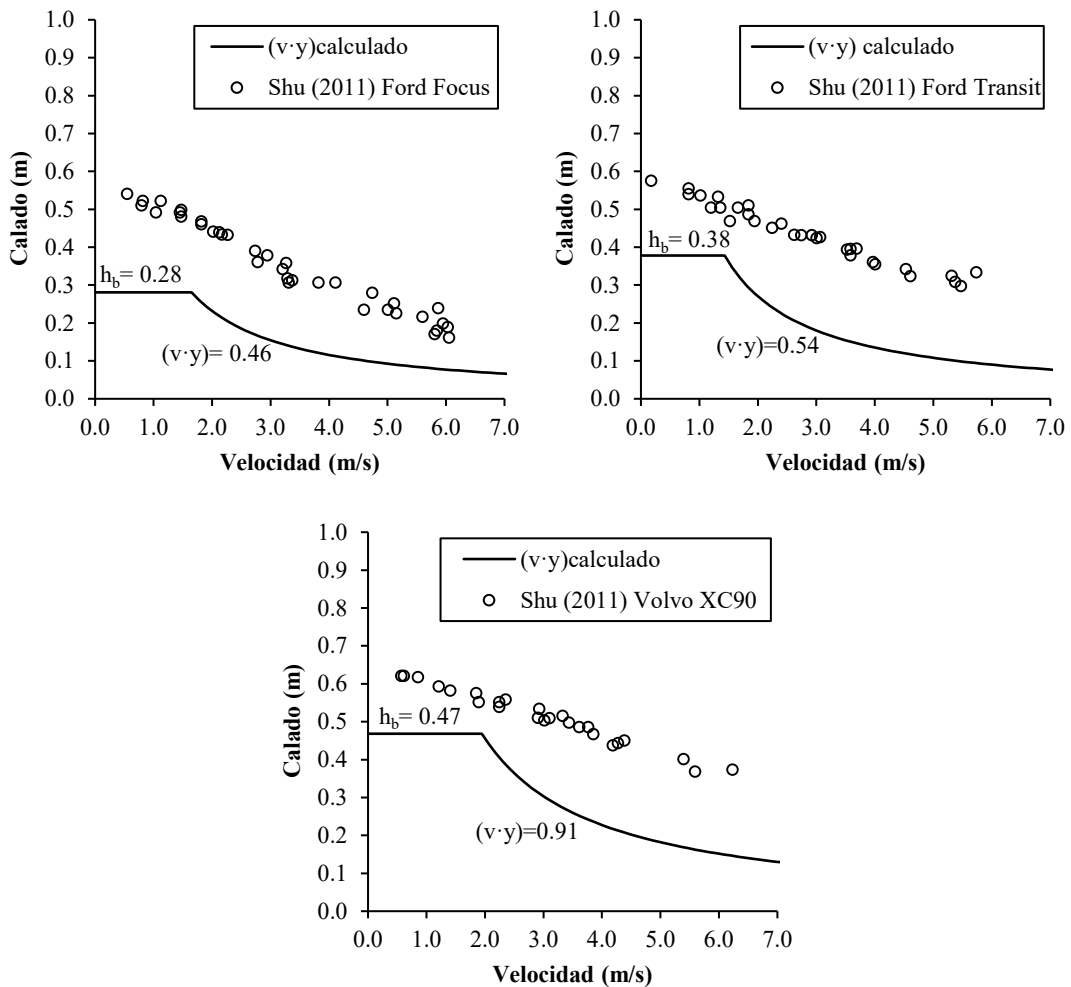
<sup>2</sup> Peso del modelo escalado a prototipo

<sup>3</sup> Altura libre obtenida de las fichas técnicas de los vehículos prototipo

En este caso, el coeficiente de rozamiento es conocido puesto que fue determinado experimentalmente, por lo tanto una única curva definirá la zona de seguridad (Figura IV–45). Para los tres modelos la curva calculada se encuentra por debajo de los puntos de estabilidad obtenidos. Éstos se encuentran sensiblemente por encima, lo cual parece indicar también que se producía cierta entrada de agua en los modelos ensayados incrementando el peso del vehículo y por tanto su estabilidad. El uso exclusivo de espuma ligera para evitar la entrada de agua en los vehículos no es suficiente puesto que la espuma absorbe agua, lo cual se pudo observar en los ensayos del presente estudio, siendo necesario el sellado de todas fisuras o huecos que permitían el contacto del agua con la espuma.

Como ya se comentó anteriormente en este capítulo, cuando un vehículo se encuentra inundado en la mayoría de los casos el agua penetrará en él. Dicha situación es incontrolable pues cada vehículo real presenta diferente grado de estancamiento, con lo cual se deben presentar curvas de estabilidad que estén del lado de la seguridad. En todos los casos evaluados en este apartado las

curvas de estabilidad propuestas, según la metodología presentada en este capítulo, están por debajo de los puntos de estabilidad determinados experimentalmente por otros autores (Shu *et al.*, 2011; Xia *et al.*, 2013). Por tanto, dicha metodología responde de forma adecuada, ofreciendo una zona de seguridad en cuanto a inestabilidad de vehículos en inundaciones, para cualquier vehículo real.



**Figura IV-45.** Representación de los puntos experimentales de Shu *et al.* (2011) frente a las curvas límite de estabilidad propuestas

#### IV.11. Análisis comparativo con otros criterios de estabilidad de vehículos

Uno de los principales criterios de estabilidad de vehículos hasta el momento es el proporcionado por la Guía Australian Rainfall & Runoff (AR&R), en su “Proyecto de revisión 10: Un criterio apropiado para la seguridad de vehículos” (Shand *et al.*, 2011) donde se comparan los resultados experimentales de Bonham y Hattersley (1967) y Gordon y Stone (1973) y los analíticos de Keller y Mitsch (1993) con varias recomendaciones y directrices australianas. Exceptuando los criterios del Public Works Department (1986)/ NSW Floodplain Development Manual (2005) y la

AustRoads (2008), el resto de criterios de las diferentes directrices y recomendaciones son no conservadores cuando se comparan con los resultados experimentales y analíticos. Los autores proponen un coeficiente de rozamiento de  $\mu = 0.3$ , probablemente conservador, pero asumen que la actual falta de datos disponibles y el amplio rango de condiciones de superficies de carreteras y neumáticos hacen que no sea adecuado proponer un coeficiente más ajustado. En dicho criterio propuesto los autores asumían también que éste podía no ser directamente aplicable a vehículos más modernos estando en el lado de la seguridad, debido a la limitada naturaleza de los trabajos experimentales que se habían considerado y la falta de calibración de los estudios analíticos tenidos en cuenta. Este criterio está dividido para coches pequeños, coches grandes y coches todoterreno (Tabla IV–28).

En dicho criterio se tuvo en cuenta la posibilidad de que el coche estuviera ocupado y en caso que una persona abandonara el vehículo la seguridad de ésta no se viera comprometida. El criterio de estabilidad de personas también fue estudiado en esta Guía (Cox *et al.*, 2010; Shand *et al.*, 2011) y para todos los tipos de vehículos, el criterio de seguridad permanece por debajo del criterio de peligrosidad moderada para adultos ( $(v \cdot y) \leq 0.60$ ). Los límites superiores de calado proporcionados responden a los límites de flotación. El calado para vehículos pequeños, 0.3 m, se encuentra bajo el límite propuesto por Bonham y Hattersley (1967) y de acuerdo con la propuesta del Public Works Department (1986) y el AustRoads (2008). El calado para vehículos grandes de 0.4 m se encuentra dentro de los límites propuestos por Keller y Mitsh (1993). El calado de flotación para vehículos todoterreno de 0.5 m se encuentra entre los límites proporcionados por Bonham y Hattersley (1967) para el gran Ford Falcon.

**Tabla IV–28** Propuesta provisional para criterios de estabilidad de vehículos estacionados

Tipo de vehículo	Longitud (m)	Peso en vacío (kg)	Altura libre (m)	Calado límite	Velocidad mínima de influencia	Velocidad máxima	Ecuación de estabilidad
Pequeño	<4.3	<1250	<0.12	0.3	0.10	3.0	$(v \cdot y) \leq 0.30$
Grande	>4.3	>1250	>0.12	0.4	0.15	3.0	$(v \cdot y) \leq 0.45$
Todoterreno	>4.5	>2000	>0.22	0.5	0.20	3.0	$(v \cdot y) \leq 0.60$

Los estudios realizados por Teo (2010) fueron previos a la publicación del “Proyecto de revisión 10: Un criterio apropiado para la seguridad de vehículos” (Shand *et al.*, 2011), pero no fueron tenidos en cuenta ya que los resultados presentados como conclusión no eran correctos, al no haber aplicado de manera apropiada la semejanza de Froude. Los pesos de los modelos no fueron reducidos a la escala correspondiente, obteniendo finalmente curvas de estabilidad muy superiores a las que debieran ser en prototipo y por tanto presentando resultados del lado de la inseguridad. Seguidamente Xia *et al* (2011) propusieron un desarrollo analítico para determinar la estabilidad de tres vehículos, en base a los resultados experimentales llevados a cabo por Teo (2010), corrigiendo de esta manera las curvas presentadas por éste.

El mismo año de publicación de los criterios propuestos por la Guía AR&R se presentaron los estudios de Shu *et al.* (2011), y dos años más tarde los trabajos de Xia *et al.* (2011) y Toda *et al.* (2013). Estos últimos trabajos no fueron considerados en la guía AR&R, con lo cual merece la pena evaluar la validez de los criterios propuestos en el “Proyecto de revisión 10: Un criterio apropiado para la seguridad de vehículos” (Shand *et al.*, 2011) comparando dichas curvas con los resultados experimentales realizados posteriormente. En la Figura IV–46 se representan los criterios



propuestos por la Guía AR&R así como los puntos de inestabilidad y curvas analíticas obtenidos por los autores que presentaron sus estudios posteriormente a la publicación de los criterios de estabilidad de la Guía australiana.

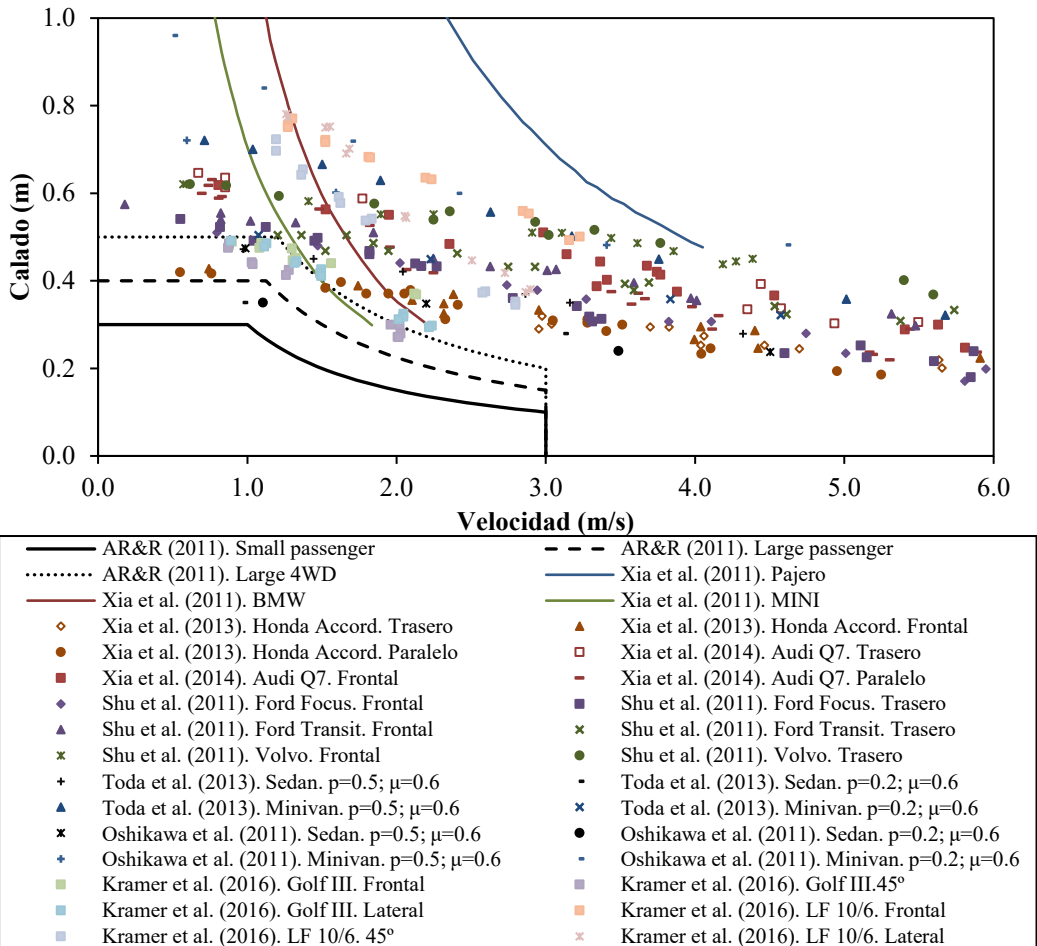
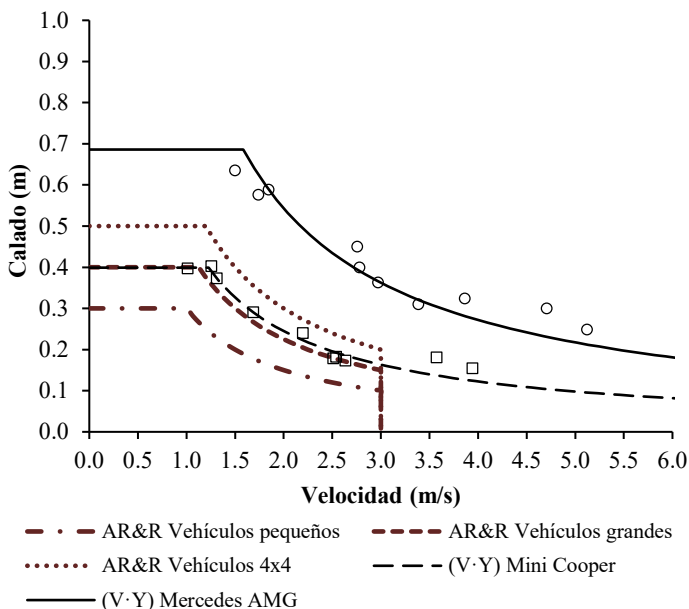


Figura IV-46. Comparativa entre el criterio propuesto en la Guía AR&R (Shand *et al.*, 2011) y estudios posteriores en relación a la inestabilidad de vehículos

Se aprecia que dicho criterio sigue siendo adecuado para vehículos más modernos, como son los considerados por los autores posteriores. Prácticamente la totalidad de los puntos de inestabilidad se encuentran por encima de la curva de vehículos grandes, pero la gran mayoría de ellos también se encuentran por encima de la curva correspondiente a vehículos grandes. Ningún punto aparece en la zona de seguridad considerada para vehículos pequeños.

En la Figura IV-47 se representan los criterios de la Guía AR&R junto con las curvas de ajuste inferior y superior propuestas en este estudio, correspondientes al vehículo Mini Cooper y Mercedes AMG respectivamente. La curva de ajuste propuesta para el vehículo de menor estabilidad (Mini Cooper) corresponde en gran medida a la curva de estabilidad para vehículos grandes, aunque la curva de ajuste para el vehículo más estable (Mercedes G55 AMG) está muy por encima de la correspondiente a vehículos todoterreno propuesta por la Guía AR&R. Hay que

tener en cuenta que los coeficientes de rozamiento correspondientes a los vehículos ensayados eran muy superiores al valor de  $\mu=0.3$  considerado en el criterio de la guía AR&R, con lo que es razonable que dicho criterio de estabilidad sea más restrictivo.



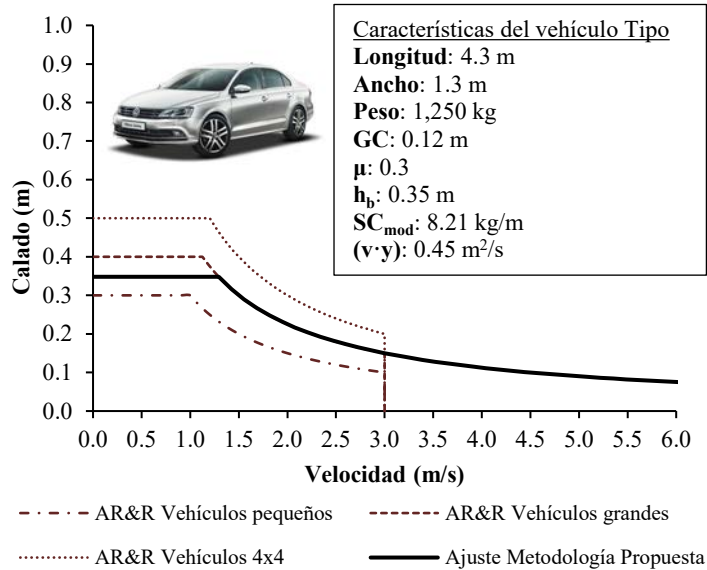
**Figura IV-47.** Comparativa entre el criterio propuesto en la Guía AR&R (Shand *et al.*, 2011) y las curvas de estabilidad superior e inferior obtenidas en este estudio

A partir de la metodología propuesta en este capítulo es posible determinar qué tipo de vehículo correspondería a las curvas de estabilidad de la Guía AR&R. Fijando las dimensiones límite de la Tabla IV-28, como son la Longitud, el Peso y la Altura libre, así como un coeficiente de rozamiento de  $\mu=0.3$ , únicamente debe determinarse el ancho del vehículo. No es posible obtener curvas (v·y) inferiores a un valor de 0.32 según la expresión [IV-21], tal y como se comentó en el apartado de su desarrollo, por tanto, se ha calculado el vehículo correspondiente a la curva de estabilidad para vehículos grandes y vehículos todoterreno.

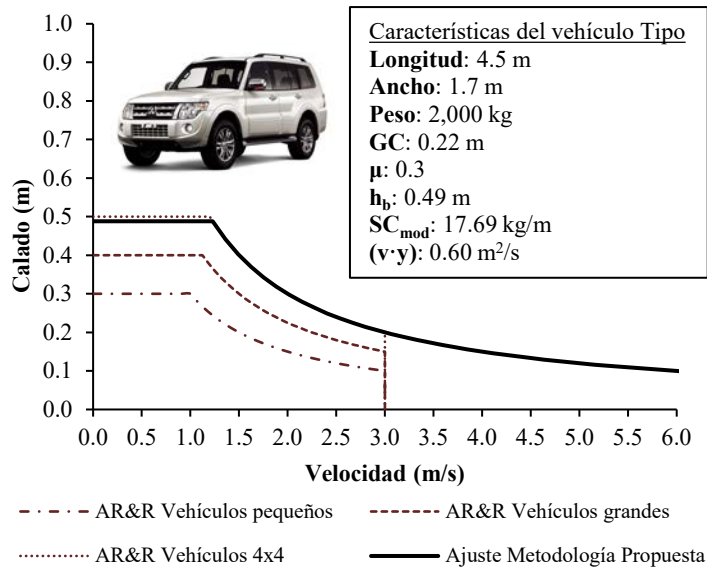
El ajuste a la curva (v·y)=0.45 se consigue con un ancho de vehículo de 1.3 m, obteniendo un coeficiente de estabilidad ( $SC_{mod}$ ) de 8.21 kg/m y un calado de flotación de 0.35 m. En este caso el umbral determinado es ligeramente más restrictivo puesto que el calado de flotación es 5 cm inferior al considerado en la Guía AR&R ( $h_b=0.40m$ ) para vehículos grandes. Asociando esta curva a un vehículo que circule por nuestras calles, se trataría de un tipo Volkswagen Jetta con un  $SC_{mod}$  de 8.28 kg/m, según las características que se mostraron en la Tabla IV-2.

El ajuste a la curva (v·y)=0.6 se consigue con un ancho de vehículo de 1.7 m, obteniendo un coeficiente de estabilidad ( $SC_{mod}$ ) de 17.69 kg/m y un calado de flotación de 0.49 m. En este caso el umbral determinado es prácticamente igual al considerado en la Guía AR&R para vehículos todoterreno, y el calado de flotación calculado ( $h_b=0.49m$ ) y propuesto en la Guía AR&R ( $h_b=0.50m$ ) solo distan 1 cm. Asociando esta curva a un vehículo que circule por nuestras calles, se trataría de un tipo Mitsubishi Pajero/Montero con un  $SC_{mod}$  de 17.73 kg/m, según las características que se mostraron en la Tabla IV-2.

Hay que tener en cuenta sin embargo, que la curva de estabilidad propuesta por la Guía AR&R para vehículos todoterreno corresponde al criterio de peligrosidad moderada para adultos  $((v \cdot y) \leq 0.60)$ . La curva determinada en este caso según la metodología propuesta responde exclusivamente a la estabilidad de de vehículos. Parece lógico pensar por tanto que en cualquier caso el umbral de estabilidad de personas debiera estar muy por debajo del de vehículos.



**Figura IV-48.** Ajuste a la curva de vehículos grandes según clasificación de la Guía AR&R. Imagen del Volkswagen Jetta como vehículo con el  $SC_{mod}$  más próximo al vehículo tipo



**Figura IV-49.** Ajuste a la curva de vehículos todoterreno según clasificación de la Guía AR&R. Imagen del Mitsubishi Montero/Pajero como vehículo con el  $SC_{mod}$  más próximo al vehículo tipo

## IV.12. Síntesis y conclusiones

Después de la revisión del estado de la cuestión referente a los estudios experimentales sobre la estabilidad de vehículos expuestos a inundaciones se observó que ninguno de ellos llevó a cabo ensayos con más de dos o tres modelos de vehículos a escala reducida, con lo que no es posible desarrollar una metodología general aplicable para cualquier vehículo real. El criterio australiano propuesto en la Guía AR&R ha sido el criterio más idóneo hasta el momento para garantizar la estabilidad de los vehículos, agrupados en tres tipologías. Dicho criterio ha sido actualizado y validado de acuerdo con resultados de estudios posteriores. Sin embargo, el criterio australiano no es suficientemente flexible para considerar cualquier vehículo con diferentes características. En este sentido era necesario llevar a cabo una completa y rigurosa campaña experimental ensayando una gran variedad de vehículos con el objetivo de obtener una metodología general para definir la zona estable en el dominio calado-velocidad para cualquier tipo de vehículo.

En la campaña experimental descrita en este capítulo se han ensayado doce modelos de vehículos a escala reducida y, en base al análisis de los resultados, se propone una metodología para obtener el umbral de estabilidad para cualquier vehículo real expuesto a una inundación. Los ensayos fueron realizados con tres escalas diferentes (1:14, 1:18 y 1:24), en los que se incluían además el análisis de flotación y de rozamiento, los cuales hacen que el presente estudio sea el más completo hasta el momento. Esta metodología permite definir una zona estable en el dominio calado-velocidad con la suficiente precisión para cualquier vehículo real. Con esta metodología se proporciona una herramienta que puede ser utilizada por los responsables en la toma de decisiones en el campo de la gestión del riesgo de inundaciones en zonas urbanas, definiendo un coche de diseño y obteniendo su correspondiente umbral de estabilidad.



## *Capítulo V*

# *Modelación 3D: estudio de la estabilidad de peatones y vehículos ante inundaciones*

### **V.1. Introducción**

Las técnicas y herramientas de simulación numérica evolucionan rápidamente y lo hacen en paralelo a los avances tecnológicos que permiten el diseño de equipos informáticos cada vez más potentes. Las simulaciones numéricas aplicadas a la mecánica de fluidos se conocen en la literatura como CFD (Computational Fluid Dynamics), y si bien años atrás las únicas simulaciones que se llevaban a cabo eran las conocidas como unidimensionales (1D), cada vez es más extendido el uso de códigos bidimensionales (2D) e incluso tridimensionales (3D). Uno de los mayores inconvenientes de la utilización de códigos 2D, y en mayor medida de códigos 3D, era su gran coste computacional, inasumible en muchos casos. Hoy en día se trabaja en la reducción del tiempo computacional y, si bien la potencia de los equipos informáticos que se encuentran en el mercado ayuda, también se realizan mejoras en los algoritmos que resuelven las ecuaciones que gobiernan los problemas de ingeniería en general y de la mecánica de fluidos y la hidráulica en particular.

Los códigos 1D en hidráulica, por lo general resuelven mediante técnicas numéricas la ecuación de Bernoulli (Balance de energía) cuando se resuelve un flujo en régimen permanente o las ecuaciones de Saint Venant unidimensionales cuando se trabaja con flujos en régimen variable. Dichos códigos suelen aplicarse a canales o largos tramos de ríos que presenten un marcado comportamiento unidimensional, es decir que las líneas de corriente sigan la dirección predominante del eje del río o canal, o lo que es lo mismo, que las velocidades en dirección vertical y transversal pueden ser despreciables sin alterar el comportamiento global de la hidráulica del río o canal. Un código habitual, de libre distribución y ampliamente extendido es el programa Hec-Ras desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América.

Los códigos 2D resuelven las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales, mediante diferentes técnicas numéricas. La aplicación de estos códigos se limita a zonas más reducidas que las abarcadas por los códigos 1D y su uso se centra en flujos de agua que presentan dos direcciones principales, siendo una de ellas despreciable, hipótesis aplicada en la deducción de las ecuaciones

de Saint Venant en las que se promedian las velocidades en esa dirección, habitualmente en vertical. Se asumen presiones hidrostáticas en todo el dominio de estudio. Estas condiciones llevan a que su utilización sea más amplia que para un código 1D, pero limitada, en cualquier caso. En ingeniería fluvial sería de utilidad en zonas de ríos meandriformes o zonas deltaicas con menores calados (aguas someras) y sin una dirección principal de flujo. Uno de los códigos 2D con cada vez más repercusión, especialmente en países de habla hispana, es Iber, código de libre distribución y desarrollado en colaboración por el Instituto Flumen (Universitat Politècnica de Catalunya y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería) y el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA) de la Universidad de A Coruña.

Los códigos tridimensionales resuelven las ecuaciones RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) mediante diferentes técnicas numéricas. Se trata de ecuaciones basadas en las de Navier-Stokes, considerando velocidades medias (RANS) en lugar de instantáneas (N-S). Reciben su nombre gracias a la aportación de Reynolds, quien desarrolló el concepto de la turbulencia. Los códigos 3D presentan el mayor coste computacional posible, pues resuelven las ecuaciones completas en las tres direcciones del espacio. Tienen multitud de aplicaciones, aunque su elevado coste computacional las reduce a estudios más localizados. Algunos ejemplos podrían ser estudios de aliviaderos de presas, compuertas o del comportamiento del rodete de una bomba hidráulica. En el trabajo de Gómez *et al.* (2014) se realiza un completo estudio numérico de un tramo en curva del modelo de canal de riego PAC-UPC, utilizando para ello códigos 1D (Hec-Ras), 2D (Iber) y 3D (Flow-3D), cuyos resultados fueron comparados y extraídas conclusiones sobre los tres tipos de códigos.

Independientemente del tipo de código empleado, los modelos numéricos se utilizan en aquellas situaciones en que un modelo físico resulta inviable o demasiado costoso. En otras ocasiones se complementan, situación ideal, pues éstos requieren de procesos de calibración que proporcionen la confianza de unos buenos resultados. Una batería de ensayos experimentales en modelo físico permite obtener resultados con los que calibrar un modelo numérico, a partir del cual se pueden llevar a cabo multitud de “ensayos” con menor esfuerzo y a menudo en menor tiempo, como si de un laboratorio virtual se tratara.

En este capítulo se describen las diferentes simulaciones llevadas a cabo, las cuales, calibradas a partir de los modelos físicos utilizados para el análisis de la estabilidad de las personas y de los vehículos, permiten conocer con mayor detalle el fenómeno que sucede en cada caso. Con estas simulaciones se analizarán variables que difícilmente pueden ser obtenidas experimentalmente, y que aportan mucha información cualitativa y cuantitativa. Flow-3D es el código comercial escogido para llevar a cabo las simulaciones tridimensionales, en unos campos poco utilizados hasta el momento: el estudio de la estabilidad de peatones y vehículos expuestos a inundaciones.

En los siguientes apartados de este capítulo se describen brevemente algunos trabajos encontrados en la literatura sobre simulaciones tridimensionales enfocadas a vehículos y personas expuestos a inundaciones. Se introducen posteriormente los modelos numéricos y casos de estudio simulados y seguidamente las ecuaciones que gobiernan el problema de la mecánica de fluidos en general y del flujo en lámina libre en particular, así como la manera en que Flow-3D trata y resuelve dichas ecuaciones. En último lugar, se describe el proceso de calibración de los modelos desarrollados y se discuten los resultados obtenidos para cada caso de estudio.

## V.2. Revisión del estado de la cuestión

### V.2.1. Aplicaciones numéricas tridimensionales a la estabilidad de vehículos

Si bien la investigación de la estabilidad de vehículos ante inundaciones se encuentra aún en un estado poco maduro, el uso de herramientas tridimensionales en este campo está aún menos extendido. Sin embargo, existen algunas referencias recientes como el estudio llevado a cabo por Buscariolo (2014) en el que, mediante un código 3D, se estudia el fenómeno que se produce cuando un vehículo cruza una carretera inundada. El objetivo del estudio era el análisis de la entrada de agua en la toma de aire del motor del vehículo, así como las presiones a las que se ve sometido al cruzar una calzada con 30 cm de calado y a una velocidad de 20 km/h. En este caso el vehículo permanecía en reposo aunque con las ruedas no bloqueadas, siendo el agua la que se movía. La simulación fue de 4 segundos reales y se utilizó un modelo de turbulencia  $\kappa - \epsilon$ . Tales resultados fueron validados a partir de ensayos con un vehículo a escala real, obteniéndose buenas correlaciones entre los resultados experimentales y numéricos. En ambos casos se encontraba presencia de agua en el filtro de aire.

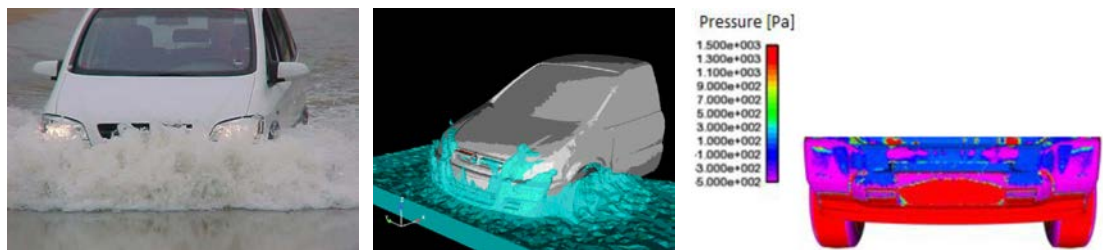


Figura V-1. Algunos de los resultados obtenidos por Buscariolo (2014)

El trabajo no pretende analizar la estabilidad propiamente y se centra más en aspectos de funcionamiento del vehículo para garantizar que cuando estén en circulación no se produzcan problemas mecánicos que imposibiliten continuar circulando. Se trata del único trabajo encontrado en el que se asume que el coche está en movimiento y el hecho de realizar la validación del modelo numérico con ensayos experimentales aporta gran valor a los resultados. Por otro lado, se ofrecen pocos detalles del desarrollo del modelo, ni tan solo el código utilizado, que limitan poder llevar a cabo comparaciones y profundizar en la evaluación de los resultados presentados.

Más recientemente Arrighi *et al.* (2015a; 2015b) simularon, mediante el código 3D OpenFOAM, abierto y de libre distribución, un vehículo estático y parcialmente inundado para estudiar su inicio de movimiento. Mediante simulación tridimensional se pretendía evaluar la contribución de las fuerzas de ascensión y de flotación en la inestabilidad de vehículos expuestos a una inundación. Los autores desarrollaron el parámetro de movilidad  $\theta_V$ , dependiente del número de Froude y con el que se definían las condiciones de estabilidad de un vehículo (Figura V-2):

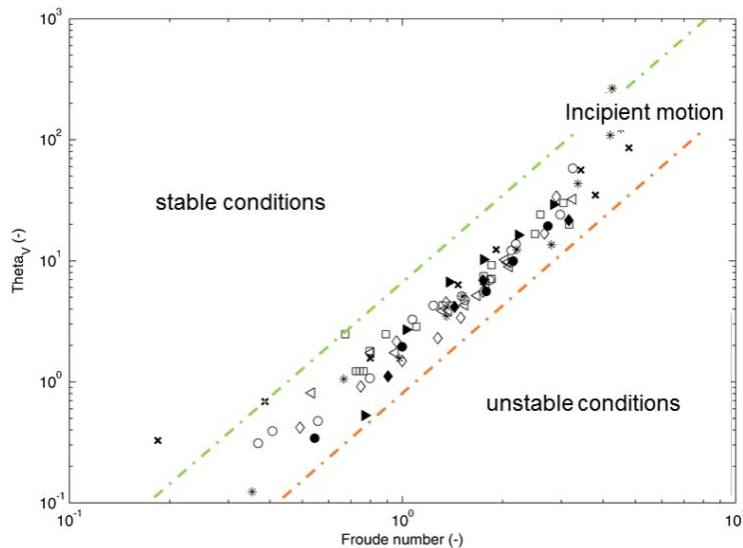
$$\theta_V = \frac{2l_c}{h_c - GC} \cdot \left( \frac{\rho_c(h_c - GC)}{\rho_w(y - GC)} - 1 \right) \quad [\text{V-1}]$$

siendo  $y$  el calado de agua,  $l_c$ ,  $h_c$ ,  $GC$ ,  $\rho_c$  la longitud, la altura, la altura libre y la densidad del coche respectivamente y  $\rho_w$  la densidad del agua. Esta propuesta se validó con los resultados de



Xia *et al.* (2011) y de Shu *et al.* (2011), considerando un total de seis vehículos diferentes y dos escales distintas.

El modelo desarrollado presentaba malla estática y se utilizó el método VOF para resolver la superficie libre del fluido. El vehículo considerado fue el modelo Ford Focus, uno de los ensayados por Shu *et al.* (2011), el cual se simuló tanto a escala 1:18 como a escala de prototipo (1:1). El tamaño de celda utilizado fue de 3 cm en las proximidades del vehículo y hasta 25 cm en las zonas más alejadas del coche en el dominio (Figura V-3).



**Figura V-2.** Parámetro de movilidad  $\theta_V$  frente número de Froude aplicado a los resultados de Xia *et al.* (2011) y de Shu *et al.* (2011). (Arrighi *et al.*, 2015)

Los autores consideraron en la modelación del vehículo seis grados de libertad, de manera que el coche podía moverse libremente cuando las fuerzas que ejerce el fluido superasen la estabilidad del vehículo. Se afirmó que no existían efectos de escala al no encontrarse diferencia en los coeficientes de arrastre y de ascensión para el modelo pequeño (1:18) y para el de escala real (1:1), con lo que la idoneidad de la semejanza de Froude quedaba demostrada. Los coeficientes de arrastre variaban de 0.1 hasta 0.9 y decrecían de manera exponencial con el número de Froude. El coeficiente de ascensión variaba en un rango mucho mayor, desde 0.009 para calados inferiores a la altura libre del coche hasta 23 para números de Froude bajos.

El inicio de movimiento se producía tras la rotación inicial del vehículo en el plano horizontal debido a que la parte trasera del vehículo era la más ligera. Por último, los autores concluyeron que el coeficiente de rozamiento jugaba un papel crucial en este fenómeno y que no podía ser asumido como un valor constante, puesto que la fuerza vertical es función de la fuerza de flotación y de ascensión, las cuales cambian cuando lo hacen las condiciones del flujo. Parece discutible ésta última conclusión puesto que lo que realmente varía es la fuerza de rozamiento, siendo el coeficiente de rozamiento meramente el resultado del contacto de dos materiales con sus respectivas propiedades, que en todo caso pudiera variar en función de la cantidad de agua en el lugar. Algún aspecto que podría discutirse sobre este trabajo es la falta de información sobre el estudio de sensibilidades, como el tamaño de malla escogido y el modelo de turbulencia

considerado. La elección de ambos podría llevar a la obtención de fuerzas aplicadas muy diferentes y por tanto a coeficientes de arrastre o ascensión también muy distintos. Si tal estudio se ha realizado, en ninguno de sus trabajos encontrados queda descrito.

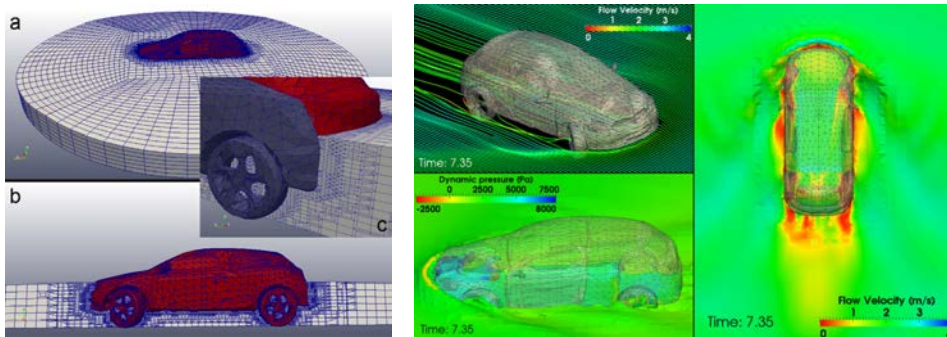


Figura V-3. Mallado (izquierda) y resultados obtenidos (derecha) por Arrigui *et al.* (2015)

Por último, el estudio más actual encontrado sobre arrastre de vehículos mediante simulaciones tridimensionales es el que Albano *et al.* (2016) llevaron a cabo para determinar la influencia de obstáculos, como son los vehículos, cuando se produce una inundación en áreas urbanas. Para dicho estudio utilizaron un modelo SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics), desarrollado por Amicarelli *et al.* (2015), con el que realizaron simulaciones numéricas de la rotura de una presa y la respuesta de varias configuraciones de vehículos y edificios.

Los autores llevaron a cabo ensayos experimentales en un canal de laboratorio con los que, mediante técnicas de análisis de imágenes, determinaban los desplazamientos de los vehículos en laboratorio. La validación de los resultados numéricos se realizó comprobando la similitud de los desplazamientos de los vehículos, en el numérico y en el experimental. Los coches fueron representados (tanto experimental como numéricamente) como paralelepípedos con dimensiones de 0.118 x 0.045 x 0.043 m, masas de 25 gramos y una densidad, por tanto, de 111 kg/m<sup>3</sup>. La forma de los vehículos era muy simplificada y la densidad considerada inferior a las más comunes para vehículos prototipo. El modelo respondía de forma apropiada, reproduciendo con bastante exactitud las trayectorias seguidas por los modelos físicos en laboratorio.

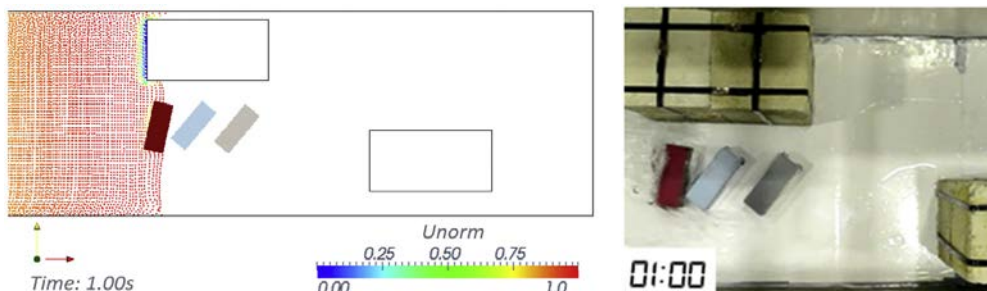


Figura V-4. Comparativa, para un mismo instante de tiempo, de los resultados numéricos (izquierda) y experimentales (derecha)

Se trataba de un modelo simplificado, en el que no se consideró ningún modelo de turbulencia ni tensiones tangenciales, de forma que los autores concluyeron que el estudio debía ser realizado

en un futuro para flujos sin considerar tales simplificaciones. Los autores concluyeron también que el campo de presiones y el impacto de las fuerzas en obstáculos deben ser más estudiados y mejorarse. Otros aspectos que deben analizarse son situaciones más realistas como simulaciones con redes de calles reales y ensayos en un canal con curva e inclinaciones. En definitiva, los autores afirman y concluyen que dicho trabajo no pretende ofrecer una técnica directamente aplicable a la realidad, sino presentar resultados que ayuden a reducir la vulnerabilidad en zonas urbanas durante fases de emergencias por inundación.

Se han descrito brevemente los escasos estudios encontrados sobre vehículos expuestos a inundaciones, que utilizan, como herramienta principal de análisis, códigos tridimensionales. Se trata de estudios, como se ha podido observar, muy recientes que pretenden incorporar los avances tecnológicos, como es la simulación tridimensional, en campos en los que hasta el momento no se han utilizado ampliamente. Por tanto, la estabilidad de vehículos al verse expuestos a inundaciones es un campo sobre el que se puede y se debe profundizar utilizando herramientas computacionales que hoy en día tenemos a nuestro alcance.

### V.2.2. Aplicaciones numéricas tridimensionales a la estabilidad de personas

Aunque la estabilidad de personas es un tema de investigación ampliamente tratado en la bibliografía, en lo que se refiere a análisis numéricos mediante simulaciones tridimensionales únicamente se ha encontrado el trabajo de Arrighi *et al.* (2016). El objetivo principal de su trabajo fue la determinación de un criterio adimensional para evaluar la estabilidad de las personas, considerando no solo las características hidráulicas sino también las físicas de las personas. Los autores realizan un estudio por separado, sobre las inestabilidades debidas a vuelco y las debidas a deslizamiento. Para ambos casos llevaron a cabo un análisis de fuerzas y momentos, asumiendo que el cuerpo de una persona era un prisma, cuyo volumen quedaba definido por la altura de la persona, el diámetro de su cintura y la longitud del pie. Aunque definen la densidad media del cuerpo humano con un valor de  $1,062 \text{ kg/m}^3$ , por simplificación del problema, la hacen coincidir con la del agua ( $1,000 \text{ kg/m}^3$ ). Esta consideración hace que no se considere fuerza de flotación.

Los autores definieron como punto de giro, para inestabilidades por vuelco, la punta del pie, considerando que el flujo incidía por detrás de la persona. El brazo de palanca considerado fue de la longitud del pie en lugar de la mitad de éste, puesto que los autores asumieron que un mayor brazo de palanca consideraba la maniobrabilidad de las personas para ajustar la posición del cuerpo intentando evitar la inestabilidad.

El parámetro de movilidad ( $\theta_p$ ) para inestabilidad por deslizamiento, determinado a partir del balance de fuerzas, es el siguiente:

$$\theta_p = \frac{\frac{v^2}{g y} \cdot \left( C_l + \frac{C_d}{\mu} \right)}{F_r^2 C_s} = \frac{2d}{H} \cdot \frac{H - y}{y}$$

$$\theta_p = \frac{2d}{H} \cdot \frac{H - y}{y} \quad [\text{V-2}]$$

siendo  $v$  la velocidad del agua,  $y$  el calado,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $C_l$  el coeficiente de ascensión,  $C_d$  el coeficiente de arrastre,  $\mu$  el coeficiente de rozamiento,  $d$  la longitud del pie de la persona.  $C_s$  es definido como el coeficiente para inestabilidad por deslizamiento que agrupa los coeficientes  $C_l$ ,  $C_d$  y  $\mu$ .

El parámetro de movilidad ( $\theta_{P_t}$ ) para inestabilidad por vuelco, determinado a partir del balance de momentos, es el siguiente:

$$\frac{\frac{v^2}{gy} \cdot \left( \frac{y}{2d} \cdot C_d + C_l \right)}{F_r^2} = \frac{2d}{H} \cdot \frac{H-y}{y}$$

$$\theta_{P_t} = \frac{2d}{H} \cdot \frac{H-y}{y} \quad \text{[V-3]}$$

siendo  $C_t$  el coeficiente para inestabilidad por vuelco que agrupa los coeficientes  $C_l$  y  $C_d$ , así como el brazo de palanca ( $d$ ) y el calado ( $y$ ).

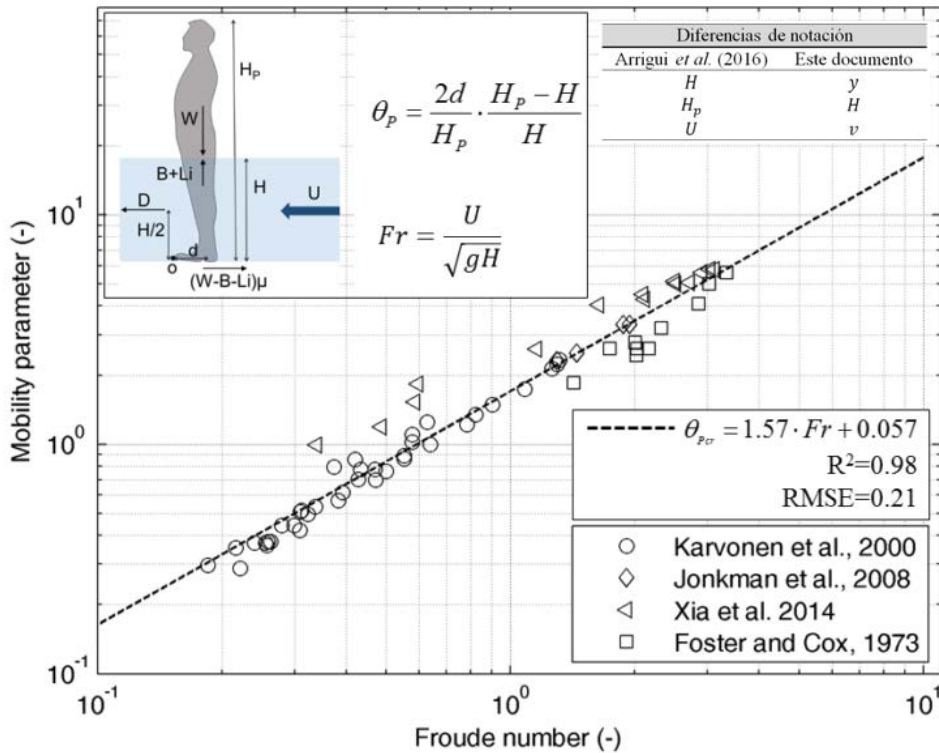
Este desarrollo llevó a que ambos parámetros ( $\theta_P$  y  $\theta_{P_t}$ ) eran iguales. Los autores afirman que conociendo simplemente la altura de la persona ( $H$ ) y la longitud del pie ( $d$ ) se pueden determinar los umbrales de estabilidad para condiciones tanto de inestabilidad por deslizamiento como de vuelco.

Se consideraron los resultados experimentales de diversos autores (Foster *et al.*, 1973; Karvonen *et al.*, 2000; Jonkman *et al.*, 2008; Xia *et al.*, 2014) llevados a cabo con personas, para comparar con los umbrales definidos, tanto para deslizamiento como para vuelco. La longitud del pie se calculó como fracción de la altura de la persona según dictaban estudios altimétricos. La altura de los sujetos sí estaba disponible para todos los estudios experimentales.

Representando, por tanto, el parámetro de movilidad ( $\theta_P$ ) frente al número de Froude para todos los resultados experimentales se define un diagrama adimensional con el umbral crítico de inestabilidad ( $\theta_{P_{cr}}$ ) para personas según se muestra en la Figura V-5 y aproximándose a la siguiente expresión:

$$\theta_{P_{cr}} = 1.57 \cdot Fr + 0.057 \quad \text{[V-4]}$$

Las simulaciones numéricas llevadas a cabo pretendían evaluar las fuerzas de arrastre y ascensión para las diferentes condiciones de flujo, así como los mecanismos de movimiento. Para dichas simulaciones se utilizó el programa CFD de análisis tridimensional, abierto y de libre distribución, OpenFOAM. No se utilizó ningún modelo de turbulencia, afirmando los autores que la determinación de fuerzas se llevaría a cabo adecuadamente incluso sin su consideración y que, además, no se disponía de datos para poder llevar a cabo la calibración de los coeficientes de los modelos de turbulencia.



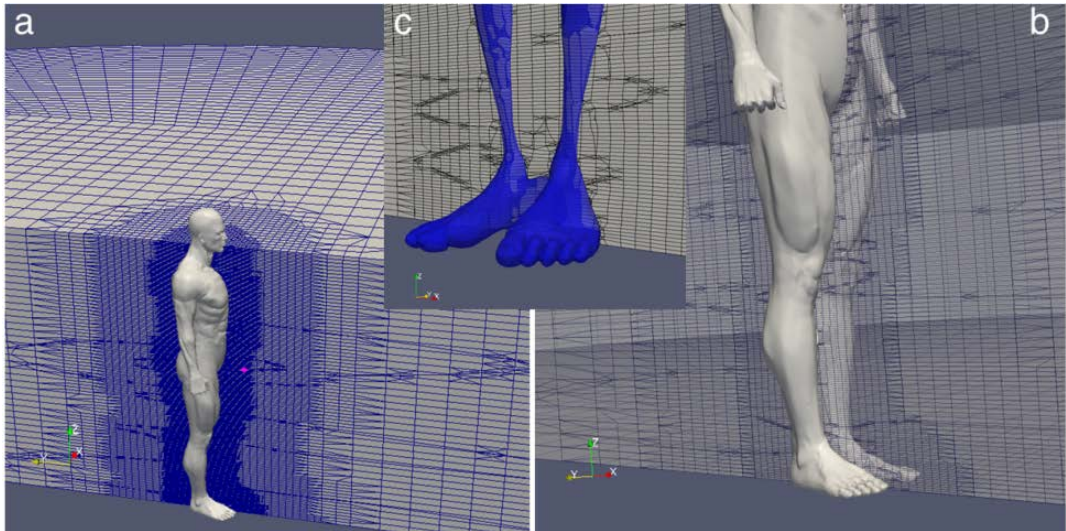
**Figura V-5.** Parámetro de movilidad adimensional frente a número de Froude para las inestabilidades de todos los estudios experimentales considerados. Arrighi *et al.* (2016)

Se simularon tres sujetos de los ensayos por Karvonen *et al.* (2000), los ensayos por Jonkman *et al.* (2008) y una selección de los modelos a escala real utilizados por Xia *et al.* (2014). Se utilizó una silueta de una persona tridimensional con formato stl (STereo Lithography interface), que fue escalada según las características físicas de cada sujeto ensayado. Se consideraron  $4.5 \cdot 10^5$  celdas de 0.015 m en las proximidades del cuerpo, y de hasta 0.25 en las zonas más alejadas del dominio de cálculo (Figura V-6).

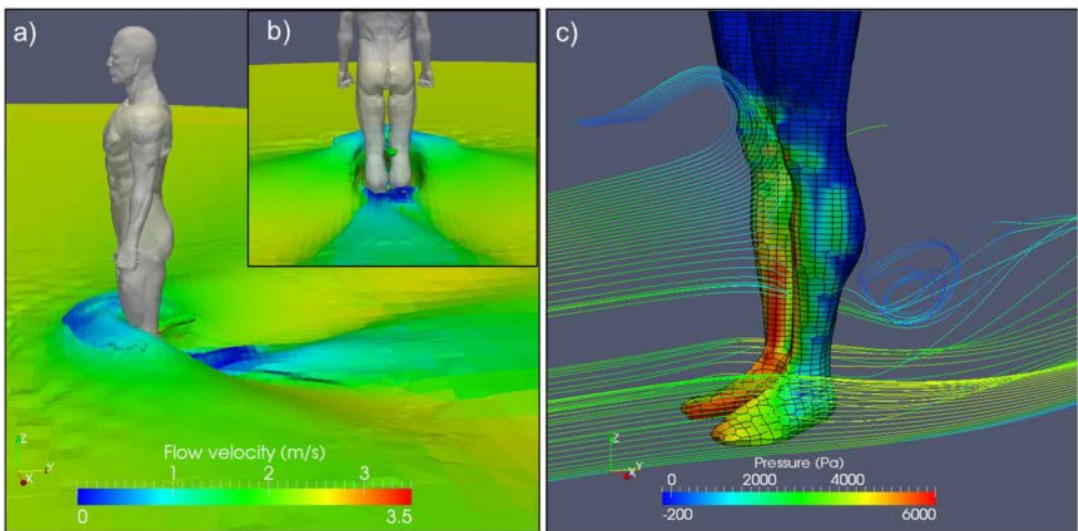
Los autores determinaron el momento normalizado [V-9], definido como la ratio del momento producido por la fuerza de arrastre ( $F_d$ ) y el momento estabilizador (fuerza gravitacional ( $F_g$ ) menos fuerzas de ascensión ( $F_L$ ) y de flotación ( $F_b$ )), para las situaciones de inestabilidad simuladas.

$$M_{norm} = \frac{F_d \cdot y}{2(F_g - F_b - F_L) \cdot d} \quad [V-5]$$

La representación de los resultados del momento normalizado frente al número de Froude de cada situación de inestabilidad definió dos zonas con tendencias bien diferenciadas, para números de Froude menores de 1.5 y para valores mayores (Figura V-8). Para valores de número de Froude menores de 1.5 se producen inestabilidades debidas al vuelco y para valores superiores se producen inestabilidades por deslizamiento (Figura V-8).



**Figura V-6.** Malla computacional alrededor de la silueta del cuerpo humano. Arrighi *et al.* (2016)



**Figura V-7.** Algunos resultados de la simulación llevada a cabo para uno de los sujetos ensayados por Jonkman *et al.* (2008), con un calado de 0.35 m y una velocidad de 2.40 m/s. Arrighi *et al.* (2016)

Con esta distinción, se calcularon los productos ( $C_s \cdot Fr^2$ ), para números de Froude inferiores a 1.5 y ( $C_t \cdot Fr^2$ ), para números de Froude superiores a 1.5, según si la inestabilidad es por vuelco o deslizamiento respectivamente. Tales productos se calculaban a partir de los coeficientes de las fuerzas obtenidas mediante simulaciones numéricas, que según los desarrollos de las ecuaciones [V-2] y [V-3] deberían corresponder al parámetro de movilidad. Para verificarlo, se realizó el gráfico de la Figura V-9 comparando así los resultados numéricos con los experimentales en relación a los parámetros de movilidad.

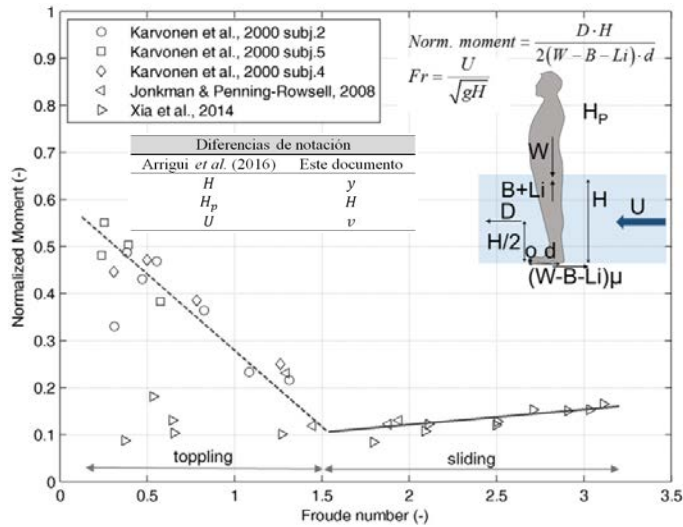


Figura V-8. Momento normalizado frente al número de Froude para las inestabilidades de los ensayos experimentales considerados. Arrighi *et al.* (2016)

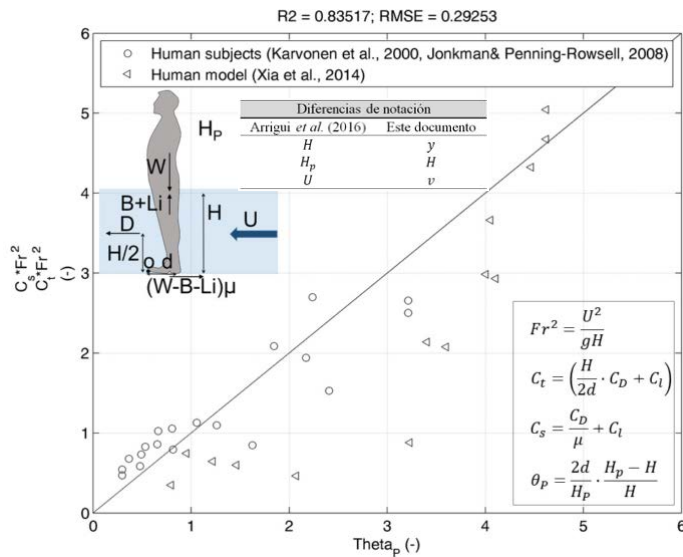


Figura V-9. Comparativa de los parámetros de movilidad frente a los productos  $(C_s \cdot Fr^2)$  ó  $(C_t \cdot Fr^2)$ , determinados a partir de resultados numéricos, según si la inestabilidad es por vuelco o deslizamiento respectivamente. Arrighi *et al.* (2016)

Los autores afirmaron que la comparativa era suficientemente satisfactoria con un valor de  $R^2=0.76$  y  $RMSE=0.63$ . Sin embargo, la no consideración de los puntos de inestabilidad obtenidos por Xia *et al.* (2014), que fueron determinados para un modelo de persona y no para personas reales, mejoraba la correlación con valores de  $R^2=0.84$  y  $RMSE=0.29$ . Esto se debe a que en la definición del coeficiente de movilidad se consideró un exceso de brazo de palanca (la longitud completa del pie), contemplando así la habilidad de las personas para adecuar su posición y evitar así la inestabilidad.

### V.2.3. Software dedicado a la simulación tridimensional en CFD

Flow-3D es el software utilizado como herramienta de análisis en este capítulo y es del tipo denominado CFD (Computational Fluid Dynamics) para estudios tridimensionales. Fue desarrollado por la empresa Flow Science Ltd, y se emplea para numerosas aplicaciones al incorporar un entorno “multiphysics”, destacando especialmente su buen comportamiento para la simulación de fluidos en lámina libre.

Sin embargo, existe gran variedad de software dedicado a la simulación tridimensional en CFD, algunos comerciales y otros libres. A continuación, se mencionan las principales características de los más conocidos y utilizados:

#### Comerciales:

- **Phoenics** fue uno de los primeros códigos CFD en aparecer. Desarrollado por el Profesor Spalding y su equipo del CHAM (Compañía Inglesa de desarrollo de CFD fundada en el 1970). Phoenics es un código desarrollado en Fortran que se compone de diversas librerías que permiten al usuario adaptar el código a sus necesidades. Funciona con una malla estructurada y un algoritmo principal para resolver las ecuaciones, todo ello incorporado en una interfaz 3D que facilita el manejo del programa. Phoenics dispone de múltiples modelos de turbulencia y varias opciones como el MFM (Multi Fluid Model) que hacen que este código sea de especial interés en el campo de la ingeniería química y la aeronáutica.

<http://www.aertia.com/productos.asp?pid=159>

- **ANSYS Fluent** es un código de volúmenes finitos, cuya versión original se basa en una malla tridimensional estructurada no ortogonal, pero la versión actual ofrece la posibilidad de crear mallas tridimensionales no estructuradas. En comparación con los otros códigos Fluent es el código más generalista, basado en los principios de la mecánica de fluidos que ofrece la posibilidad de adaptar las opciones del programa para todo tipo de estudios. Fluent incluye modelos para flujos de una sola fase o multifase, con transferencia de calor y reacciones químicas para fluidos compresibles e incompresibles.

<http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+Fluent>

- **STAR-CD** es una propuesta de código comercial 3D generalista desarrollada por la compañía CD-adapco. Utiliza un algoritmo de volúmenes finitos con una malla no estructurada para resolver las ecuaciones de conservación. Puede usarse tanto con mallas estructuradas como no estructuradas, con combinación de celdas tetraédricas y hexaédricas. Acepta mallas no ortogonales y mixtas, y el aspecto peculiar de este programa es que permite la deformación de la malla con un algoritmo muy robusto.

<http://www.cd-adapco.com/products/star-cd>

- **Flow-3D** es un código de volúmenes finitos desarrollado por Flow Science Inc. El programa utiliza una malla tridimensional ortogonal. Existen muchas posibilidades y opciones de modificación de las celdas y grupos de celdas. El programa ofrece un módulo



de estudio multifase muy avanzado, particularmente para el cálculo de flujos variables con superficie libre. Cabe destacar los algoritmos FAVOR y VOF que se detallarán más adelante.

<http://www.flow3d.com/flow3d/flow3d-overview.html>

- **Delft3D** desarrollado por Deltares Systems, Delft3D es un código con aplicaciones en la hidrodinámica, transporte de sedimentos y estudios ambientales de ríos, estuarios y costas; es usado ampliamente en el estudio del transporte de sedimentos y análisis hidrodinámicos. El módulo FLOW es el núcleo de Delft3D y es un programa de simulación hidrodinámica multi-dimensional (2D y 3D) que calcula el flujo transitorio y fenómenos de transporte en una malla curvilínea. En simulaciones 3D el código incorpora los módulos de advección y difusión.

<http://www.deltaressystems.com/hydro/product/621497/delft3d-suite>

#### Libres:

- **Telemac** es un código de cálculo gratuito, desde hace poco tiempo, empleado en el campo del estudio de flujo en lámina libre. Desarrollado inicialmente por EDF (Electricité de France) y posteriormente por un consorcio de numerosas empresas: Artelia, BundesAnstalt für Wasserbau, CETMEF, Daresbury Laboratory, Electricité de France R&D y HR Wallingford, es uno de los códigos libres con una mayor aceptación del sector científico tanto por su robustez como por su excelente formulación matemática. Telemac Mascaret usa un modelo basado en elementos finitos. El dominio está discretizado por una malla triangular no estructurada, que puede ser refinada en áreas de especial interés. El programa está construido en diferentes módulos que facilitan la adaptación del código al caso de estudio. Dentro de los códigos libres es el de mayor aceptación, el que presenta mayores campos de aplicación y un mayor rigor físico.

<http://www.opentelemac.org/index.php/presentation?id=18>

- **OpenFOAM** (Open Field Operation and Manipulation) CFD es un programa gratuito desarrollado por OpenCFD Ltd. OpenFOAM dispone de múltiples aplicaciones para resolver flujos complejos, relacionadas con reacciones químicas, turbulencia y transferencia de calor, dinámica de sólidos y electromagnetismo. Incluye herramientas para mallado en caso de geometrías complejas CAD, y para pre-proceso y post-proceso. Casi todo (incluyendo mallado y pre y post-proceso) funciona en paralelo por defecto, ofreciendo ventajas a los usuarios sobre la capacidad del ordenador que usa. OpenFOAM ofrece completa libertad de personalización y extensión de sus funcionalidades, por los propios usuarios y mediante soporte de OpenCFD. Presenta un código modular compilando en diferentes librerías cada funcionalidad (métodos numéricos, mallado, modelos físicos...). OpenFOAM incluye unas 80 aplicaciones que simulan y resuelven problemas específicos de ingeniería y unas 170 aplicaciones para realizar tareas en el pre y post-proceso (mallado, visualización de resultados, etc)

<http://www.openfoam.com/>

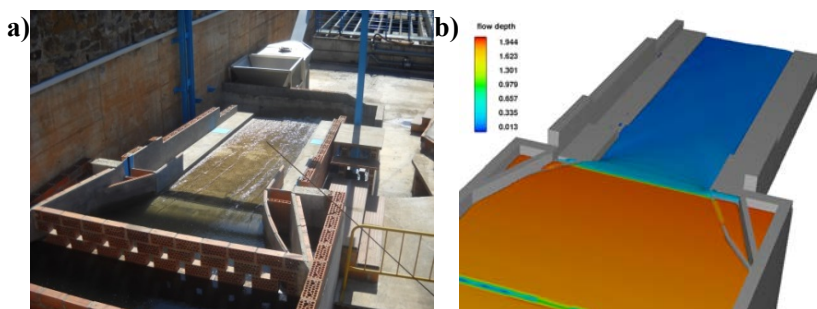
- **SSIIM** es un programa desarrollado por la Norwegian University of Science and Technology. SSIIM es el acronimo de Sediment Simulation In Intakes with Multiblock option. El programa está diseñado para la docencia e investigación relacionada con la ingeniería hidráulica, de ríos y sedimentos. Resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes utilizando el método del volumen de control con el algoritmo SIMPLE y el modelo de turbulencia  $k - \varepsilon$ . También resuelve la ecuación de convección-difusión para transporte de sedimentos, mediante la formulación de Van Rijn para la condición de fondo. También se incluye un módulo de calidad del agua. El programa no está creado para ambiente marino, y no puede reproducir los efectos de la estratificación debidos a los gradientes de salinidad. El post-proceso incluye gráfico de vectores, impresiones de contorno, perfiles, etc, que pueden ejecutarse de forma simultánea con el solver, permitiendo visualizar resultados durante el cálculo. Existen dos versiones del programa: SSIIM 1 utiliza una malla estructurada y SSIIM 2 utiliza una malla no estructurada. SSIIM 1 es más fácil de utilizar y la malla es sencilla. Se recomienda empezar utilizando esta primera versión. Si se requiere modelar el mojado/secado se requiere el uso de la segunda versión.

<http://folk.ntnu.no/nilsol/ssim/>

El sitio web [www.cfd-en linea.com](http://www.cfd-en linea.com) recoge gran cantidad de recursos relacionados con la simulación 3D, incluyendo además un completo foro para que usuarios de todo el mundo hagan sus aportes, consultas y expongan situaciones y problemas con los que se han enfrentado en su experiencia como usuarios de códigos CFD. Se trata de una fuente de información imprescindible para usuarios CFD y entre la cual se recoge un completo y detallado estado del conocimiento de los diferentes códigos 3D, libres y comerciales (<http://www.cfd-en linea.com/Wiki/Codes>), que se desarrollan en todo el mundo.

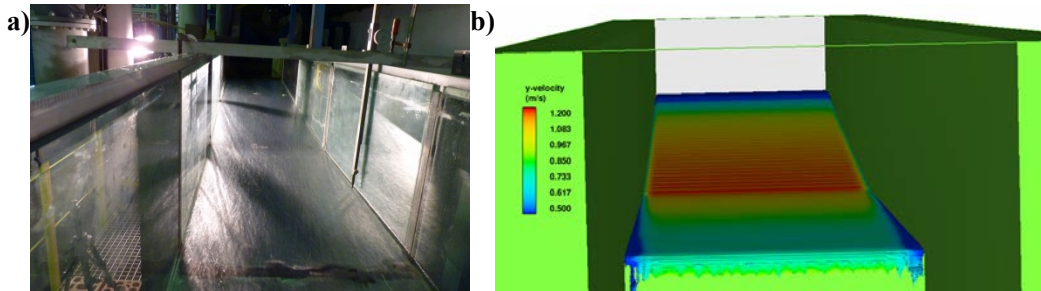
### V.3. Simulaciones numéricas propuestas

Los modelos numéricos desarrollados, como se comentó en el apartado introductorio, pretenden complementar los estudios experimentales llevados a cabo para el análisis de la estabilidad de personas (Capítulo III) y de vehículos (Capítulo IV). El hecho de tratarse de modelos numéricos basados en modelos físicos experimentales permite la calibración de los mismos y ofrece la garantía por tanto de presentar resultados fiables. El procedimiento llevado a cabo se describe en detalle en los apartados sucesivos.



**Figura V-10.** Modelo físico de la plataforma de ensayos de estabilidad para personas (a) y modelo numérico (b)

Para el primero de los desarrollos, correspondiente al análisis de la estabilidad de personas, se ha modelado la plataforma (Figura V-10) que fue construida para realizar los ensayos de estabilidad. Para el segundo, correspondiente al análisis de la estabilidad de los vehículos, se ha desarrollado el modelo físico de pendiente local (Figura V-11) situado en el canal del laboratorio.



**Figura V-11.** Modelo físico de pendiente local (a) y modelo numérico (b) para el análisis de la estabilidad de vehículos

El primero de los modelos, para el análisis de la estabilidad de personas, ofrecerá detalles del comportamiento del flujo en una típica calle de ciudad, en la que se encuentran pendientes longitudinales, pero también bombeo transversal. Computacionalmente se obtienen todas las variables hidráulicas que aportan mayor conocimiento del fenómeno. En este caso, el campo de velocidades del flujo por el que circula un peatón. También se pretende evaluar la fuerza de arrastre a la que se vería sometida una persona cuando cruza una corriente de agua y determinar si, con tal fuerza de arrastre, la persona podría ser desestabilizada. Para ello se parte de un contorno tridimensional de una persona en posición de caminar, que situándola en el flujo de agua nos permita evaluar la fuerza de arrastre que actúa sobre los tobillos de ésta. En el apartado correspondiente de este capítulo se detalla el proceso de elaboración del modelo y la incorporación de la figura de una persona.

El segundo de los modelos, para el análisis de la estabilidad de vehículos, puede presentar si cabe mayor información que el anterior. El hecho de realizar un modelo numérico calibrado con los resultados obtenidos experimentalmente, permite en este caso la modelación de cualquier vehículo y determinar su punto de inestabilidad ante inundaciones. En este caso, al tratarse de objetos sólidos rígidos, no entran en juego aspectos como la maniobrabilidad de las personas que introducen impredecibilidad en los resultados y, por tanto, permite la modelación numérica considerando el movimiento de éste. Se pueden obtener, además, las fuerzas actuantes sobre el vehículo, tanto la de arrastre como la de empuje vertical, de manera que el fenómeno puede ser comprendido con mayor detalle.

Tras la descripción del funcionamiento del programa utilizado para desarrollar estos modelos se presenta el procedimiento de elaboración de cada uno de éstos y, finalmente, se muestran los resultados y conclusiones obtenidos de cada modelo. En los últimos apartados de este capítulo se describen con detalle estos modelos: elaboración, calibración y resultados obtenidos.

## V.4. Descripción del funcionamiento de Flow-3D

En este apartado se describe el programa Flow-3D, código comercial utilizado para la simulación de los modelos descritos anteriormente. Se describen las ecuaciones de gobierno del problema hidrodinámico, así como su implementación en el programa. Se presenta también la forma de interpretar la disipación de energía, la interpretación de los sólidos y las interfases entre fluidos aire y agua (superficie libre en el presente estudio), así como la forma de discretización espacial (mallado) que permite el software e incidiendo con un poco más de detalle en cómo el programa resuelve el movimiento de objetos en el fluido. Con este apartado se pretende ofrecer una visión general de las capacidades utilizadas del programa, mezclando los conceptos teóricos con las propuestas de resolución numéricas de Flow-3D, sin intención de ofrecer un manual de éste sino la forma de proceder general al desarrollar un modelo mediante este software. Estas indicaciones son básicas para comprender cómo se han realizado ambos modelos, cuya elaboración será descrita en el apartado posterior.

### V.4.1. Ecuaciones de Navier-Stokes, Reynolds y concepto de turbulencia

Las ecuaciones de Navier-Stokes son una versión simplificada del balance de la cantidad de movimiento, expresada únicamente en función del campo de velocidades  $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$  y de presión  $p(\mathbf{x}, t)$ . En base a estas simplificaciones, es posible reducir el problema a un sistema de siete EDP's con siete incógnitas.

Si además se considera el caso particular de fluido barotrópico ( $\rho = \rho(p)$ ) puede desacoplarse la parte mecánica de la parte térmica en las ecuaciones, resultando el problema mecánico en las ecuaciones [V-6] y [V-7].

$$\text{Continuidad} \qquad \qquad \qquad \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \qquad \qquad \qquad \text{[V-6]}$$

$$\text{Balance de la cantidad de movimiento (Navier-Stokes)} \qquad -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{v} + \rho \mathbf{b} = \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} \qquad \qquad \qquad \text{[V-7]}$$

En este problema mecánico, además, se supone fluido newtoniano incompresible, asumiendo:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{dp}{dt} = 0 \\ \frac{dp}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \rho = \rho_0 \\ \nabla \cdot \mathbf{v} = Tr(\mathbf{d}) = 0 \end{array} \right. \text{Siendo } Tr(\mathbf{d}) \text{ la traza del tensor de velocidad de deformación.}$$

Dónde los términos de las expresiones [V-6] y [V-7] se pueden interpretar de la siguiente manera:

- $\nabla \cdot \mathbf{v}$ : Divergencia de la velocidad. Indica o mide la dilatación. Una divergencia positiva indicaría una ampliación del volumen y negativa una compresión. En este caso al ser nula indica incompresibilidad.
- $\nabla p$ : Fuerzas debidas al gradiente de presiones
- $\mu \Delta \mathbf{v}$ : Fuerzas viscosas

- $\rho b$ : Fuerzas másicas. Si no se considera el efecto de la fuerza de Coriolis se traduce en que  $b$  es la aceleración de la gravedad o peso al multiplicarse por  $\rho$ .
- $\rho \frac{dv}{dt}$ : Fuerzas de inercia. La aceleración  $\frac{dv}{dt}$  está expresada como derivada material de la velocidad, pudiendo expresarse también mediante el término local y el convectivo.

Las ecuaciones indicadas hasta el momento están expresadas de forma compacta, donde los operadores o variables marcados en negrita indican que son vectores y que actúan en las tres direcciones del espacio.

El problema mecánico presentado, por tanto, responde a un sistema de 4 ecuaciones (continuidad (1) y Navier-Stokes (3)) con 4 incógnitas ( $v(x, t)$  y  $p(x, t)$ ) que debe ser resuelto.

Flow-3D define las 4 ecuaciones, de manera no compacta, de la siguiente manera:

$$(1) \frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) + \xi \frac{uA_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad [V-8]$$

$$(2) \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{xV_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s)$$

$$(3) \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y uv}{xV_F} = -\frac{1}{\rho} \left( R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \quad [V-9]$$

$$(4) \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s)$$

Siendo (1) la ecuación de continuidad y (2), (3) y (4) las ecuaciones de Navier-Stokes. Además, en Flow-3D se añaden algunos componentes a las ecuaciones:

$A_i$ : Fracción de área de flujo en la dirección  $i$ .

$R$ : Coeficiente que se utiliza para cambio de coordenadas cartesianas a cilíndricas.

$\xi$ : Para coordenadas cartesianas tiene un valor de 0.

$R_{SOR}$ : Fuente de masa. Es posible añadir entradas de caudal, por ejemplo.

$V_F$ : Fracción de volumen de flujo.

$u_w, v_w, w_w; \delta u_s, \delta v_s, \delta w_s$ : Componentes de velocidades relativas relacionadas con la fuente de masa, que para este estudio no se tendrán en cuenta.

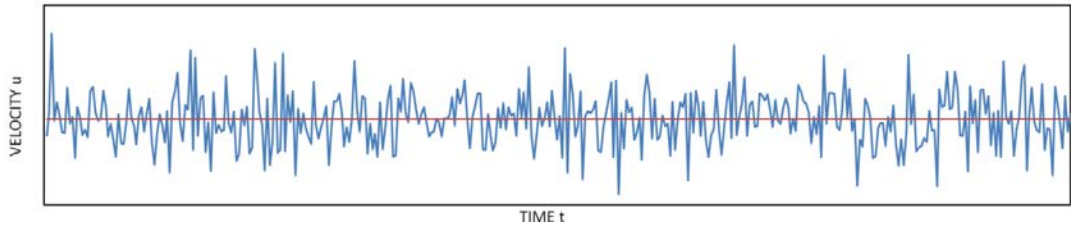
$G_i$ : Componente de la aceleración de la gravedad en dirección  $i$ . Correspondería a la componente de la fuerza másica  $b_i$  de la expresión [V-7].

$f_i$ : Componente de las fuerzas viscosas en la dirección  $i$ . Correspondería al término  $\mu \Delta v$  de la expresión [V-7].

$b_i$ : Término que sólo entra en juego cuando existen cuerpos porosos. Será 0 en los cálculos del presente estudio.

Las ecuaciones de Navier-Stokes junto con la ecuación de continuidad, son resolubles, puesto que es un sistema compatible determinado, pero el coste computacional sería tan grande que en muy pocos casos es posible determinar la solución (flujos laminares).

Los estudios de turbulencia realizados por Reynolds llevaron a las conclusiones que, en determinadas situaciones (flujo turbulento), las velocidades presentan ciertas fluctuaciones, como las que se muestran en la Figura V-12.



**Figura V-12.** Fluctuaciones de la velocidad debidas a la turbulencia

En este sentido, la malla de cálculo del programa debería ser tan pequeña, para asumir estas rápidas fluctuaciones, que el problema sería inabarcable. Las dificultades del tratamiento matemático del problema a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes imponen un enfoque singular para el flujo turbulento. La caracterización matemática del régimen turbulento se hace entonces a través de los modelos de turbulencia. En esencia, estos modelos se basan en aislar los valores medios de los campos de velocidades y presiones de sus fluctuaciones y en obtener ecuaciones de gobierno del problema en términos de aquellos.

$u = \bar{u} + u' \rightarrow$  Las velocidades puntuales se descomponen en velocidad media más la fluctuación.

Las ecuaciones de Reynolds responden a las expresiones de Navier-Stokes, pero utilizando estos valores medios y añadiendo un término de tensiones turbulentas o de Reynolds. Este concepto supone añadir más variables (7 incógnitas y 4 ecuaciones) al sistema de ecuaciones original, lo que lleva al llamado *problema de cierre* de las ecuaciones de Reynolds.

Por tanto, las ecuaciones de Navier-Stokes [V-7] dan lugar a las ecuaciones de Reynolds:

$$-\nabla \bar{p} + \mu \Delta \bar{v} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_R + \rho \mathbf{b} = \rho \frac{d\bar{v}}{dt}$$

Donde se ha añadido un nuevo término  $\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_R$  que corresponde al término de tensiones turbulentas o de Reynolds, y las velocidades y presiones se indican como valores medios. El tensor de Reynolds  $\boldsymbol{\tau}_R$  incorpora 6 nuevas incógnitas.

Boussinesq propone expresar las tensiones turbulentas con una expresión igual a la de las tensiones viscosas, introduciendo el concepto de “viscosidad turbulenta”  $\nu_T$ , esto es:

$$\boldsymbol{\tau}_R = \rho \nu_T \nabla \cdot \mathbf{v}$$

Donde  $\nu_T$  corresponde a la viscosidad turbulenta, quedando finalmente la siguiente expresión:

$$-\nabla \bar{p} + \mu \Delta \bar{v} + \rho \nu_T \Delta \bar{v} + \rho \mathbf{b} = \rho \frac{d\bar{v}}{dt} \quad \text{[V-10]}$$

De esta manera, los diferentes modelos de turbulencia que ofrece Flow-3D, y que se describen más adelante, tratan de determinar el valor de la viscosidad turbulenta  $\nu_T$ .

#### V.4.2. Resolución numérica

Flow-3D resuelve, mediante aproximaciones numéricas, las ecuaciones descritas en el apartado anterior a partir del método de los volúmenes finitos (diferencias finitas en las tres direcciones del espacio).

La mayoría de los términos de las ecuaciones de gobierno del problema son evaluados explícitamente. Sin embargo, existen otras opciones implícitas también, que pueden activarse en el programa. Esto hace que el esquema sea simple y robusto computacionalmente para la mayoría de casos, pero requiere una limitación de paso de tiempo para que el método sea estable y los resultados bien definidos. Se debe cumplir la condición de Courant (Technical Note 87, “Multidimensional Stability and Implicit Treatment of Advective Terms” publicada por el equipo técnico de Flow Science el año 2009) que manifiesta que una cantidad transportada no debería hacerlo en más allá del espacio de una celda en un solo paso de tiempo  $\Delta t$ , lo cual se traduce en un límite del tamaño del paso de tiempo.

$$\Delta t \leq CON \cdot \frac{\Delta x}{u} \quad \text{[V-11]}$$

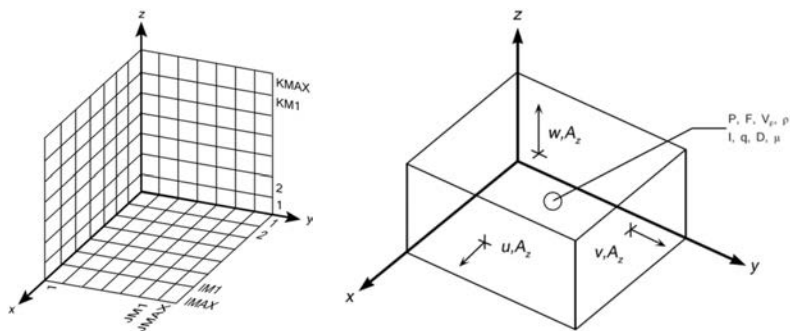
Siendo  $\Delta x$  el tamaño de la celda y  $u$  la velocidad del fluido. Además, en Flow-3D se añade un factor de seguridad  $CON$  para mejorar la estabilidad en problemas de dos y tres dimensiones y para anticipar posibles incrementos de velocidad, ya que el tamaño del paso de tiempo  $n+1$  se evalúa usando la velocidad del paso de tiempo previo  $n$ . Es posible que la ecuación [V-11] no garantice la estabilidad de la solución numérica de las ecuaciones de transporte. Puede ser insuficiente a pesar del factor de seguridad  $CON$  porque el flujo combinado en dos o tres dimensiones puede aún exceder el contenido de una celda, produciendo inestabilidades. El problema de inestabilidades puede ser aún más severo para celdas parcialmente llenas que pueden estar casi vacías. Para mayores velocidades, a un mismo tamaño de celda el paso de tiempo de cálculo debe disminuir para que el método sea estable y, por tanto, el tiempo global de cálculo puede aumentar en mayor o menor medida.

Cabe comentar que, como excepción al método explícito, las presiones y velocidades son calculadas implícitamente hacia adelante en el tiempo. Las primeras en las ecuaciones de momentum y las segundas en la ecuación de continuidad. Esta formulación semi-implícita de diferencias finitas permite una mejor y más eficiente solución para problemas con baja velocidad y flujo incompresible. La formulación semi-implícita, sin embargo, termina siendo conjuntos de ecuaciones acopladas que deben resolverse mediante técnicas iterativas. Para flujos con velocidades altas ( $F_r > 1$ ) los problemas de estabilidad se multiplican.

Flow-3D utiliza métodos numéricos de resolución de primer orden con respecto al incremento en el tiempo y en el espacio, aunque el usuario puede elegir la opción de método de segundo orden. En cualquier caso, las condiciones de contorno las trata siempre mediante métodos de diferencias finitas de primer orden.

La malla de diferencias finitas utilizada para la resolución de las ecuaciones de gobierno del problema consiste en celdas rectangulares de ancho  $\delta x_i$ , profundidad  $\delta y_i$  y altura  $\delta z_i$ . La región de malla activa tiene IFILAS de celdas en la dirección “x” etiquetadas con el índice “i”, JFILAS de celdas en la dirección “y” etiquetadas con el índice “j”, y KFILAS de celdas en la dirección “z” etiquetadas con el índice “k”. Esta región se envuelve por capas de celdas ficticias o de contorno utilizadas para introducir las condiciones de contorno de la malla. Es decir, normalmente hay (IFILAS+2)(JFILAS+2)(KFILAS+2) de celdas totales en el total de la malla. En el caso que se usen condiciones de contorno periódicas o de presión específica en una determinada dirección, se usa una capa adicional de celdas de contorno en esa dirección. En el preproceso se iniciarán automáticamente el número de celdas de contorno necesarias para satisfacer las condiciones de contorno. La Figura V-13 (a la izquierda) muestra el etiquetado de la nomenclatura comentada hasta ahora.

Las velocidades y presiones del fluido se localizan en puntos concretos de cada una de las celdas tal y como se representa en la Figura V-13 (a la derecha): las velocidades  $u$  y las fracciones de áreas  $A_x$  en los centros de las caras de las celdas normales a la dirección  $x$ , las velocidades  $v$  y las fracciones de áreas  $A_y$  en los centros de las caras de las celdas normales a la dirección  $x$  y las velocidades  $w$  y las fracciones de áreas  $A_z$  en los centros de las caras de las celdas normales a la dirección  $z$ . Las presiones ( $p$ ), fracciones de fluido ( $F$ ), fracción de volumen ( $V$ ), densidades ( $\rho$ ), energía interna ( $I$ ), cantidad turbulenta de energía ( $q$ ), disipación ( $D$ ), y viscosidad ( $\mu$ ) están en los centros de las celdas.



**Figura V-13.** Notación de mallado (izquierda) y localización de variables en una celda de malla (derecha) en Flow-3D

El procedimiento básico para avanzar en cada incremento de tiempo,  $\delta t$ , consiste en tres pasos:

1. Se utilizan aproximaciones explícitas de las ecuaciones de momentum [V-9] para la primera iteración con el nuevo paso de tiempo en velocidades, usando las condiciones iniciales o el valor en el paso de tiempo anterior, para todas las aceleraciones.
2. Para satisfacer la ecuación de continuidad [V-8], cuando se usa la opción de cálculo implícito, las presiones se ajustan de manera iterativa en cada celda y los cambios en la velocidad debido a cada cambio en la presión se añaden al cálculo del paso 1. La iteración es necesaria puesto que el cambio en la presión en cada celda altera el balance de las seis celdas adyacentes. En cálculos explícitos, una iteración en cada celda puede ser suficiente para satisfacer la ecuación de estado para problemas compresibles.



- Finalmente, cuando hay superficie libre o interfase entre fluidos se ejecuta el método VOF (descrito más adelante). En este paso se añaden también las cantidades turbulentas.

#### V.4.3. Métodos FAVOR y VOF. Definición de los sólidos y de las interfases entre fluidos

Al trabajar con malla de caras rectangulares o cuadradas existe el problema de definir elementos curvos, pues todo elemento definido está compuesto por cubos hexaédricos. Una de las posibilidades es definir una malla muy precisa y así suavizar el contorno, pero ello requiere un alto coste computacional y como alternativa el código utiliza el método FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation). El método determina la ratio de área y volumen de cada celda, representando las superficies como planos en cada una de ellas e integrando estas ratios en las ecuaciones de conservación.

A cada celda de objeto le asigna un valor entre cero y uno para definir el grado de porosidad del medio. El valor uno representa un material sin obstáculo (vacío) y el valor cero representa un material con obstáculo. En caso de valor entre cero y uno, el método FAVOR determina una línea recta (plano recto en 3D) en la celda para determinar el ángulo de frontera. Este método elimina el efecto de peldaño de escalera asociado típicamente a mallas rectangulares. Es obvio suponer que al mallar con mayor resolución encontraremos superficies más suaves, pero aumentará el coste computacional.

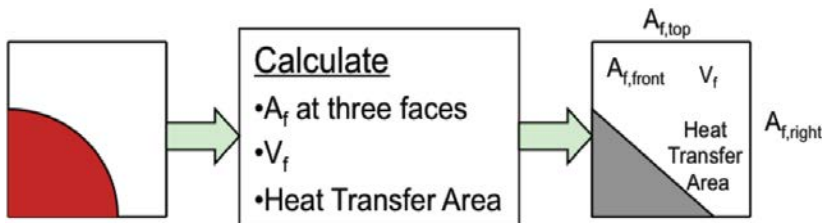


Figura V-14. Esquema método FAVOR

Las ventajas de este método son la generación de la malla de manera más rápida y la posibilidad de cambios en la geometría (obstáculos flexibles o móviles) sin necesidad de cambiar la malla.

Las configuraciones del fluido se definen en términos de una función de volumen de fluido (VOF),  $F(x, y, z, t)$ . Esta función representa el volumen del fluido número 1 (según se haya definido por el usuario en Flow-3D) por unidad de volumen y satisface la ecuación [V-12].

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (F A_x u) + R \frac{\partial}{\partial y} (F A_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (F A_z w) + \xi \frac{F A_x u}{x} \right] = F_{DIF} + F_{SOR} \quad [V-12]$$

Siendo,

$$F_{DIF} = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (v_F A_x \frac{\partial F}{\partial x}) + R \frac{\partial}{\partial x} (v_F A_y R \frac{\partial F}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (v_F A_z \frac{\partial F}{\partial z}) + \xi \frac{v_F A_x F}{x} \right\}$$

El coeficiente de difusión se define como  $\nu F = cF \mu / \rho$  donde  $cF$  es una constante cuya recíproca es algunas veces tratada como el número de turbulencia de Schmidt. Este término de difusión solo tiene sentido para la mezcla turbulenta de dos fluidos cuya distribución se define mediante la función F. El término  $F_{SOR}$  corresponde a la fuente de densidad  $R_{SOR}$  de las ecuaciones [V-8] y [V-9];  $F_{SOR}$  es la relación de tiempo de cambio de fracción de volumen del fluido número 1 asociado a la fuente de masa para el fluido número 1.

La interpretación de F depende del tipo de problema a resolver. Problemas incompresibles pueden tratar un único fluido con su correspondiente superficie libre o dos fluidos en contacto sin superficie libre. Para un único fluido (el caso que nos ocupa), F representa la fracción de volumen ocupada por éste, de tal manera que  $F=1$  indica existencia de fluido en la celda y  $F=0$  indica regiones vacías sin masa de fluido y que tienen una presión uniforme asignada. Físicamente estas regiones representan zonas llenas con vapor o gas cuya densidad es insignificante con respecto a la del fluido. Puesto que las variables se localizan dentro de los elementos de simulación, en el vacío ( $F=0$ ) no se resuelven las ecuaciones. Por ello es muy importante delimitar la superficie libre que separe el dominio de computación (flujo) de la zona de vacío. Para una correcta definición de la superficie libre es importante seguir tres pasos. El primero consta en localizar la superficie libre, el segundo en definir esa superficie libre como elemento frontera entre fluido y aire y el tercero en aplicar las condiciones de frontera a esa superficie. La resolución de la superficie libre se lleva a cabo mediante el método VOF (Volume Of Fluid) modificado, el cual funciona de manera muy parecida al método FAVOR. Este método VOF fue presentado por Hirt *et al.* (1981), e incorpora el concepto de fracción volumétrica. Por otro lado, para problemas de composición de dos fluidos, se pueden presentar situaciones en las que ambos sean incompresibles o que uno de ellos sea compresible. F representaría en este caso la fracción de volumen del fluido incompresible, que estaría relacionada con el fluido número 1. La región complementaria  $1-F$  representaría el fluido número 2 y podría tener una densidad constante o siendo ésta variable sería calculada a partir de la ecuación de estado para fluidos compresibles.

Una de las ventajas del método VOF es que permite definir una superficie libre cambiante con el tiempo y el espacio de manera sencilla y sin un alto coste computacional. Este hecho convierte al método VOF en uno de los métodos más usados.

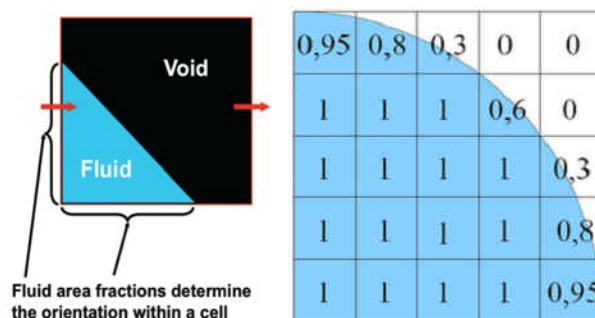


Figura V-15. Esquema método VOF

Flow-3D incorpora un algoritmo para reducir el efecto “misty cells” (celdas perdidas) que produce perturbaciones en el principio de continuidad y conservación de la masa. En la interfaz de simulación se pueden controlar los valores totales del algoritmo mediante el parámetro multi-block

Error. De la misma manera se puede corregir la visualización modificando el valor VOF a partir del cual asigna a la celda como celda llena.

Una de las ventajas del método VOF respecto a otros métodos para definir la superficie libre es que en el método VOF la malla se mantiene fija sin deformación. Eso facilita los algoritmos de simulación, obteniendo así mejor rendimiento en capacidad de CPU, y por tanto un menor tiempo de cálculo.

#### V.4.4. Disipación de energía

En los modelos tridimensionales la disipación de la energía se debe a dos conceptos: a la fricción con las paredes debida a la rugosidad superficial de los contornos y a la turbulencia, siempre hablando en el campo de la hidráulica donde el fluido de estudio habitualmente es el agua. Estos conceptos van asociados a las leyes de tensiones de corte o tangenciales que se producen en las paredes de las estructuras u objetos por los que circula el fluido y a las leyes de velocidades que se producen, perpendicularmente a las paredes de estos objetos.

El concepto de la teoría de la capa límite debe ser introducido para entender el significado de las tensiones de corte que se producen en el contacto fluido-estructura. La capa límite es una película fina, donde solo actúan tensiones viscosas y a partir del límite de la capa empiezan a actuar las tensiones turbulentas. El número de Reynolds, que relaciona las fuerzas inerciales frente a las viscosas, es un claro indicador de la importancia relativa de la turbulencia y por tanto indica también que, cuanto mayor sea su valor, más fina será la capa límite laminar.

En las ecuaciones de Reynolds [V-10] el término  $\mu\Delta\bar{v}$  es el término viscoso, asociado a las tensiones viscosas, y el término  $\rho\nu_T\Delta\bar{v}$  es el término turbulento, asociado a las tensiones turbulentas. Ambos términos suponen las tensiones totales que se producen entre fluido y pared. Para el término turbulento entrará en juego el modelo de turbulencia elegido en Flow 3D y que en definitiva estiman el valor de la tensión turbulenta  $\nu_T$ .

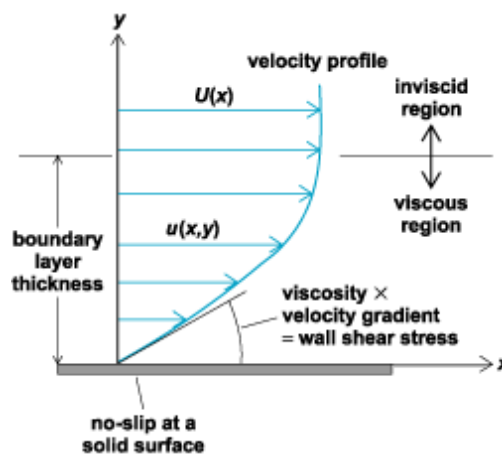


Figura V-16. Representación de los perfiles laminares y turbulentos de velocidad perpendicular a la pared

La rugosidad superficial  $k$  que se puede proporcionar en el programa, en cada uno de los componentes de la estructura por la que circula el fluido, tiene efecto sobre las tensiones de corte totales de pared y sobre el perfil de velocidades que se desarrolla en el fluido. Flow-3D añade el producto  $\rho \cdot k \cdot u_r$  a la viscosidad dinámica  $\mu$ , siendo  $\rho$  la densidad del agua,  $k$  la rugosidad superficial y  $u_r$  la velocidad relativa entre el fluido y la pared (usualmente la pared es inmóvil y por tanto  $u_r$  termina siendo la velocidad del fluido  $u$ ). Este incremento de la viscosidad hace que el perfil de velocidades sea más vertical con velocidades inferiores, esto es, una disipación de energía mayor.

Referente a la disipación de la energía debida a la turbulencia, Flow-3D dispone de varios módulos de cálculo que se escogen según las necesidades en cada caso de estudio. En concreto, dispone de 6 modelos de turbulencia según se describen a continuación:

- **Modelo de longitud de mezcla de Prandtl:** Este modelo es el más simple y uno de los primeros planteados para describir el efecto de la turbulencia. Presenta el menor coste computacional de todos los posibles modelos a utilizar. Para poder aplicar este modelo de manera correcta se necesita que el flujo sea en régimen permanente y uniforme.
- **One-Equation model:** El modelo de transporte turbulento “one-equation” consiste en la ecuación de transporte para una energía específica asociada con las fluctuaciones de velocidades turbulentas en el flujo. Este modelo es una simplificación del Standard two-equation model, tiene un coste computacional bajo y permite obtener muy buenos resultados en flujos relativamente permanentes. Este modelo a diferencia del modelo de longitud de mezcla de Prandtl incluye los términos de difusión y convección, y el término de producción de la energía cinética turbulenta. Por todo ello es más robusto que el modelo de mezcla de Prandtl. El problema de este modelo es que necesita una longitud de mezcla específica y que es muy sensible al valor determinado. Por ello para flujos en geometrías complejas presenta resultados dispares.
- **Modelo  $k - \epsilon$ :** El modelo  $k - \epsilon$  es uno de los modelos de turbulencia más usados, a pesar de que no funciona del todo bien con elevados gradientes de presiones. Es un modelo formado por dos ecuaciones donde incluye las ecuaciones de transporte, de la energía cinética turbulenta ( $k$ ) y de la disipación de la energía turbulenta ( $\epsilon$ ), para representar las propiedades del flujo. Esto permite al modelo  $k - \epsilon$  tener en cuenta efectos como la convección y la difusión de la energía turbulenta. Existen dos formulaciones del modelo  $k - \epsilon$  principales. La más común es la llamada “Standard  $k - \epsilon$  Model” que apareció con la intención de mejorar la teoría de la escala turbulenta y para encontrar una formulación matemática a las longitudes de escala turbulenta.
- **Renormalized Group (RNG):** El modelo RNG aplica métodos probabilísticos a las derivadas de las ecuaciones de la cantidad de turbulencia, como energía cinética turbulenta y tasa de disipación. Este modelo utiliza ecuaciones parecidas al modelo  $k - \epsilon$ , a pesar de que las constantes de las ecuaciones en el modelo  $k - \epsilon$  son empíricas y en éste se derivan explícitamente. Por ello el modelo RNG tiene más ámbitos de aplicación. Es recomendable usarlo con flujos de baja turbulencia y flujos con regiones con altos gradientes.
- **Modelo  $k - \omega$ :** El modelo  $k - \omega$  es el último modelo de turbulencia adoptado por Flow-3D en su versión 11. Se trata de un modelo de dos ecuaciones como el modelo  $k - \epsilon$  o el

modelo RNG, siendo en este caso la variable  $\omega = \varepsilon/\kappa$ . Este modelo es especialmente eficaz cerca de condiciones de pared y en flujos con gradientes de presión como chorros de agua o estelas.

- **Large Eddy Simulation (LES):** El modelo Large Eddy Simulation viene de los modelos atmosféricos. La idea principal del código es la de resolver las estructuras turbulentas que pueden ser representadas correctamente por la malla y aproximar las que son demasiado pequeñas para ser resueltas. El modelo simplifica las ecuaciones de Navier Stokes para esas escalas pequeñas y después añade un término de viscosidad de remolino (Eddy viscosity) que representa las fluctuaciones de estas escalas pequeñas.

El principal objetivo de cualquier modelo de turbulencia es proporcionar un mecanismo para la estimación de la influencia de las fluctuaciones turbulentas en las cantidades de flujo medias. Esta influencia es normalmente expresada por términos de difusión adicionales en las ecuaciones de masa, momento y transporte de energía que están implementadas en Flow-3D. Puesto que la turbulencia aumenta la difusión de la cantidad de momento también aumenta la viscosidad. El coeficiente de viscosidad dinámica que aparece en las ecuaciones implementadas en Flow-3D incorpora la suma de la viscosidad molecular y la turbulenta.

$$\mu = \rho(\nu + \nu_T) \quad \text{[V-13]}$$

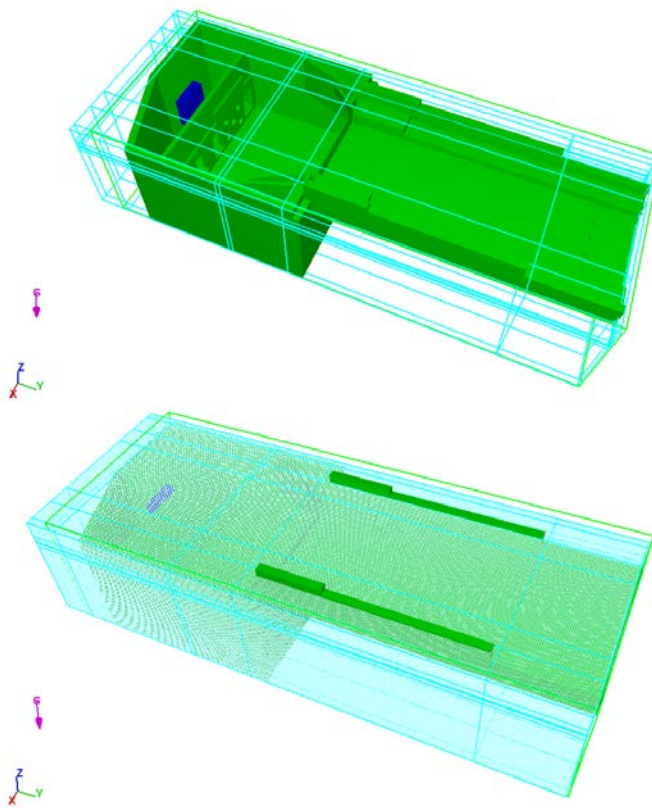
Estrictamente hablando no es siempre correcto, pero se asume que es una buena aproximación para altos niveles de turbulencia, es decir cuando la viscosidad turbulenta es mucho mayor que la molecular.

#### V.4.5. Geometría y mallado

Flow-3D presenta dos opciones para introducir la geometría de las estructuras que contienen el fluido a analizar: la primera es introducir directamente la geometría en el propio programa mediante las llamadas “primitivas”, y la segunda es importar geometrías desarrolladas previamente en programas de dibujo tridimensional. La primera de las opciones lleva mucha dedicación, puesto que se define cada componente a partir de coordenadas; por tanto, no es propicio para estructuras con cierta complejidad. Para este estudio, si bien las estructuras no son de gran complejidad, se ha optado por la segunda de las opciones, utilizando para ello el programa libre Google Sketchup.

Google Sketchup, gracias a que es un programa libre y muy sencillo de utilizar, no presenta grandes dificultades a los no usuarios habituales de programas de dibujo tridimensional. En este sentido, y ya que las estructuras hidráulicas, en general, no son de especial complejidad, se propone éste como idóneo para el dibujo de la estructura a importar por Flow-3D. Obviamente se puede usar cualquier otro programa de dibujo 3D, siempre que el modelo se exporte con extensión stl para que Flow-3D pueda importarlo. Google Sketchup necesita de un plugin que permita exportar en extensión stl.

Por supuesto, Flow-3D importa el archivo generado con extensión stl en las mismas coordenadas, de manera que cada componente se coloca exactamente en la posición adecuada. Las características de cada componente se proporcionan en el propio programa. Se pueden observar en la Figura V-17 los diferentes componentes importados por Flow-3D, en este caso la fuente de masa y la plataforma de ensayos al completo como un solo componente.



**Figura V-17.** Estructura y planos de malla (arriba), y celdas de 3cm en el bloque (abajo) para el modelo de plataforma de ensayos con personas

El mallado en Flow-3D es fundamental y se debe hacer de la mejor manera posible para obtener buenos resultados. El concepto general de mallado, para todos los programas de modelación numérica, responde a la discretización espacial, mediante hexaedros en este caso, y asociándose resultados a cada una de las celdas. Flow-3D introduce dos conceptos que deben ser entendidos previamente:

**Mesh-Block:** se trata de un bloque de malla con unas mismas características. Se introducen unas coordenadas que definen los límites del prisma (bloque) que contiene las celdas interiores. Se pueden construir varios Mesh-Block con diferentes tamaños de celdas cada uno, de manera que es posible “afinar” la zona de mayor interés de análisis e introducir un bloque de malla más gruesa en zonas de menor interés.

**Mesh-Plane:** Se trata de cada uno de los planos principales que definen el bloque de malla. Estos planos se colocan para encajar perfectamente la geometría concreta, es decir, para delimitar en detalle las paredes interiores de un canal, por ejemplo. Estos planos se colocan en la coordenada que se requiere, para interpolar planos intermedios a las distancias más próximas posibles a las propuestas al programa.

Flow-3D ofrece posibilidades para la optimización del coste computacional, “deshabilitando” algunas zonas de la malla en las que se sabe que el fluido no va a circular. Este tipo de componente

se define con el nombre de “domain removing”, definiéndose como un componente más, pero sin características de rugosidad superficial, por ejemplo. En la Figura V-18 se muestra a modo de ejemplo un lugar en el que se podría introducir este componente, a la entrada del depósito y bajo la plataforma, donde habrá celdas que no serán ocupadas por el fluido en ningún caso (color verde y amarillo).

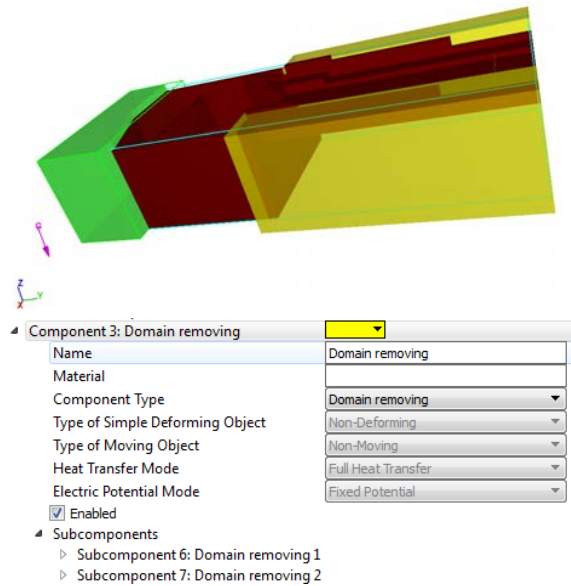


Figura V-18. Domain removing

#### V.4.6. Condiciones de contorno y condiciones iniciales

Las ecuaciones de gobierno del problema requieren de cierta información previa para poder ser resueltas numéricamente: las condiciones de contorno y condición inicial. Flow-3D es un programa que no solo se presenta para el ámbito de la hidráulica. Por eso las condiciones de contorno que se deben introducir al programa son más generales y no responden a los modelos a los que un ingeniero hidráulico está acostumbrado, por ejemplo, en Hec-Ras (1D) o Iber (2D), donde se pueden introducir condiciones de contorno tipo calado crítico o calado normal.

Dada la cantidad de posibilidades que ofrece el programa en cuanto a condiciones de contorno, únicamente se van a definir aquellas que se han tenido en cuenta para los modelos desarrollados.

##### a) Condición de contorno de entrada

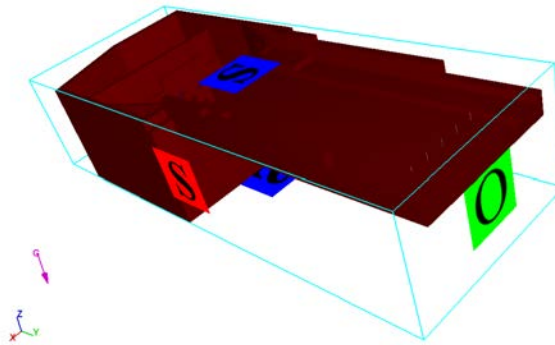
En los casos considerados en este trabajo se utilizan únicamente dos: un caudal, mediante la incorporación de una fuente de masa, o una velocidad y elevación de lámina de agua determinados.

En cuanto a la fuente de masa, se debe introducir un componente nuevo, habiendo habilitado previamente “Fluid sources” en “Physics”. Este componente se define como una estructura más, dándole la forma más adecuada dependiendo del caso de estudio.

La opción de contorno de velocidad y elevación de lámina de agua determinados se activa con la opción “specific velocity”, desde la ventana de condiciones de contorno (Figura V-20). Una vez activado es posible definir la elevación de la lámina de agua en esa misma posición, lo cual permite definir el calado de agua al conocer la elevación del suelo.

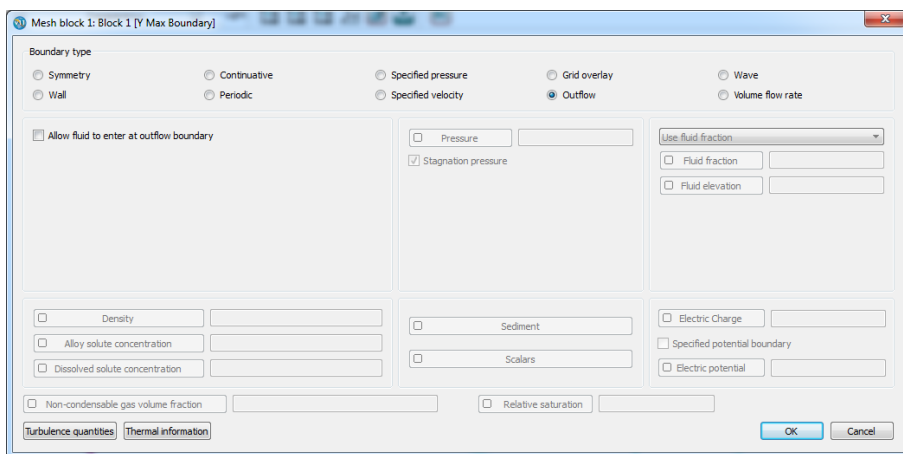
b) Condiciones de contorno de salida

Las condiciones de contorno quedan indicadas en cada una de las caras de los bloques de malla (Figura V-19).



**Figura V-19.** Ejemplo de condición de contorno de salida (Outflow) en la plataforma de ensayos con personas

Por defecto, al pedirle al programa que muestre las condiciones de contorno, en todas las caras pone una “S” que significa simetría, pero que si no se aporta información adicional es como si esa cara no dispusiese de condición de contorno. Una “O” indica una salida tipo Outflow, es decir salida libre. Haciendo doble clic en una de las caras de cualquier bloque de malla, aparece una ventana para introducir el tipo de condición de contorno y las características de esa condición (Figura V-20).

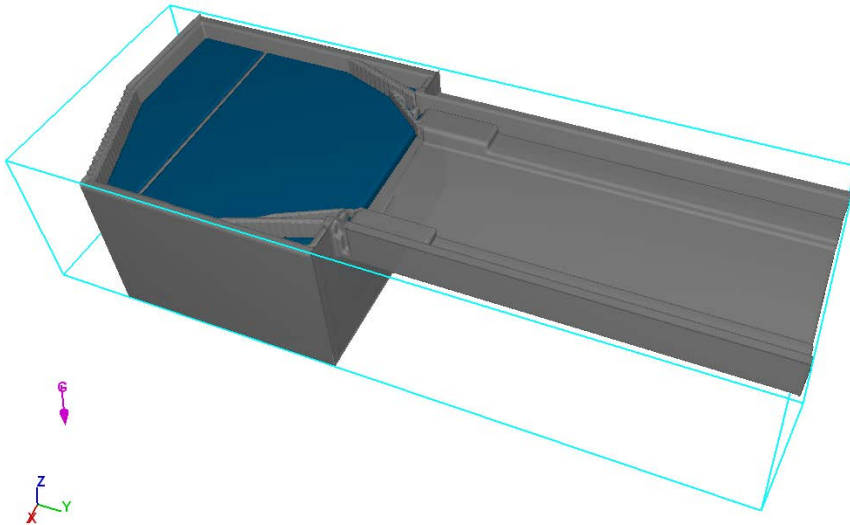


**Figura V-20.** Introducción condición de contorno

Respecto a la condición inicial no existe demasiada complicación. Cabría la posibilidad de iniciar los cálculos en seco, es decir, sin agua en el modelo y que el programa calcule el llenado,



pero esta situación supone un gran coste computacional y no aporta información útil, ya que los resultados que se pretenden obtener en estos estudios se encuentran en la fase de flujo estabilizado, una vez finaliza el comportamiento transitorio del flujo. En cada situación se han empleado las condiciones iniciales más apropiadas; se explica en detalle en la descripción en concreto de cada modelo. Una vez introducida la condición inicial se puede hacer un renderizado (FAVORize) del fluido inicial, obteniendo una situación como la que se muestra en la Figura V-21.



**Figura V-21.** FAVORize de la condición inicial en Flow-3D

#### ***V.4.7. Objetos en movimiento***

Uno de los modelos que presenta Flow-3D es el de objetos en movimiento, que se ha utilizado para el análisis de la estabilidad de vehículos cuando éstos se ven expuestos a inundaciones. Un objeto general en movimiento (GMO) en Flow-3D es un cuerpo rígido que presenta algún movimiento físico, ya sea acoplado al fluido o un cierto movimiento prestablecido por el usuario. Éste puede moverse con seis grados de libertad (DOF) o rotar alrededor de un punto o un eje fijo. El modelo GMO permite poner en movimiento varios objetos a la vez en un mismo problema con movimientos independientes en cada caso. Se tienen en cuenta dos sistemas de referencia, uno fijo para el cuerpo en movimiento y el sistema de referencia del sistema general. Para cada paso de tiempo se calculan las fuerzas y torsiones que se producen debido a la presión y tensiones tangenciales, y las ecuaciones de movimiento se resuelven para los objetos en movimiento de manera acoplada, pero teniendo en cuenta las fuerzas y esfuerzos de torsión hidráulicos, gravitacionales, elásticas y de control. Las fracciones de áreas y volúmenes son recalculadas para cada paso de tiempo para tener en cuenta el desplazamiento del objeto dentro del fluido. La velocidad tangencial del movimiento de los contornos del objeto se introduce como términos de tensiones tangenciales en la ecuación de cantidad de movimiento. A pesar de que existen dos opciones numéricas para el acoplamiento del flujo y del objeto, explícito e implícito, el primero solo funciona para elementos muy pesados (con mayor densidad que el agua), con lo que en este caso de estudio no procede al tratar con vehículos que se espera que floten al ser menos densos que la propia agua.

El modelo GMO presenta la opción además de simular colisiones entre cuerpos rígidos. Se asume que las colisiones son instantáneas y pueden producirse entre un objeto quieto y otro en movimiento, entre dos en movimiento, o entre uno en movimiento y paredes del dominio computacional. El modelo de colisión se compone de dos partes, la detección del impacto y la integración de éste. Para cada paso de tiempo, una vez se detecta una colisión, una serie de ecuaciones de impacto son integradas. Estas ecuaciones incorporan el coeficiente de restitución de Stronge (1990) que definirá el tipo de colisión: elástica, parcialmente elástica o completamente plástica. El coeficiente de rozamiento entre superficies de contacto debe ser definido por el usuario en el caso que se active el modelo de colisión. El contacto continuo entre objetos en movimiento, tal como deslizamiento, rodamiento y reposo de un cuerpo sobre otro, es modelado a través de una serie de colisiones rápidas y de baja amplitud llamadas micro-colisiones.

En adelante se recogen los conceptos teóricos y formulaciones en cuanto a la dinámica de los cuerpos rígidos y colisiones entre ellos adoptada por Flow-3D. Se trata de las descripciones teóricas recogidas en el manual de Flow-3D (Flow Science, 2014) y cuya explicación se encuentra con más detalle en las *Technical Notes* #75 y #76 que Flow Science ofrece en la website de usuarios: <http://users.flow3d.com/tech-notes/default.asp>.

#### V.4.7.1. Ecuaciones de movimiento para cuerpos rígidos

El sistema de coordenadas del objeto ( $x', y', z'$ ) se establece paralelo al sistema de coordenadas espacial (general) para el instante de tiempo  $t=0$ . Cuando un objeto presenta 6 grados de libertad, el origen del sistema de coordenadas de dicho objeto se establece en el centro de gravedad del mismo ( $G$ ). El sistema de coordenadas del objeto, al estar fijo en éste, presentará las mismas traslaciones y rotaciones que el objeto. La transformación de coordenadas entre el sistema general ( $x, y, z$ ) y el del objeto ( $x', y', z'$ ) es el siguiente:

$$x_s = [R] \cdot x_b + x_G \quad \text{[V-14]}$$

siendo,

- $x_s$  y  $x_b$  los vectores de posición de un punto en el espacio y en el objeto respectivamente
- $x_G$  el vector de posición del centro de masa en el sistema espacial
- $[R]$  un tensor ortogonal de transformación de coordenadas

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$$

donde,

- $R_{ij}R_{jk} = \delta_{ik}$ ; siendo  $\delta_{ik}$  es el simbolo  $\delta$  de Kronecker

La matriz inversa y transpuesta de  $[R]$  son idénticas. Para un vector A en el espacio, la transformación entre ambos sistemas de coordenadas será:

$$A_s = [R] \cdot A_b \quad \text{[V-15]}$$

siendo,

- $A_s$  y  $A_b$  las expresiones de dicho vector A en el sistema de coordenadas espacial y del objeto respectivamente
- $[R]$  se calcula resolviendo:

$$\frac{d[R]}{dt} = [\Omega] \cdot [R]; \text{ con } [\Omega] = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & -\Omega_x & 0 \end{bmatrix}$$

$\Omega_x, \Omega_y$  y  $\Omega_z$  son las componentes x, y y z respectivamente de la velocidad angular del objeto en el sistema espacial.

De acuerdo con la cinemática, el movimiento general de un cuerpo rígido puede ser dividido en un movimiento de traslación y uno de rotación. La velocidad de cada punto de un cuerpo rígido es igual a la velocidad de un punto cualquiera del sólido más la velocidad de rotación de éste con respecto a un punto base arbitrario. Dicho punto base es conveniente que sea escogido como el centro de masa para aquellos objetos que presenten 6 grados de libertad. Si denominamos P a un punto cualquiera sobre el objeto, su velocidad está relacionada a la velocidad del centro de masa  $V_G$  y a la velocidad angular  $\omega$  del cuerpo rígido según:

$$V_P = V_G + \omega \times r_{P/G} \quad \text{[V-16]}$$

Donde  $r_{P/G}$  es el vector distancia entre G y P. El primer término de la parte derecha de la igualdad representa la traslación del centro de masa, y el segundo término representa la rotación sobre el centro de masa. Se debe mencionar que  $\omega$  es una propiedad del objeto en movimiento e independiente de la elección del punto base. Las ecuaciones que gobiernan por tanto ambos movimientos son las siguientes:

$$F = m \frac{dV_G}{dt} \quad \text{[V-17]}$$

$$T_G = [J] \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega \times ([J] \cdot \omega) \quad \text{[V-18]}$$

siendo,

- $F$ : la fuerza total
- $m$ : la masa del cuerpo rígido
- $T_G$ : el esfuerzo de torsión sobre G
- $[J]$ : el tensor de momento de inercia en el sistema de coordenadas del objeto

$$[J] = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix}$$

$J_{11}, J_{22}$  y  $J_{33}$  son los momentos de inercia y el resto productos de inercia

$$J_{11} = \int (y'^2 + z'^2) dm \quad J_{22} = \int (x'^2 + z'^2) dm \quad J_{33} = \int (x'^2 + y'^2) dm \quad [V-19]$$

$$J_{12} = J_{21} = - \int x'y' dm \quad J_{13} = J_{31} = - \int x'z' dm \quad J_{23} = J_{32} = - \int y'z' dm \quad [V-20]$$

Si las coordenadas  $x'$ ,  $y'$  y  $z'$  coinciden con los ejes principales del objeto, los productos de inercia desaparecen. Para simplificar los cálculos, las ecuaciones [V-17] y [V-18] se resuelven en el sistema espacial y del objeto respectivamente. La fuerza total y el esfuerzo de torsión total pueden incluir fuerzas y torsiones hidráulicas, gravitacionales, elásticas, no-inerciales y de control.

Las situaciones con menores grados de libertad también son posibles, pero no corresponden a las necesidades de los estudios presentados en este trabajo y por tanto no se describe la formulación adoptada por Flow-3D.

#### V.4.7.2. Adaptación de las ecuaciones de conservación

La forma general de la ecuación de continuidad basada en el método FAVOR es:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho V_f) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{uA}) = S_m \quad [V-21]$$

donde,

- $S_m$ : es el término de fuente de masa física de fluido,
- $V_f$ : y  $\mathbf{A}$ : son las fracciones de volumen y de área respectivamente.

A diferencia del caso de problemas con obstáculos estacionarios (los habituales), en este caso  $V_f$  y  $\mathbf{A}$  varían con el tiempo, así que dicho aspecto debe ser considerado en el fluido. La ecuación [V-21] puede ser reescrita aplicando la regla de cadena tal y como se indica en la expresión [V-22].

$$\frac{V_f}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\rho \mathbf{uA}) = - \frac{\partial V_f}{\partial t} + \frac{S_m}{\rho} \quad [V-22]$$

Y para el caso de fluidos incompresibles, como es el presente estudio con densidad constante, la anterior queda reducida a la expresión [V-23].

$$\nabla \cdot (\mathbf{uA}) = - \frac{\partial V_f}{\partial t} + \frac{S_m}{\rho} \quad [V-23]$$

Comparando esta última expresión [V-23] con la ecuación de continuidad para obstáculos estáticos [V-8], se observa que  $-\frac{\partial V_f}{\partial t}$  es equivalente a un término adicional de fuente de volumen. Al utilizar el método de volumen de control, este término solo existe en celdas de malla alrededor del contorno de objetos móviles. El término  $-\frac{\partial V_f}{\partial t}$  se calcula a partir de la expresión [V-24].

$$-\frac{\partial V_f}{\partial t} = + \frac{S_{obj}}{V_{cell}} \mathbf{V}_{obj} \cdot \mathbf{n} \quad [\text{V-24}]$$

siendo,

- $V_{cell}$ : el volumen de una celda de malla.
- $S_{obj}$ ,  $\mathbf{n}$  y  $\mathbf{V}_{obj}$  el área superficial, el vector unitario normal y la velocidad del objeto móvil en la celda de malla respectivamente.

La ecuación [V-24] presenta una buena propiedad en conservación de la masa puesto que la generación neta de fluido de masa sobre todas las celdas de malla alrededor del contorno del objeto móvil es próxima a cero. También presenta una resolución exacta en el tiempo y no hay mayores dificultades para calcularla. En las ecuaciones de transporte para otras cantidades que son resueltas de una forma conservativa, como el transporte de energía y escalar, aparecen términos similares.

Hay que tener en cuenta que Flow-3D utiliza la forma no conservativa de las ecuaciones de cantidad de movimiento. Los términos debidos a la variación en el tiempo de  $V_f$  se cancelan así que las ecuaciones de cantidad de movimiento en la forma no conservativa se mantienen de la misma forma que las correspondientes a problemas con obstáculos estáticos [V-9].

La velocidad tangencial no nula de los objetos móviles se tiene en cuenta en el cálculo de los términos de la tensión tangencial en el fluido de la ecuación [V-9].

#### V.4.7.3. Ecuaciones dinámicas para la colisión de cuerpos rígidos

Se presentan en este apartado los fenómenos que se tienen en cuenta y las ecuaciones que numéricamente están implementadas en Flow-3D en relación a la dinámica de la colisión de cuerpos rígidos.

##### Ley de Coulomb del rozamiento

Se asume que un cuerpo B choca con un cuerpo B' y sus respectivos puntos de colisión o contacto son C en el cuerpo B y C' en el cuerpo B'. Se establece un sistema de referencia de la colisión cuyo origen se sitúa en el punto de contacto, en el que se ubica un vector unitario cuyas coordenadas son  $n_1, n_2, n_3$ . Su tercera componente  $n_3$  se proyecta en la dirección normal del plano tangencial que pasa por el punto de contacto de ambos cuerpos y su dirección va desde B' hasta B. Si se define  $\vec{v}$  como la velocidad relativa del punto C hasta el C', y  $\vec{p}$  el impulso de la fuerza de contacto en el cuerpo B. En forma vectorial:

$$\vec{v} = (v_1, v_2, v_3), \vec{p} = (p_1, p_2, p_3) \quad [\text{V-25}]$$

donde el subíndice indica la correspondiente coordenada en  $n_1, n_2$  o  $n_3$ . En adelante se indicará como notación más simple a la dirección normal  $n_3$  como  $n$  y al impulso normal  $p_3$  como  $p$ . La ley de Coulomb del rozamiento, en base a la notación propuesta, se presenta en la expresión [V-26].

$$\sqrt{(dp_1)^2 + (dp_2)^2} < \mu dp, \quad \text{si } v_1^2 + v_2^2 = 0 \quad \text{[V-26]}$$

$$dp_i = -\frac{\mu v_i}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}} dp, \quad i = 1,2 \quad \text{si } v_1^2 + v_2^2 = 0 \quad \text{[V-27]}$$

Pudiendo escribirse también la ecuación [V-27] como:

$$dp_1 = -\mu \sin \varphi dp, \quad dp_2 = -\mu \cos \varphi dp \quad \text{si } v_1^2 + v_2^2 > 0 \quad \text{[V-28]}$$

siendo  $\varphi$  el ángulo de la dirección de deslizamiento medida desde  $n_1$  sobre  $n$ .

### Coefficiente de Restitución Energética de Stronge

En términos generales se entiende que un proceso de colisión o choque se divide en dos fases, compresión y restitución. La hipótesis de Stronge (1990) es relacionar el trabajo realizado por un impulso normal durante la restitución o durante la compresión. El coeficiente energético de restitución de Stronge  $e$  se define como:

$$e = \sqrt{-\frac{W_3(p_f) - W_3(p_c)}{W_3(p_c)}} \quad \text{[V-29]}$$

donde,

- $W_3$  es el trabajo realizado por un impulso normal,
- $p_c$  es el impulso normal cuando la colisión alcanza su máxima compresión, y
- $p_f$  es el impulso total de la colisión

$$W_3(p) = \int_0^p v_3 dp \quad \text{[V-30]}$$

### Forma General de las ecuaciones dinámicas

Se asume que dos cuerpos B y B' tienen masas M y M', y sus centros de masa están localizados en G y G', respectivamente. En el sistema de colisión, la velocidad relativa en el punto de contacto satisface la ecuación de movimiento,

$$dv_i = m_{ij}^{-1} dp_j \quad (i = 1,2,3) \quad \text{[V-31]}$$

donde se ha usado el convenio de suma de Einstein, y:

$$m_{ij}^{-1} = m_{B,ij}^{-1} + m_{B',ij}^{-1} \quad \text{[V-32]}$$

siendo  $m_{B,ij}^{-1}$  y  $m_{B',ij}^{-1}$  los términos para los cuerpos B y B', respectivamente. Si ambos cuerpos tienen 6 grados de libertad, las expresiones de  $m_{B,ij}^{-1}$  y  $m_{B',ij}^{-1}$  son:

$$m_{B,ij}^{-1} = \frac{1}{M} \delta_{ij} + \varepsilon_{ikm} \varepsilon_{jln} J_{kl}^{-1} r_m r_n \quad (6 \text{ grados de libertad}) \quad [\text{V-33}]$$

$$m_{B',ij}^{-1} = \frac{1}{M'} \delta_{ij} + \varepsilon_{ikm} \varepsilon_{jln} J'_{kl}{}^{-1} r'_m r'_n \quad (6 \text{ grados de libertad}) \quad [\text{V-34}]$$

donde,

- $\delta_{ij}$  es la delta de Kronecker
- $\varepsilon_{ikm}$  es el tensor de permutación
- $J_{kl}^{-1}$  y  $J'_{kl}{}^{-1}$  son los elementos de la inversa del tensor de inercia sobre el centro de masas por los dos cuerpos en el sistema de colisión, respectivamente.
- $r_i$  y  $r'_i$  son componentes de los vectores de distancia desde el centro de masa hasta el punto de colisión de ambos cuerpos, respectivamente.

Las expresiones para  $m_{ij}^{-1}$  en el caso de movimientos de cuerpos con menos grados de libertad no corresponden a las necesidades de los estudios presentados en este trabajo y por tanto no se describe la formulación adoptada por Flow-3D.

### Ecuaciones dinámicas en términos de impulso normal

Si dos cuerpos que colisionan deslizan inicialmente en su punto de contacto, el rozamiento puede detenerlo inmediatamente cuando la colisión es excéntrica y la velocidad inicial de deslizamiento es suficientemente pequeña. Tras el choque, éstos pueden quedarse unidos en el punto de contacto o empezar a deslizar de nuevo inmediatamente en una nueva dirección hasta que se separen, dependiendo de las propiedades de inercia de los dos objetos y del coeficiente de rozamiento. El deslizamiento que sucede antes de que los cuerpos se detengan se conoce como primera fase de deslizamiento, y el retorno producido (si sucede) se le conoce como segunda fase del deslizamiento. Si el rozamiento no causa la parada del deslizamiento o la colisión no presenta rozamiento, solo se producirá la primera fase de deslizamiento que puede suceder en una colisión.

Cuando dos objetos deslizan durante una colisión, las componentes de la velocidad tangencial son las siguientes:

$$v_1 = s \cos\varphi \quad , \quad v_2 = s \sin\varphi \quad [\text{V-35}]$$

donde  $s$  es la velocidad de deslizamiento,

$$s = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \quad [\text{V-36}]$$

y  $\varphi$  es la dirección de deslizamiento la cual varía durante la colisión. Introduciendo la Ley de Coulomb del rozamiento [V-28] en la ecuación [V-31], las ecuaciones de movimiento en términos del impulso normal  $p$  para la primera fase de deslizamiento son:

$$\frac{dv_1}{dp} = -\mu m_{11}^{-1} \cos\varphi - \mu m_{12}^{-1} \sin\varphi + m_{13}^{-1} \quad [\text{V-37}]$$

$$\frac{dv_2}{dp} = -\mu m_{21}^{-1} \cos \varphi - \mu m_{22}^{-1} \sin \varphi + m_{23}^{-1} \quad [\text{V-38}]$$

$$\frac{dv_3}{dp} = -\mu m_{31}^{-1} \cos \varphi - \mu m_{32}^{-1} \sin \varphi + m_{33}^{-1} \quad [\text{V-39}]$$

Si los objetos son perfectamente lisos ( $\mu = 0$ ), las ecuaciones [V-37], [V-38] y [V-39] son independientes, si no serán dependientes. Las ecuaciones de gobierno para  $s$  y  $\varphi$  son:

$$\frac{ds}{dp} = m_{13}^{-1} \cos \varphi + m_{23}^{-1} \sin \varphi - \mu m_{11}^{-1} \cos^2 \varphi - 2\mu m_{12}^{-1} \sin \varphi \cos \varphi - \mu m_{22}^{-1} \sin^2 \varphi \equiv g(\mu, \varphi) \quad [\text{V-40}]$$

$$s \frac{d\varphi}{dp} = -m_{13}^{-1} \sin \varphi + m_{23}^{-1} \cos \varphi + \mu (m_{11}^{-1} - m_{22}^{-1}) \sin \varphi \cos \varphi + \mu m_{12}^{-1} (\sin^2 \varphi - \cos^2 \varphi) \equiv h(\mu, \varphi) \quad [\text{V-41}]$$

En la situación en que los cuerpos se quedan unidos,  $v_1 = v_2 = 0$  y  $dv_1/dp = dv_2/dp = 0$ . La velocidad tangencial nula se acompaña por una fuerza de rozamiento a lo largo de una dirección constante  $\bar{\varphi} - \pi$  (Stronge, 2004).

$$\bar{\varphi} = \tan^{-1} \left( \frac{m_{11}^{-1} m_{23}^{-1} - m_{12}^{-1} m_{13}^{-1}}{m_{22}^{-1} m_{13}^{-1} - m_{23}^{-1} m_{12}^{-1}} \right) \quad [\text{V-42}]$$

Las componentes del impulso diferencial de la fuerza tangencial en  $n_1$  y  $n_2$  satisfacen:

$$\begin{aligned} dp_1 &= -\bar{\mu} \cos \bar{\varphi} dp \quad , \quad dp_2 = -\bar{\mu} \sin \bar{\varphi} dp \\ \sqrt{(dp_1)^2 + (dp_2)^2} &= \bar{\mu} dp \end{aligned} \quad [\text{V-43}]$$

donde  $\bar{\mu}$  es el coeficiente para la adhesión,

$$\bar{\mu} = \frac{\sqrt{(m_{11}^{-1} m_{23}^{-1} - m_{12}^{-1} m_{13}^{-1})^2 + (m_{22}^{-1} m_{13}^{-1} - m_{23}^{-1} m_{12}^{-1})^2}}{m_{11}^{-1} m_{22}^{-1} - m_{12}^{-1} m_{12}^{-1}}$$

y  $\bar{\mu} < \mu$ . Las ecuaciones de movimiento serán, por tanto:

$$v_1 = 0 \quad [\text{V-44}]$$

$$v_2 = 0 \quad [\text{V-45}]$$

$$\frac{dv_3}{dp} = -\bar{\mu} m_{31}^{-1} \cos \bar{\varphi} - \bar{\mu} m_{32}^{-1} \sin \bar{\varphi} + m_{33}^{-1} \quad [\text{V-46}]$$

Durante la segunda fase de deslizamiento las ecuaciones de movimiento [V-37], [V-38] y [V-39] siguen siendo válidas. Sin embargo diferentes de la primera fase de deslizamiento en la cual la dirección varía durante la colisión, el deslizamiento en la segunda fase es a lo largo de una dirección constante  $\varphi$ . Se obtiene resolviendo  $h(\mu, \varphi) = 0$  en la ecuación [V-41] para  $\varphi$ . Pueden



haber múltiples soluciones de  $\varphi$ . La dirección de deslizamiento es la única que satisface  $ds/dp = g(\mu, \varphi) > 0$  según se define en la ecuación [V-40].

Si el rozamiento produce el detenimiento inmediato, entonces la comparación del coeficiente de rozamiento  $\mu$  y el coeficiente para la adhesión  $\bar{\mu}$  determina si se produce un deslizamiento hasta la adhesión o por el contrario continúa deslizando en otra dirección tras la colisión. Si  $\bar{\mu} < \mu$  se produce la primera de las situaciones, en caso contrario se produciría la segunda de las reacciones.

#### V.4.7.4. Simulación en Flow-3D de Objetos Móviles (GMO)

Para modelar objetos móviles en Flow-3D se deben llevar a cabo 4 pasos:

1. Activación del modelo GMO
2. Creación de la geometría inicial del objeto móvil
3. Introducir los parámetros de movimiento del GMO
4. Definición de las propiedades de masa del objeto móvil

La activación del modelo GMO se realiza desde el panel de modelos, marcando *Moving and simple deforming objects*. En este mismo panel se debe indicar el método numérico a utilizar, explícito o implícito, que tal y como se comentó anteriormente para el caso de estudio debe ser el implícito puesto que el objeto móvil (vehículo) presenta una densidad inferior a la del agua.

Para crear la geometría, al tratarse de una forma compleja como la de un vehículo, debe ser elaborada o adquirida por fuentes externas, de manera que una vez obtenido el archivo stl sea importado por Flow-3D y colocado en el lugar deseado del modelo.

Una vez introducido el objeto móvil en Flow-3D, se deben indicar las características de éste en cuanto al tipo de movimiento que se desea que tenga. En el panel de geometría debe indicarse en primer lugar el tipo de movimiento del objeto, siendo para este caso *Coupled Motion*, es decir acoplado con el movimiento del agua. En segundo lugar, se deben editar las propiedades del objeto móvil, clicando sobre el botón Edit del papel de propiedades. En la pestaña de Motion Constraints se indican las propiedades del movimiento del objeto en cuanto a restricciones, indicando en este caso los 6 grados de libertad, aunque el objetivo del estudio no es más que determinar el momento de inicio de movimiento y en ningún caso analizar la trayectoria del objeto (vehículo) una vez queda suspendido en el agua.

En este caso se asume que los vehículos tienen densidad uniforme, por tanto, se indicará la densidad constante de éste y Flow-3D establecerá el centro geométrico del objeto, calculado por el propio código, como el punto de referencia en el que se encontrará situado el origen del sistema de referencia del objeto móvil. En caso de trabajar con un objeto con un centro de masas conocido, se debe establecer el tensor de momentos de inercia, situándose en ese caso el sistema de referencia del objeto en el centro de masa en lugar de en el centro geométrico. Las velocidades iniciales o prescritas, así como fuerzas y torsiones de control no son de aplicación en este caso de estudio.

Finalmente, se debe activar también la posibilidad de que el objeto pueda colisionar, puesto que en caso contrario no se podría definir un coeficiente de rozamiento y el objeto móvil atravesaría cualquier otro objeto, móvil o estático, que encontrara durante su desplazamiento. Una vez

activado es posible modificar los valores de coeficiente de restitución y de fricción que se proponen por defecto, 1 y 0 respectivamente. El coeficiente de restitución, como ya se comentó anteriormente, define si la colisión es completamente elástica, completamente plástica o parcialmente elástica. Una manera experimental de definir este coeficiente es dejando caer una esfera desde una altura  $h_0$  sobre una superficie del mismo material y medir la altura del rebote  $h$ . El coeficiente de restitución se obtiene como  $\sqrt{h_0/h}$ . Se propone en este caso un valor del coeficiente de restitución de 0.5.

El coeficiente de fricción se tiene en cuenta en el punto de contacto de ambos objetos que colisionan según definición de la definición de la Ley de Coulomb del rozamiento ([V-26] y [V-28]). Se asume que no existe rozamiento cuando se deja el valor de 0 que aparece por defecto para el coeficiente  $\mu$ . La inclusión de rozamiento en la colisión causa una pérdida de energía cinética. Estos valores, tanto del coeficiente de restitución como del de rozamiento, también son utilizados para las condiciones de contorno de pared, mientras que para las condiciones de contorno de simetría se asume que no hay fricción y la colisión es totalmente elástica. Estos valores también se pueden incluir desde el panel de geometría, en las propiedades del componente que se tiene en cuenta como objeto móvil, realizándose el cálculo con el menor de ellos en caso de valores diferentes.

El deslizamiento se simula como una serie de colisiones de pequeña amplitud, denominadas micro-colisiones. Éstas se calculan de la misma forma que una colisión ordinaria con lo que no se necesitan parámetros adicionales. La amplitud de las micro-colisiones es normalmente demasiado pequeña, tanto que el movimiento es apenas apreciable en fotogramas sucesivos del postproceso.

## **V.5. Elaboración y resultados de los modelos aplicados al estudio de la estabilidad de personas y de vehículos**

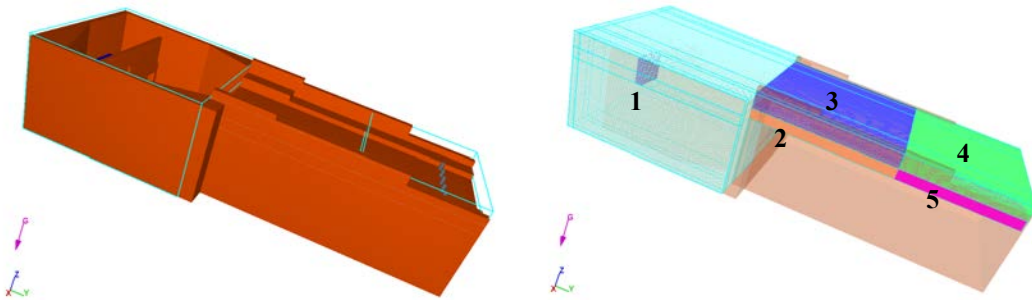
En el presente apartado se describe el proceso de elaboración de cada uno de los modelos desarrollados: plataforma de ensayos para el estudio de la estabilidad para peatones y pendiente local para el análisis de estabilidad de vehículos. Para ambas descripciones se utilizan los términos y conceptos mencionados hasta el momento en apartados anteriores.

### ***V.5.1. Estudio de la estabilidad de personas. Desarrollo y calibración del modelo***

Una vez dibujado el modelo de plataforma de ensayos para la estabilidad de personas mediante el software Google Sketchup, ha sido exportado con extensión stl para poder ser importado en Flow-3D. El diseño 3D se ha llevado a cabo estableciendo la pendiente transversal (bombeo de la carretera) del 2% pero manteniendo horizontal la plataforma en la dirección longitudinal (sentido de circulación del flujo). Puesto que Flow-3D permite establecer la aceleración de la gravedad de forma vectorial, definiendo el valor de cada una de las tres componentes de dicho vector, se “gira” la gravedad en la dirección del flujo para que el comportamiento hidráulico sea análogo al que se daría estableciendo la pendiente longitudinal de la plataforma.

El mallado del modelo se ha llevado a cabo a partir de 5 bloques de malla (Figura V-22). El mayor de los bloques se compone de celdas de un tamaño de 3 cm y el menor de ellos de 8,7 mm. La mayor densidad de celdas se ha colocado en el bloque 5, de manera que se obtengan resultados

con mayor detalle en la zona de interés, justo donde se realizó el protocolo de ensayos y especialmente en la sección en la que se ubican los perfiles de velocidad medidos. La zona de menor interés es el depósito, puesto que la única función es permitir que el caudal acceda uniformemente a la plataforma, con lo cual se considera suficiente un tamaño de malla de 3 cm en el bloque 1 que cubre únicamente el depósito. Una de las condiciones de Flow-3D, en cuanto al mallado, es que se cumpla que la relación del tamaño de celdas entre bloques adyacentes sea inferior a 2:1, con lo que el menor de los tamaños de malla utilizado ha sido definido en base a este criterio. El bloque de malla 5 ve limitado el tamaño de celda por los bloques 4 y 2 y así sucesivamente.



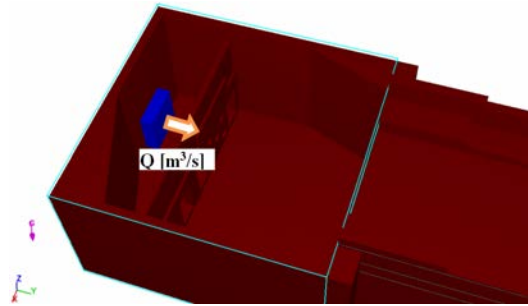
**Figura V-22.** Bloques de malla del modelo de plataforma de ensayos de estabilidad para personas

Se ha utilizado el modelo de turbulencia  $k - \omega$ , incorporado en la versión 11 de Flow-3D. Se trata de un modelo de dos ecuaciones como el modelo  $k - \epsilon$  o el modelo RNG, siendo en este caso la variable  $\omega = \epsilon/\kappa$ . Este modelo es especialmente eficaz cerca de condiciones de pared y en flujos con gradientes de presión como chorros de agua o estelas. Se han realizado simulaciones utilizando también el modelo  $k - \epsilon$  sin apreciarse diferencias sensibles.

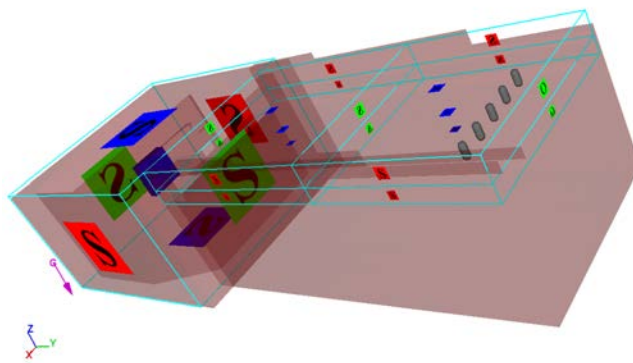
La disipación de energía se complementa con la incorporación de la rugosidad absoluta superficial  $k$ , siendo en este caso un parámetro de calibración del modelo. Se ha establecido un valor final de 0.2 mm de rugosidad absoluta, aplicada a todo el modelo.

En cuanto al caudal de circulación del modelo, se ha creado un componente tipo fuente de masa, con la sección correspondiente a la conducción de entrada existente en el modelo físico, desde la que se desprende el caudal impuesto a este componente. El caso modelado responde a una pendiente longitudinal del 4% ( $\vec{g} = (g_x; g_y; g_z) = (0; 0.3921; -9.8022)$ ) y un caudal de 450 l/s.

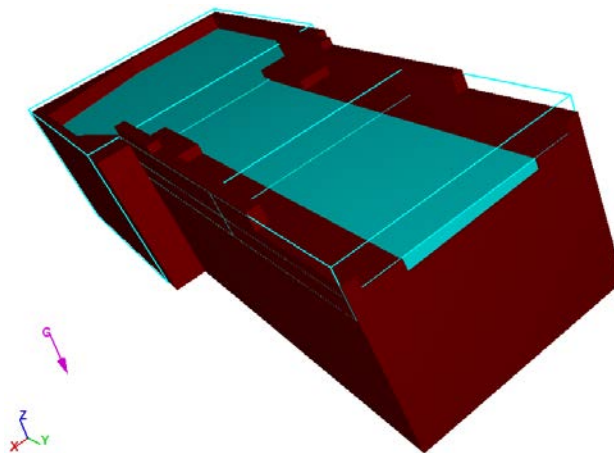
Como condición de contorno aguas abajo, se impone la condición Outflow (O) en las caras más alejadas en la dirección “y” de los bloques de malla 4 y 5. El resto de caras de cada bloque presentan la condición de contorno por defecto de Symmetry (S).



**Figura V-23.** Fuente de masa del modelo de plataforma de ensayos de peligrosidad para personas



**Figura V-24.** Condiciones de contorno impuestas en el modelo de plataforma de ensayos de peligrosidad para personas

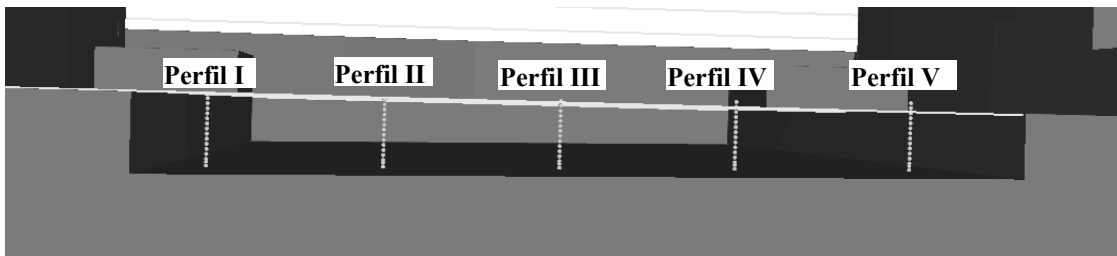


**Figura V-25.** Condición inicial establecida en el modelo de plataforma de ensayos de peligrosidad para personas

En cuanto a la condición inicial establecida, se ha optado por utilizar dos regiones de fluido; la primera ocupando completamente el depósito y la segunda ocupando la zona de plataforma correspondiente a la calzada, justo hasta el límite del bordillo. Establecer esta condición inicial

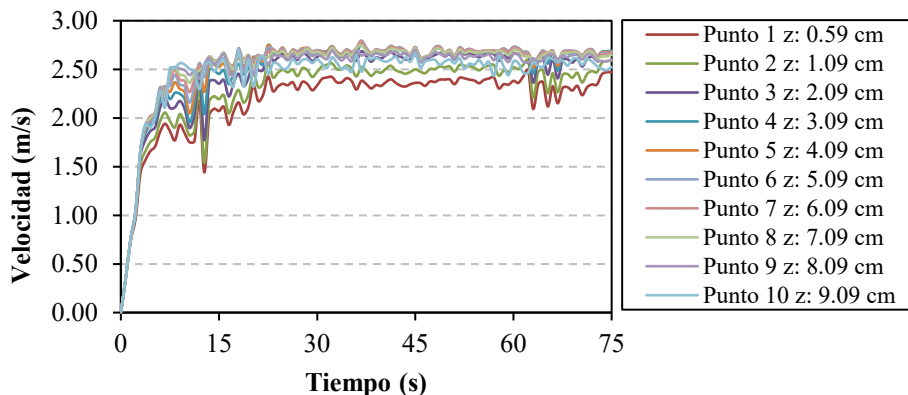
permite optimizar el tiempo de cálculo, puesto que el régimen transitorio de flujo se supera en menos tiempo, antes de llegar al estado estacionario.

Experimentalmente se obtuvieron perfiles de velocidad equiespaciados en una sección de cálculo situada a 74 cm del final de la plataforma. Flow-3D permite establecer “probes”, que no son más que puntos en los que se pueden obtener ciertas variables en el postproceso, una vez realizada la simulación. Se han colocado “probes” en la misma localización de los puntos de medida experimental de velocidad (Capítulo III, apartado III.4.2), de manera que se puedan obtener los perfiles de velocidad numéricos y puedan ser comparados con los experimentales. La variable a obtener en el postproceso será la velocidad en dirección “y” según eje de coordenadas de Flow-3D.



**Figura V-26.** Probes colocadas en diferentes alturas según la posición de cada perfil de velocidades

La variable de velocidad en la dirección “y” es un dato temporal, y por lo tanto se propone un valor promediado en el tiempo de dicha variable desde el segundo 20 hasta el final de la simulación (75 s). En la Figura V-27 se observa como a partir del segundo 20 aproximadamente la velocidad deja de crecer y pasa a oscilar a partir de un valor medio. En esta gráfica se muestra la variación de la velocidad en el tiempo para los diez puntos más profundos del primer perfil de velocidades.



**Figura V-27.** Variación de velocidades en cada punto del perfil I durante el tiempo de simulación

Se representa en los gráficos de la Figura V-28, los perfiles de velocidad experimentales, numéricos y teóricos, así como los calados experimentales y teóricos. Se observa un gran ajuste, especialmente en los perfiles II y III.

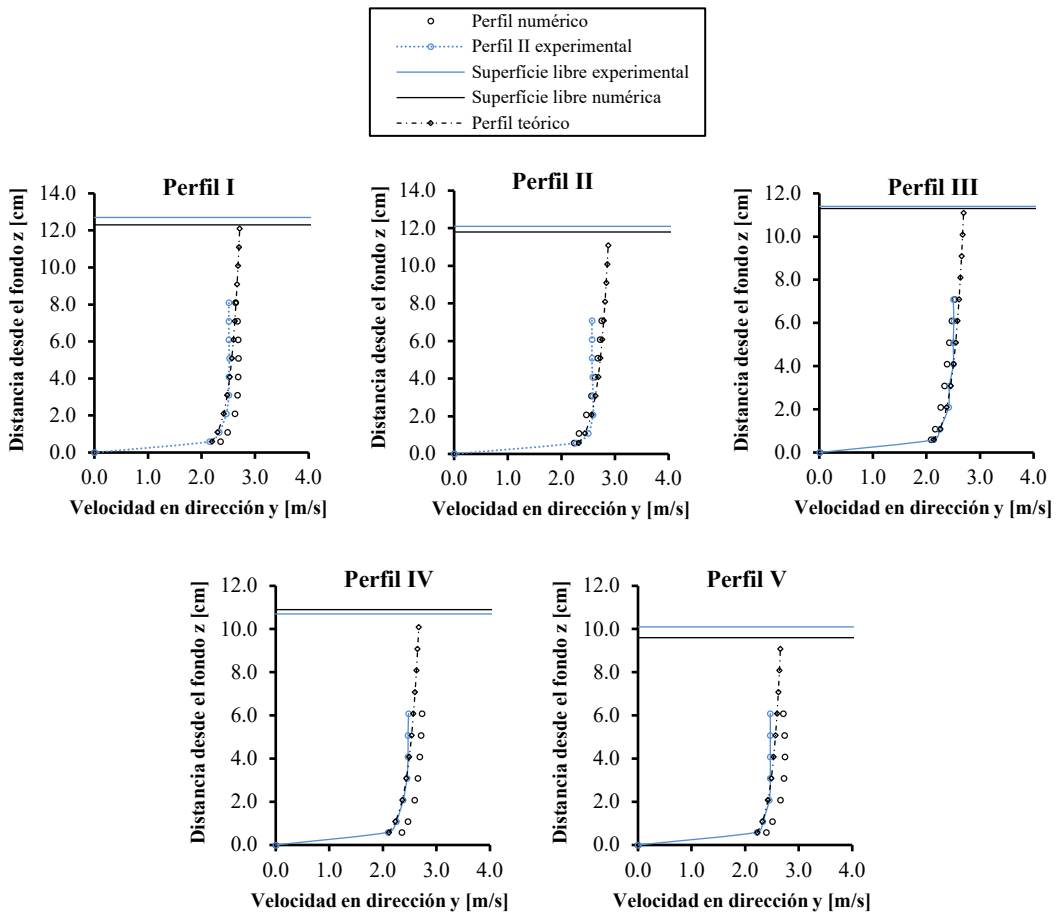


Figura V-28. Ajuste de perfiles de velocidad

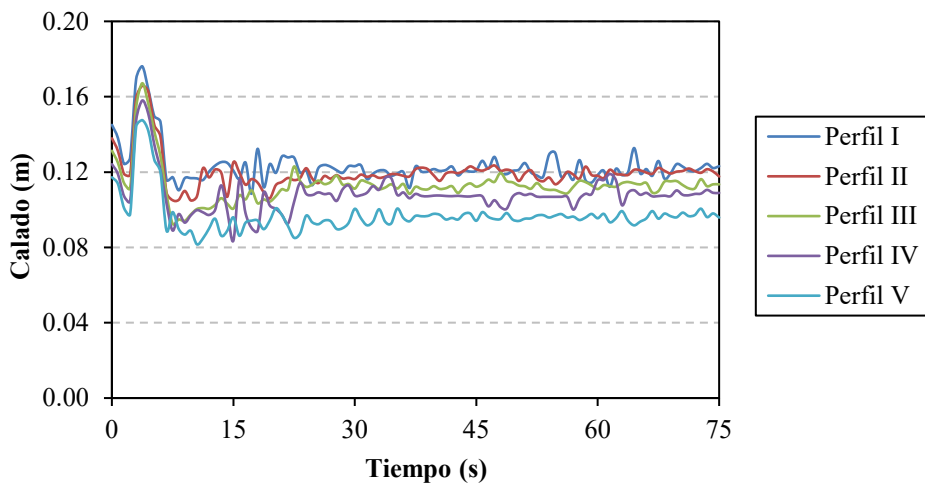


Figura V-29. Variación de calados en la posición de cada perfil durante el tiempo de simulación

El proceso de calibración del modelo se ha llevado a cabo a partir de la definición del mallado, el modelo de turbulencia y el ajuste del valor de la rugosidad. Una vez elegido el modelo de turbulencia y realizado un mallado apropiado en la zona de interés, se ha modificado el valor de la rugosidad hasta que los perfiles de velocidades numéricos y experimentales se ajustaban adecuadamente. Además, se ha comprobado el ajuste del calado en las posiciones de cada perfil entre el valor experimental y numérico. El calado obtenido también se presenta como un valor medio desde el segundo 32 (viéndose una cierta estabilización) hasta el 75 (Figura V-29).

Atendiendo a la región intermedia de un flujo en lámina libre, la influencia del fondo, así como la de la superficie es muy baja. En dicha zona se da el proceso denominado inercial, donde la producción de energía es igual a la disipación (Nakagawa *et al.*, 1993). En dicha zona las velocidades se comportan según la ley universal de distribución de velocidades de Prandtl-Von Kármán, de forma que la velocidad en la región turbulenta (intermedia) sigue una función logarítmica de la distancia  $y$ ,

$$\frac{v(y)}{u^*} = \frac{1}{K} \cdot \ln\left(\frac{y}{k_s}\right) + A_r \quad [\text{V-47}]$$

siendo,

$v(y)$ : velocidad a una profundidad  $y$

$u^*$ : velocidad de corte

$K$ : constante de Von Kármán

$y$ : distancia desde el fondo de la plataforma

$k_s$ : altura de rugosidad

$A_r$ : constante aditiva (8.5 según Schlichting (1979))

Dicha ley fue verificada mediante varios experimentos, como los llevados a cabo por Nikuradse (1950). En dichos experimentos se adhirieron granos de arena a las paredes internas de una tubería para simular la rugosidad (rugosidad artificial). Los resultados obtenidos indicaron una similitud notable entre las distribuciones observadas y calculadas y, por consiguiente, ofrece una justificación razonable para el uso de esta ley logarítmica en problemas prácticos. A pesar de ser deducciones obtenidas a partir de ensayos con tuberías, se asume que es permisible aplicar la ley universal de velocidades a otros casos de flujo turbulento, utilizando las constantes determinadas en pruebas en tuberías circulares. La propuesta de Nikuradse (1950) es la siguiente:

$$\frac{v(y)}{u^*} = \frac{1}{K} \cdot \ln\left(\frac{30 \cdot y}{k_s}\right) \quad [\text{V-48}]$$

Correspondiendo  $k_s$  en este caso al diámetro medio de los granos de arena utilizados por Nikuradse (1950). Se conoce específicamente como rugosidad de arena de Nikuradse. La expresión [V-48] puede ser reescrita de la siguiente manera:

$$v(y) = 2.5 \cdot u^* \cdot \ln(y) - 2.5 \cdot u^* \cdot \ln\left(\frac{30}{k_s}\right) = A \cdot \ln(y) + B \quad [\text{V-49}]$$

A partir de esta reagrupación de términos es posible realizar un ajuste lineal de los valores de velocidad obtenidos experimentalmente, representando en el eje de las ordenadas el valor de la velocidad y en el de las abscisas el logaritmo natural de la posición del punto de medida con respecto del fondo de la plataforma Figura V-30. Se han utilizado valores de velocidad hasta el momento que ésta se estabilizaba en cada perfil.

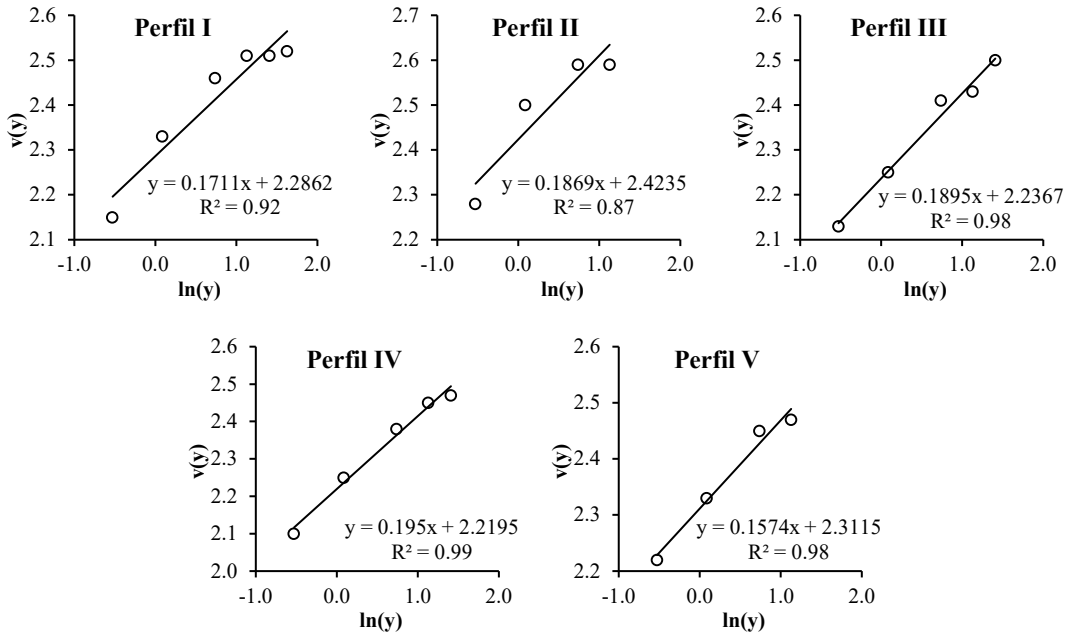


Figura V-30. Ajuste lineal de velocidades experimentales según  $v(y)$  frente  $\ln(y)$

De esta manera se obtiene para cada perfil los valores de A y B de la expresión [V-49], los cuales se representan en las gráficas de la Figura V-28 (perfil teórico) junto con los perfiles experimentales y numéricos (Flow-3D). Se observa una cierta desviación del perfil numérico para los perfiles más próximos a los bordillos, pero de manera poco sensible siendo, por tanto, resultados suficientemente correctos para el objeto del presente análisis.

Una vez calibrado el modelo, simplemente se incorpora la figura de un peatón cruzando el modelo, como si se tratara de uno de los sujetos ensayados. Se pretende únicamente analizar el comportamiento hidráulico del flujo de agua cuando un peatón cruza una calle inundada, así como evaluar la fuerza de arrastre del agua que éste recibe sobre los tobillos. En este caso se coloca la silueta de una persona (Figura V-32) en el centro de la calle como un componente independiente, pero sin que éste tenga ningún grado de libertad (no se trata de un GMO) (Figura V-33).

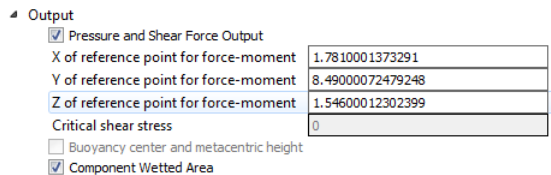


Figura V-31. Activación de las fuerzas de presión y de corte sobre el peatón



Se activa en la propiedad OUTPUT las fuerzas ejercidas sobre el componente en cuestión, de manera que una vez realizado el cálculo se puedan obtener las fuerzas que el agua ha ejercido sobre el peatón durante el tiempo de simulación.

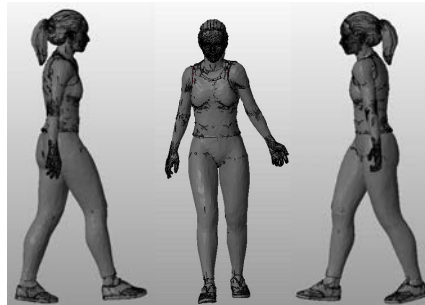


Figura V-32. Silueta tridimensional de la persona tenida en cuenta en la simulación

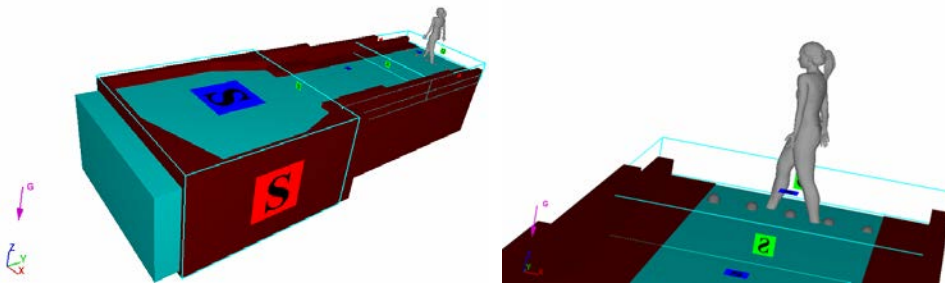


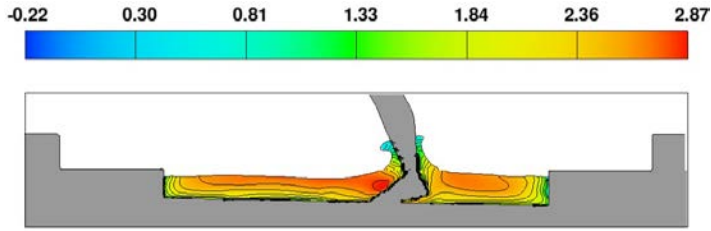
Figura V-33. Silueta tridimensional de una persona ubicada en la sección de trabajo de la plataforma de ensayos realizada en Flow-3D

### V.5.2. *Discusión de los resultados de las simulaciones basada en estabilidad de personas*

Tras la calibración del modelo realizado en Flow-3D a partir de los resultados experimentales del modelo físico de la plataforma de ensayos, se presentan en este apartado los resultados y conclusiones sobre el caso escogido, con un caudal de 450 l/s y una pendiente longitudinal del 4%. Las medidas de velocidad obtenidas mediante el velocímetro ADV son de gran utilidad y permiten conocer con mucho detalle la distribución de velocidades en la sección de trabajo. La simulación realizada en este caso ofrece mucho mayor detalle en cuanto al campo de velocidades en dicha sección y proporciona, además, el conocimiento de todas las variables hidráulicas en cualquier posición del modelo para cualquier instante de tiempo. La simulación realizada responde a 75 segundos reales que supusieron más de 10 días de cálculo.

La incorporación de la figura de un peatón cruzando la calle, aporta información referente a las zonas de velocidad máxima cuando los pies y parte de las piernas están introducidas en el flujo de agua y de especial interés es la obtención de la fuerza que el agua realmente está ejerciendo sobre los tobillos de las personas. En la Figura V-34 se han representado las velocidades en la dirección longitudinal de la calle para un instante de tiempo ( $t=60s$ ) considerando uno de los pies del peatón.

Se observa que la velocidad máxima se da puntualmente en general sobre el empeine del pie contrario al de apoyo, en torno a los 3 m/s.

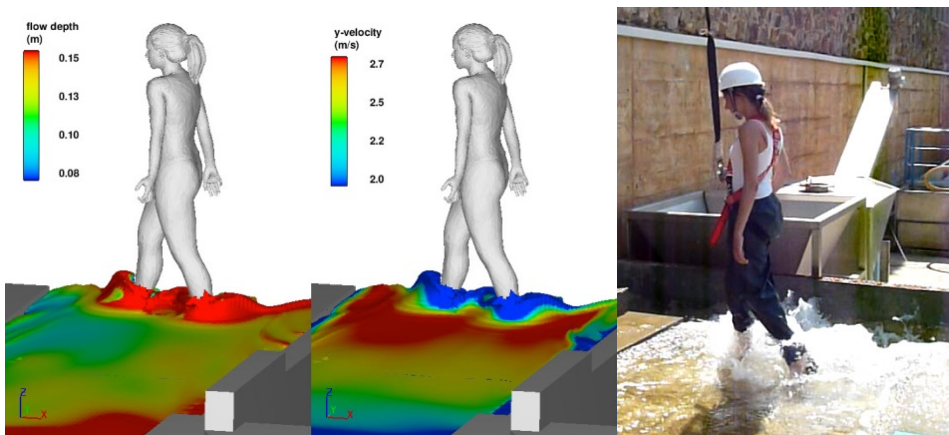


**Figura V-34.** Isotacas en las secciones donde el peatón pisa (desde aguas arriba a aguas abajo) obtenidas mediante Flow-3D.  $Q=450\text{l/s}$   $I_y: 4\%$   $t=60\text{s}$ . Velocidades en metros por segundo

El caso simulado numéricamente supuso una inestabilidad en los ensayos experimentales, para una persona de género femenino, de 1.67 m de altura y 65 kg de peso, en buenas condiciones de visibilidad, manos desocupadas y llevando chanclas (Figura V-35).

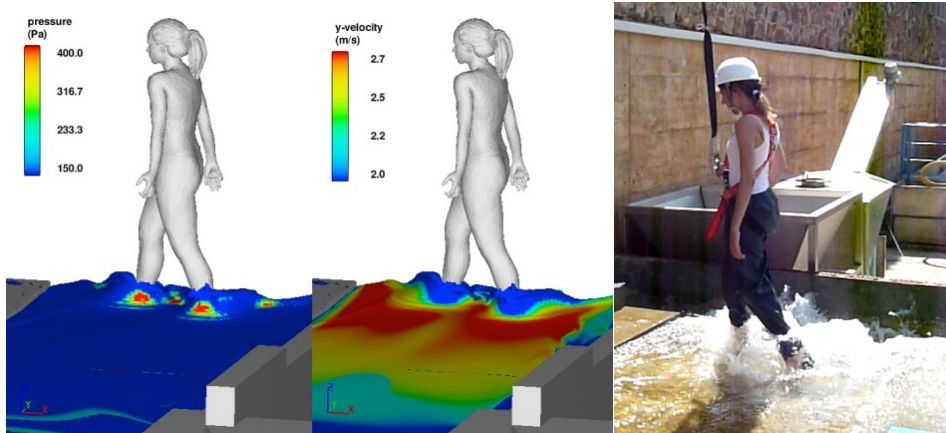


**Figura V-35.** Perdida de estabilidad del sujeto ensayado, para 4% de pendiente longitudinal y un caudal de 450 l/s

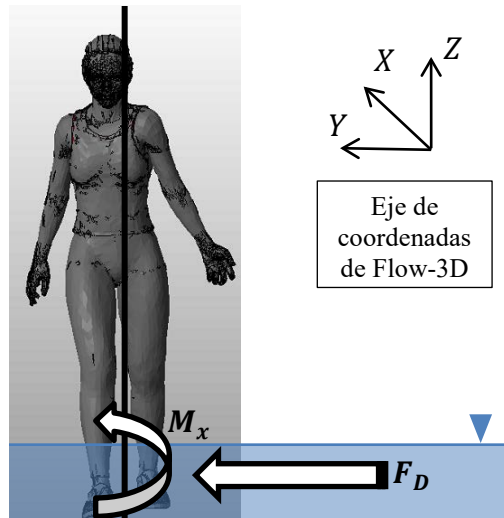


**Figura V-36.** Vista tridimensional de una persona expuesta a un flujo de agua. Representación del calado y de la velocidad en la dirección longitudinal de la calle. Instante de simulación  $t=30\text{s}$

Las condiciones hidráulicas que generaron esta inestabilidad fueron una velocidad media ( $\bar{v}$ ) de 2.5 m/s y un calado máximo ( $y_{\max}$ ) de 12.9 cm junto al bordillo más alto. Se observa en la Figura V-36 como los valores de las variables hidráulicas determinados mediante Flow-3D, calado y velocidad, rondan los valores obtenidos experimentalmente. El efecto sobre los tobillos de una persona en estas condiciones hidráulicas supone que se ejerza una presión localizada de unos 400 Pascales ( $\text{N}/\text{m}^2$ ) (Figura V-37).



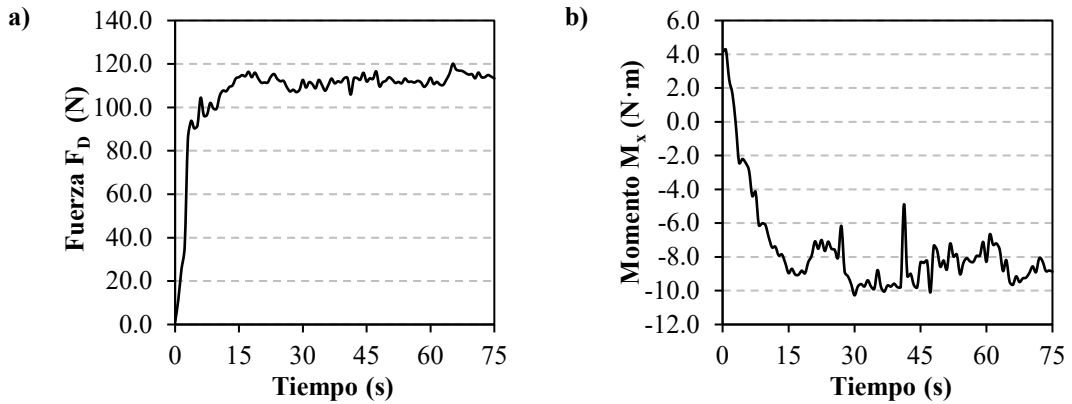
**Figura V-37.** Vista tridimensional de una persona expuesta a un flujo de agua. Representación de la presión ejercida por el agua y de la velocidad en la dirección longitudinal de la calle. Intante de simulación  $t=45\text{s}$



**Figura V-38.** Esquema de Fuerza y Momento ejercidos sobre un peatón

La presión aplicada sobre los tobillos del peatón, integrando sobre la superficie aplicada, supone una fuerza de arrastre sobre la persona oscilante en el tiempo (Figura V-39a) de un valor promedio aproximado de 113 N. También se obtiene mediante Flow-3D el valor instantáneo del momento aplicado ( $M_x$ , siendo  $y$  la dirección principal de flujo y  $x$  la perpendicular a ésta en el

plano horizontal) sobre el eje vertical de la figura del peatón (Figura V-39b y Figura V-38), resultando un valor promedio de  $-8.32 \text{ N}\cdot\text{m}$ . En condiciones de bajo calado y altas velocidades, según se observó experimentalmente, la pérdida de estabilidad se producía esencialmente por deslizamiento. Parece razonable que la inestabilidad por vuelco se produzca para momentos muy superiores, resultado de calados mayores a los considerados en los ensayos o con velocidades extraordinariamente altas, también superiores a las contempladas.



**Figura V-39.** Variación de: a) Fuerza de arrastre y b) Momento ejercido sobre el peatón, a lo largo del tiempo simulación

Durante la campaña experimental para el análisis de inestabilidades de personas en flujos de agua, se determinaron los coeficientes de rozamiento entre los diferentes calzados utilizados y el hormigón mojado (Tabla V-1), encontrándose valores comprendidos entre 0.44 y 0.69.

**Tabla V-1** Coeficientes de rozamiento determinados experimentalmente

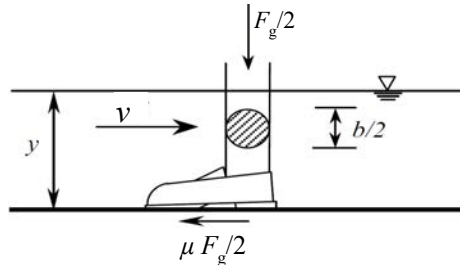
Calzado	$M_z \text{ (g)}^*$	$\frac{F_R}{g} \text{ (g)}^*$	$\mu$
Zapato tacón	208.0	110.0	0.53
Chancla	68.0	30.0	0.44
Zapato plano	270.0	185.0	0.69
Bota de agua	434.0	250.0	0.58

\*Las unidades obtenidas por la balanza de resorte son gramos, con lo que se trata de una fuerza dividida entre el valor de la aceleración de la gravedad.

En la bibliografía pueden encontrarse tablas de propiedades de materiales (Gieck, 1981), donde se indica que el coeficiente de fricción entre el caucho y el hormigón húmedo es igual a 0.5, cuyo valor está comprendido entre el rango de valores determinado experimentalmente. Este valor de coeficiente de rozamiento ( $\mu=0.5$ ) fue el considerado por Nanía (1999) cuando propuso el esquema simplificado de inestabilidad de peatones por deslizamiento (Figura V-40).

En el trabajo de Chang *et al.* (2001) se determinaron coeficientes de rozamiento para 16 materiales típicos de calzados en tres tipos de superficie de suelo, en seco, con agua y con aceite. El análisis de los coeficientes de rozamiento se llevó a cabo a partir de dos medidores diferentes (English XL y Brungraber Mark II). Para el primero los resultados obtenidos fueron en promedio

0.73, 0.28 y 0.52 sobre cerámica, acero y vinilo respectivamente. Los resultados obtenidos con el Brungraber Mark II fueron de 0.47, 0.15 y 0.29 sobre cerámica, acero y vinilo respectivamente. Se concluyó por tanto que la diferencia entre ambos era demasiado elevada para obtener conclusiones relevantes y se requería el ensayo de muchas más muestras.



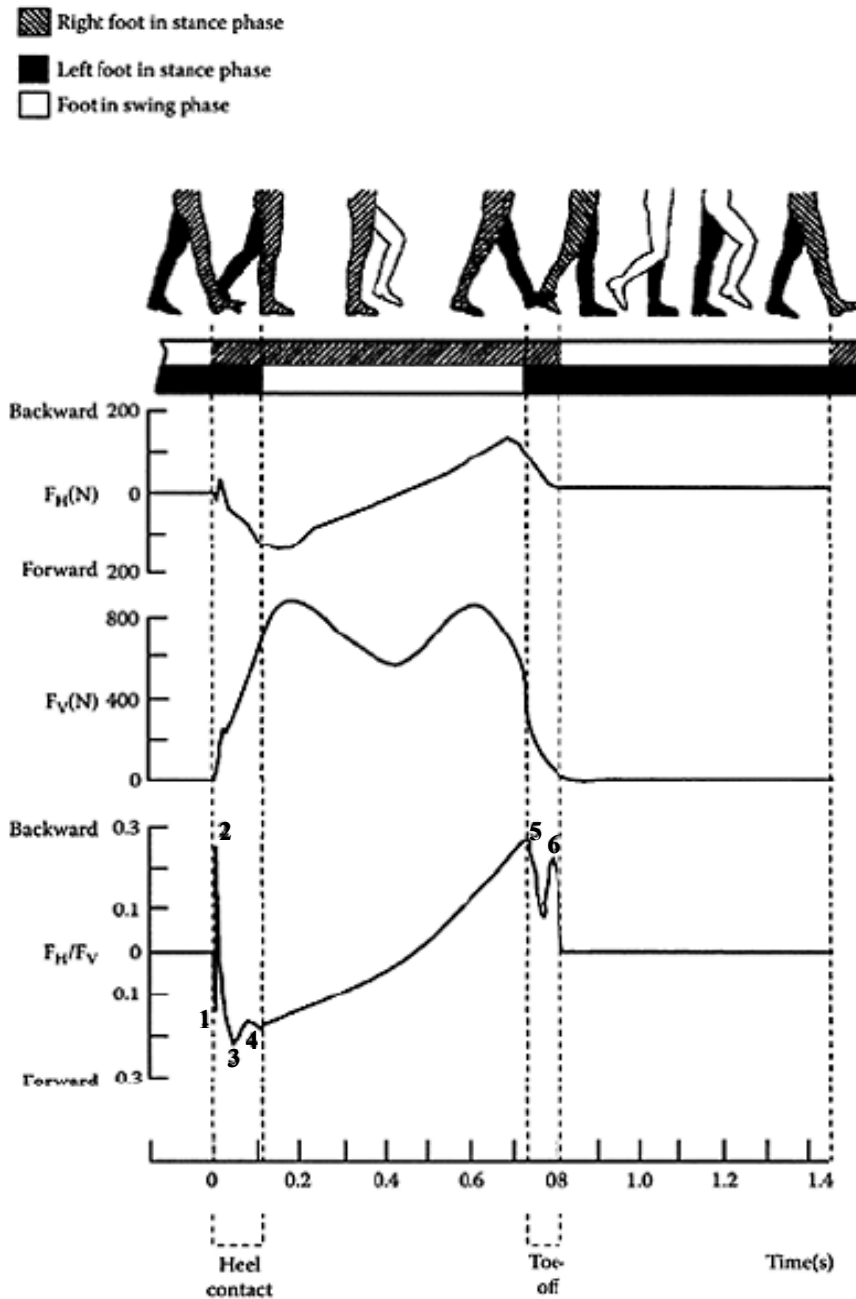
**Figura V-40.** Esquema de inestabilidad por deslizamiento propuesto por Nanía (1999)

La inestabilidad por deslizamiento se producirá cuando la fuerza de arrastre del agua ( $F_D = F_H$ ) sea igual o superior a la fuerza de rozamiento ( $F_R = \mu F_V$ ) ejercida en el contacto entre el calzado y el terreno. En este sentido, el coeficiente de rozamiento viene dado por la ratio entre la fuerza horizontal y vertical ( $\mu = F_H/F_V$ ). Sin embargo, realizando un análisis más detallado sobre la forma de caminar de una persona (sin verse sometida a la fuerza de arrastre del agua) se observa que las reacciones de fuerza horizontal y vertical y su ratio ( $F_H/F_V$ ) están sujetos a grandes variaciones durante las diferentes posturas (Haslam *et al.*, 2006).

Desde el punto de vista del deslizamiento existen dos fases críticas (Perkins, 1978; Strandberg *et al.*, 1981; Strandberg, 1983; Perkins *et al.*, 1983), la primera es el primer contacto del talón en el cambio del pie de apoyo (Figura V-41 punto 3 y 4); y la segunda se da cuando solo hay contacto entre la suela del zapato y el terreno por la parte trasera (Figura V-41 punto 5 y 6).

La fase de contacto con el talón se considera más crítica en cuanto a la estabilidad y más peligrosa en relación al deslizamiento. El motivo es que el momento hacia adelante mantiene el peso del cuerpo en el pie de apoyo con la posibilidad de un deslizamiento hacia adelante en los puntos 3 y 4. Un deslizamiento hacia atrás, que se produciría en los puntos 5 o 6, es más fácilmente evitable porque la mayor parte del peso del cuerpo ya se ha transferido hacia adelante desde el pie trasero de deslizamiento (5 o 6) al pie delantero.

Por tanto, parece que la determinación del coeficiente de rozamiento del calzado de forma estática ofrece valores no demasiado representativos, atendiendo a la variación del ratio entre la reacción horizontal y vertical que se produce durante los movimientos de una persona caminando. No se ha encontrado ningún método universalmente aceptable o fiable de medición del rozamiento entre un zapato y el suelo y en pocas investigaciones se proponen métodos capaces de medir el coeficiente de rozamiento cuando el calzado está puesto en la persona y ésta camina.



**Figura V-41.** Fases durante la marcha de una persona caminando, reacción horizontal y vertical del terreno y ratio entre ellas (Haslam *et al.*, 2006)

En los estudios de Manning *et al.* (1990) se llevó a cabo una campaña experimental para determinar el coeficiente de rozamiento para diferentes calzados y para diferentes superficies de contacto. El número de calzados fue de 3 pares pero realizaron 10 tratamientos para modificar la rugosidad de la suela de éstos, y las superficies por donde las personas caminaban fueron tres,

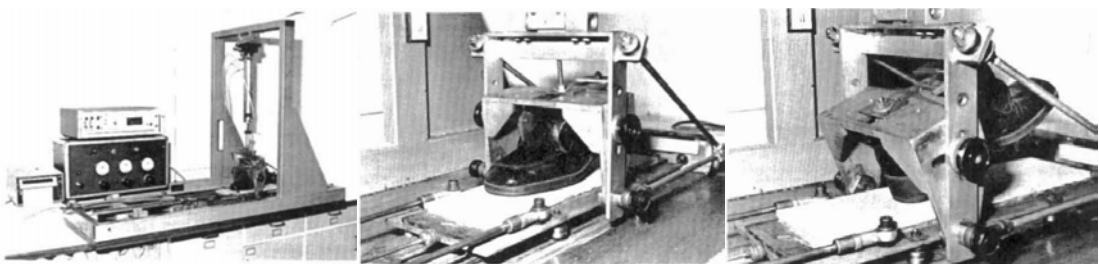
acero, vinilo fino y plástico rugoso. Los zapatos eran de suela continua, como los usados para jugar a bolos, de manera que no presentaban nada de tacón. Las rugosidades absolutas iban desde  $3.6 \mu\text{m}$  hasta  $25.4 \mu\text{m}$  según el tratamiento realizado a la suela.

El procedimiento consistía en que la persona caminara, en cada caso llevando un calzado diferente y sobre un suelo distinto, con un cable tensor atado y se tomaban las medidas de la fuerza que la persona iba realizando sobre su marcha hasta llegar a una fuerza máxima (30 kg en el mayor de los casos) con la que se producía el deslizamiento (Figura V-42). El coeficiente de rozamiento se determinaba a partir de la ratio entre dicha fuerza (en kg) y el peso de la persona (en kg). El máximo coeficiente de rozamiento obtenido fue de 0.43.



**Figura V-42.** Configuración de los ensayos llevados a cabo por Manning *et al.* (1990)

Wilson *et al.* (1985) afirmaron que se debe distinguir entre el coeficiente de rozamiento estático y dinámico. El primero está relacionado con la fuerza necesaria para empezar a deslizarse y depende del tiempo de contacto y de la carga vertical. El segundo depende de la fuerza necesaria para que continúe deslizando una vez se ha producido el movimiento y éste depende de la velocidad de deslizamiento. Llevaron a cabo ensayos de laboratorio, en los que determinaban el coeficiente de rozamiento estático y mostraban cómo variaba el dinámico acelerando un zapato en contacto con una superficie (Figura V-43). Para un calzado de suela de PVC se obtuvo un coeficiente estático de 0.69 ( $>20^\circ$ ) sobre cerámica mojada y 0.22 ( $2.5^\circ$ ) sobre acero mojado. Para suelas de caucho se obtuvo un coeficiente estático de 0.37 ( $2.5^\circ$ ) sobre cerámica mojada y 0.72 ( $>20^\circ$ ) sobre acero mojado.



**Figura V-43.** Test de laboratorio para determinar el rozamiento entre la suela del zapato y diferentes superficies, llevado a cabo por Wilson *et al.* (1985)

El coeficiente de rozamiento estático indicará pues el inicio de movimiento, pero el dinámico indica el nivel de peligrosidad del deslizamiento. De esta manera con un coeficiente de rozamiento dinámico bajo, se tendrá siempre una alta probabilidad de producirse un deslizamiento de elevada peligrosidad. Por otro lado, llevaron a cabo ensayos con personas, utilizando para ello una rampa que incrementaba el ángulo de inclinación y sobre la que andaba la persona ensayada hasta perder la estabilidad por deslizamiento. Este método es similar al que fue llevado a cabo en esta investigación para determinar el coeficiente de rozamiento de los neumáticos de los modelos de vehículos con la superficie de los ensayos de estabilidad de vehículos (Capítulo IV).



**Figura V-44.** Test de rampa SATRA para determinar el rozamiento entre la suela del zapato y diferentes superficies, llevado a cabo por Wilson *et al.* (1985)

En promedio se obtuvieron buenas correlaciones entre ambos coeficientes obtenidos mediante el test de laboratorio y el ángulo de la rampa. Se concluyó por tanto que los resultados obtenidos mediante el test de laboratorio eran suficientemente próximos a los que se obtienen cuando una persona sufre un deslizamiento cuando camina. En algunos casos la correlación del coeficiente de rozamiento estático se ajustaba mejor que el dinámico con el ángulo de inclinación de la rampa y en otros se producía a la inversa dependiendo de la superficie sobre la que apoyaba el zapato. Esto indicaba la importancia de ambos coeficientes de rozamiento.

En los estudios de Fong *et al.* (2009), se propuso un coeficiente de rozamiento dinámico límite de 0.41, a partir del cual las personas sentían inseguridad debido al deslizamiento y empezaban a andar con precaución, de manera no natural. En este sentido, si las condiciones de rozamiento cambian drásticamente, la persona no consigue adaptar su manera de caminar y se produce la caída por inestabilidad debida al deslizamiento. Proponen como límite inferior un valor de 0.2 a partir del cual el deslizamiento se prevé inevitable. También otros autores (Haslam *et al.*, 2006) proponen que el umbral de seguridad del coeficiente de rozamiento para una persona caminando se encuentra entre valores comprendidos por 0.15 y 0.3, horquilla en la que se encuentra el valor límite propuesto por Fong *et al.* (2009), por debajo de los cuales se prevé el deslizamiento de una persona.

Por tanto, parece razonable pensar que el coeficiente de rozamiento determinado experimentalmente, para el calzado utilizado en los ensayos, presenta valores por encima de los



que realmente se deberían tener cuando una persona camina. Por otro lado, los estudios llevados a cabo hasta el momento en este sentido contemplan únicamente las fuerzas propias de la acción de caminar, presentándose en este caso una mayor complejidad al tenerse en cuenta la fuerza del agua actuando sobre los tobillos de las personas mientras caminan, actuando además en diferentes direcciones dependiendo de la trayectoria de desplazamiento con respecto a la dirección del flujo. En cualquier caso, se acepta como razonable que los deslizamientos serán prácticamente inevitables cuando se dé un coeficiente de rozamiento de 0.15 o inferior y se producirá o no deslizamiento, dependiendo de la habilidad de la persona, cuando el valor del coeficiente de rozamiento se encuentre entre 0.15 y 0.41.

Dada la fuerza de  $F_D = 113 \text{ N}$  ejercida sobre la silueta del peatón en la simulación llevada a cabo, es posible, a partir del criterio de estabilidad por deslizamiento, determinar el coeficiente de rozamiento que ha ocasionado la inestabilidad por deslizamiento de una persona de peso  $P$  siendo expuesta a un flujo que le genera una fuerza de arrastre  $F_D$ . Dicho criterio de estabilidad contempla el peso de la persona ( $P$ ), la fuerza actuante ( $F_D$ ) y el coeficiente de rozamiento ( $\mu$ ):

$$F_D = \mu \cdot P g$$

$$P = \frac{F_D}{\mu \cdot g} \quad [\text{V-50}]$$

En este caso simulado, la inestabilidad se produjo sobre un peatón de 65 kg de masa, lo cual supone un coeficiente de rozamiento de  $\mu=0.18$ , situado en el rango de 0.15-0.41 para el cual se asume una inestabilidad en función de la habilidad de la persona. El coeficiente de rozamiento se encuentra en este caso en la parte baja del rango.

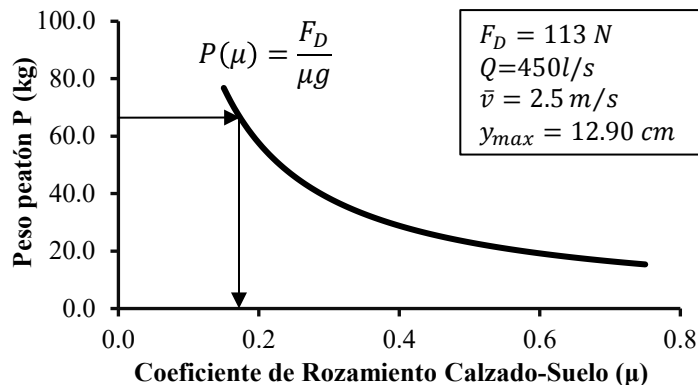


Figura V-45. Obtención de  $\mu$  a partir de la fuerza de arrastre del agua y el peso de la persona

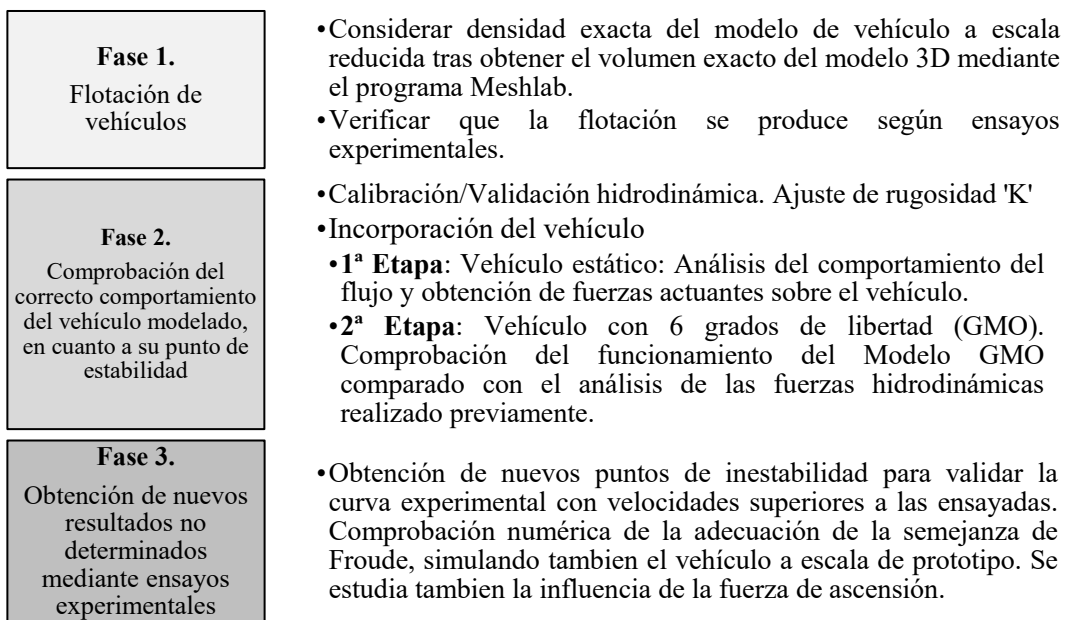
### V.5.3. Estudio de la estabilidad de vehículos. Desarrollo y calibración de los modelos propuestos

Para el análisis numérico de la estabilidad de vehículos se han llevado a cabo una serie de simulaciones centradas únicamente en uno de los modelos de los vehículos utilizados en los ensayos de laboratorio. El enfoque propuesto supone mayor complejidad que el caso anterior, incorporándose ahora el movimiento acoplado de un objeto (el vehículo) con el agua. Además, se

debe evaluar por un lado la flotación del vehículo, considerando una velocidad de aproximación del flujo de agua nula, y por otro la estabilidad del vehículo en condiciones habituales de inundación, en las que actúan conjuntamente la fuerza de empuje vertical y la de arrastre del agua sobre éste.

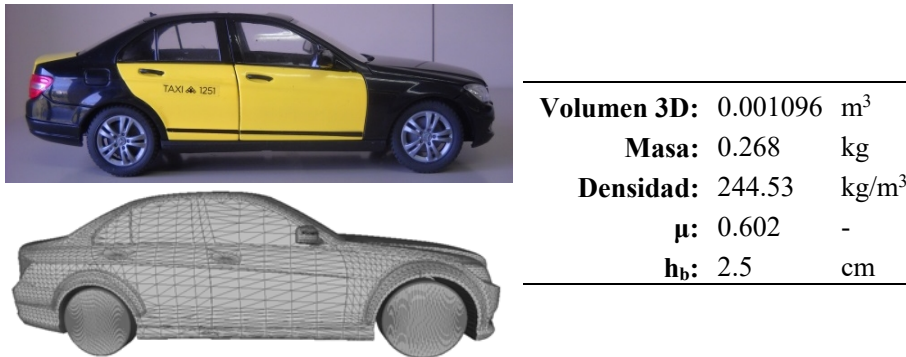
Hay que tener en cuenta que, aunque los modelos a considerar sean de menor tamaño que en el caso anterior, la precisión requerida es mucho mayor, lo que supone la consideración de gran cantidad de celdas y en consecuencia un gran coste computacional. Por lo tanto, las consideraciones comentadas y el tiempo de desarrollo de los modelos junto al de computación son tales que este estudio se centra en el análisis para un único modelo de vehículo.

El planteamiento de las simulaciones realizadas responde a tres fases diferenciadas, tal y como se muestra en la Figura V-46. Las Fases 1 y 2 siguen el mismo procedimiento que el llevado a cabo en los ensayos experimentales, de manera que inicialmente (Fase 1) se determina el calado de flotación del vehículo, para velocidad de flujo nula, y posteriormente (Fase 2) se determina el punto de inestabilidad del vehículo cuando se ve sometido a una corriente de agua. Tanto en la primera como segunda fase el objetivo principal es obtener la misma respuesta del vehículo que se obtuvo experimentalmente. En la Fase 1 se debe verificar que el vehículo flota para el calado de flotación experimental. En la Fase 2 se reproduce uno de los casos evaluados experimentalmente, modelando la pendiente local con el vehículo situado en la misma posición y orientación que cuando se produjo la inestabilidad y utilizando el mismo caudal de circulación por el modelo. Por último, se presenta la Fase 3 tras haber validado el comportamiento del vehículo, desarrollando un modelo simplificado que reproduzca condiciones hidráulicas que no fueron ensayadas y con la suficiente sencillez para minimizar al máximo posible el coste computacional de la simulación. De esta manera se pueden llevar a cabo varias simulaciones que aporten más puntos de inestabilidad para representar junto con aquellos obtenidos experimentalmente.



**Figura V-46.** Fases de las simulaciones llevadas a cabo, relacionadas con la inestabilidad de vehículos

En primer lugar, antes de llevar a cabo la Fase 1 (Flotación), se debe obtener el dibujo tridimensional del modelo de vehículo escogido, en este caso el Mercedes Clase C. Una vez obtenido el vehículo, depurado los errores y exportado con extensión stl, ya es posible su importación en Flow-3D. Algunas características del vehículo deben ser conocidas, como el volumen real del dibujo 3D y la masa. El primer dato se obtiene a partir de cualquier programa de dibujo 3D, habiéndose utilizado en este caso el programa de libre distribución Meshlab, y el segundo dato se obtuvo pesando el vehículo ensayado. A partir de esta información se puede obtener una densidad media del vehículo.



**Figura V-47.** Características del vehículo Mercedes Clase C (e: 1/18)

También se requiere información como el coeficiente de rozamiento entre el neumático y la superficie donde se ensayaron éste y el resto de modelos. Por último, el calado de flotación del modelo Mercedes Clase C se requiere a la hora de validar el comportamiento en cuanto a la flotación en la simulación numérica. Estas características se presentan en la Figura V-47, junto a la imagen del vehículo ensayado y su dibujo tridimensional.

Otra característica, relacionada con las ya comentadas, requerida por Flow-3D para definir un objeto móvil (GMO) es el tensor de inercia. Meshlab puede calcular dicho tensor de inercia asumiendo una densidad uniforme, y por lo tanto relativo al centro de masas. En caso de considerar una densidad no constante en el cuerpo del vehículo, el centro de gravedad no coincidiría con el centro geométrico y la obtención del Tensor de Inercia presentaría mayor complejidad. Por supuesto el centro de masas y el centro de gravedad también coinciden puesto que la gravedad es considerada constante. Seguidamente se presenta el tensor de inercia [V-51] del vehículo Mercedes Clase C a escala 1:18.

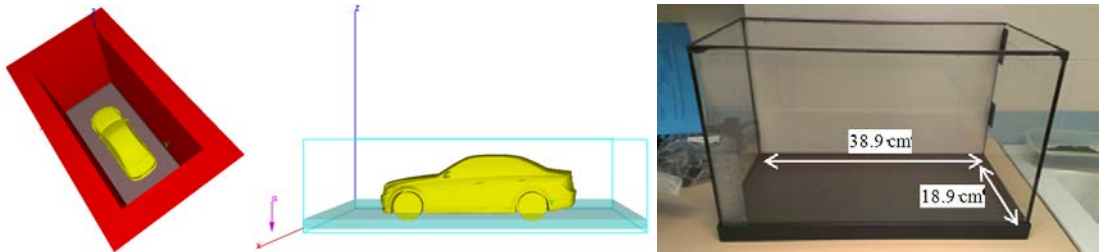
$$[J] = \begin{bmatrix} 2.63E-04 & 4.59E-07 & 4.48E-05 \\ 4.59E-07 & 1.21E-03 & 6.87E-08 \\ 4.48E-05 & 6.87E-08 & 1.29E-03 \end{bmatrix} [kg/m^2] \quad [V-51]$$

Flow-3D permite considerar, por un lado, la densidad constante del objeto móvil o por otro lado definir el tensor de inercia de dicho objeto. Cuando Flow-3D, gracias al método FAVOR, interpreta los cuerpos sólidos siempre se pierde una parte de volumen de éstos al simplificar los contornos, en mayor o menor medida dependiendo del tamaño de celda. Este hecho hace que aún y conociendo el volumen inicial del vehículo y su masa, la densidad constante, obtenida como división entre la masa y ese volumen inicial, computacionalmente se asocie a un volumen inferior.

En este sentido, se ha optado por utilizar el tensor de inercia con el que siempre se van a considerar las características del vehículo original.

### V.5.3.1. Fase 1: Flotación del vehículo

Una vez obtenidas las características del modelo 3D se inicia propiamente la **Fase 1** (ensayo de flotación). Para ello se realiza un dibujo 3D mediante el programa Google Sketchup de un recipiente con unas dimensiones interiores de 38.9 cm x 18.9 cm como las medidas del utilizado en los ensayos experimentales (Figura V-48).



**Figura V-48.** Preparación del modelo de flotación en Flow-3D y recipiente utilizado en los ensayos experimentales

Tras dibujarlo y exportarlo con formato stl, se importa en Flow-3D junto con el vehículo que se sitúa en el centro del recipiente. El mallado del modelo ha supuesto un millón de celdas de 3 mm y un tiempo de simulación aproximada de 13 horas para 10 segundos de cálculo. Se ha considerado un caudal de 0.5 l/s a partir de una fuente de masa con las dimensiones exactas del suelo interior del recipiente.

La simulación se considera válida si cuando el agua alcance un calado de 2.5 cm (45 cm en prototipo), tal y como se determinó experimentalmente, el vehículo pierde el contacto de las cuatro ruedas con el suelo. Para reducir el tiempo de cálculo se ha considerado una condición inicial de 5 mm de agua en el recipiente.

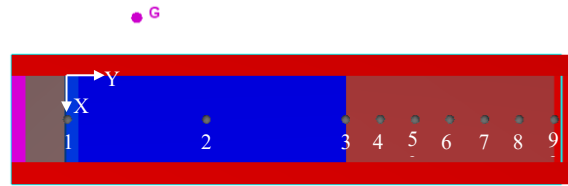
### V.5.3.2. Fase 2: Comprobación del correcto comportamiento del vehículo

Una vez validado el comportamiento del vehículo en cuanto a flotación, se puede iniciar la **Fase 2** para evaluar que la estabilidad del vehículo corresponde a la obtenida en los ensayos experimentales, cuando el vehículo se ve sometido no solo a la fuerza de empuje vertical sino también a la de arrastre del agua.

En esta fase, antes de la incorporación del vehículo, se debe realizar una **calibración hidrodinámica** del modelo. El parámetro a ajustar es la rugosidad absoluta  $K$  que Flow-3D considera en el cálculo. Para ello en el modelo físico se marcaron 9 puntos a lo largo de su eje central tal y como se indica en la Tabla V-2, en los que se tomaron medidas de calado mediante limnómetro. Se ensayaron dos caudales en régimen permanente, el primero de 6 l/s y el segundo de 17 l/s, siendo el primero de ellos el de calibración del modelo y el segundo el de validación.

**Tabla V-2** Ubicación de los puntos de calibración en el modelo de pendiente local

Punto	Coordenadas Puntos de Calibración		
	X	Y	Z
1	0.3	0	0.31
2	0.3	1	0.23
3	0.3	2	0.15
4	0.3	2.25	0.15
5	0.3	2.5	0.15
6	0.3	2.75	0.15
7	0.3	3	0.15
8	0.3	3.25	0.15
9	0.3	3.5	0.15



Los valores de rugosidad considerados fueron de  $K_1=2 \cdot 10^{-4}$  m,  $K_2=5 \cdot 10^{-5}$  m,  $K_3=1 \cdot 10^{-5}$  m y  $K_4=3 \cdot 10^{-7}$  m. Según diferentes autores (Sotelo, 1995; Lencastre, 1998; Bossler, 1990) para conducciones de acero galvanizado un valor habitual de rugosidad absoluta sería de  $1 \cdot 10^{-5}$  m, con lo cual, observando en la Tabla V-3 que la sensibilidad del modelo para valores inferiores a éste es insignificante, se opta por adoptar este valor para considerar valido el modelo y utilizarlo en las sucesivas simulaciones.

**Tabla V-3** Resultados de la calibración hidrodinámica del modelo Flow-3D para un caudal de 6 l/s

Punto	Exp. Y (m)	F-3D (rug: $2 \cdot 10^{-4}$ m)		F-3D (rug: $5 \cdot 10^{-5}$ m)		F-3D (rug: $1 \cdot 10^{-5}$ m)		F-3D (rug: $5 \cdot 10^{-6}$ m)		F-3D (rug: $3 \cdot 10^{-7}$ m)	
		Y (m)	Er. (%)	Y (m)	Er. (%)	Y (m)	Er. (%)	Y (m)	Er. (%)	Y (m)	Er. (%)
1	0.0275	0.0328	19%	0.0328	19%	0.0282	3%	0.0282	3%	0.0282	3%
2	0.0107	0.0102	-5%	0.0094	-12%	0.0092	-14%	0.0091	-14%	0.0091	-14%
3	0.0081	0.0105	30%	0.0100	24%	0.0096	19%	0.00963	19%	0.0095	18%
4	0.0095	0.0112	18%	0.0104	10%	0.0102	8%	0.01026	8%	0.0102	8%
5	0.0111	0.0119	8%	0.0110	-1%	0.0107	-3%	0.01083	-2%	0.0107	-3%
6	0.0121	0.0133	10%	0.0117	-3%	0.0115	-5%	0.01162	-4%	0.0116	-4%
7	0.0116	0.0142	23%	0.0130	12%	0.0130	13%	0.01268	9%	0.0127	10%
8	0.0131	0.0154	18%	0.0135	3%	0.0132	1%	0.01287	-2%	0.0129	-1%
9	0.0120	0.0166	39%	0.0142	19%	0.0137	15%	0.01350	13%	0.0131	10%

Los resultados obtenidos para la validación del modelo fueron incluso más aceptables que los de calibración, con errores por debajo del 8% (Tabla V-4). Posiblemente se debe a que el calado era significativamente superior e inducía a menos error tanto en la medición experimental como en el cálculo numérico.

**Tabla V-4** Resultados de la validación hidrodinámica del modelo Flow-3D ( $Q=17$  l/s)

Punto	Exp. Y (m)	F-3D (rug: $1 \cdot 10^{-5}$ m)	
		Y (m)	Er. (%)
1	0.0543	0.0582	7%
2	0.0217	0.0210	-3%
3	0.0193	0.0193	0%
4	0.0201	0.0198	-1%
5	0.0209	0.0202	-3%
6	0.0215	0.0208	-3%
7	0.0205	0.0218	6%
8	0.0210	0.0226	8%
9	0.0203	0.0217	7%

Para estas simulaciones se ha considerado un modelo de turbulencia  $k-\omega$  que, como se aprecia en la calibración y validación del modelo (Figura V-49 y Figura V-50), ofrece resultados bastante satisfactorios y no se considera necesaria la comprobación de otros modelos de turbulencia en esta fase.

Se observa en la Figura V-49 y Figura V-50 el ajuste llevado a cabo en el proceso de calibración, y el buen ajuste también en la validación de éste con un caudal de 17 l/s. No se aprecia cambio en la lámina libre cuando la rugosidad baja del valor  $K=1 \cdot 10^{-5}$  m. Se presenta una línea continua que delimita la superficie libre experimental, y una línea a trazos que une los puntos numéricos resultado de la simulación con la menor de las rugosidades ( $K_4=3 \cdot 10^{-7}$ ).

Una vez definida la rugosidad a adoptar en el modelo, que reproduce de manera óptima el comportamiento hidrodinámico en éste, ya se puede proceder a la incorporación del vehículo en el modelo. En la Tabla V-5 se recogen los resultados de las variables hidráulicas que generaron el desplazamiento del vehículo Mercedes Clase C (e: 1/18).

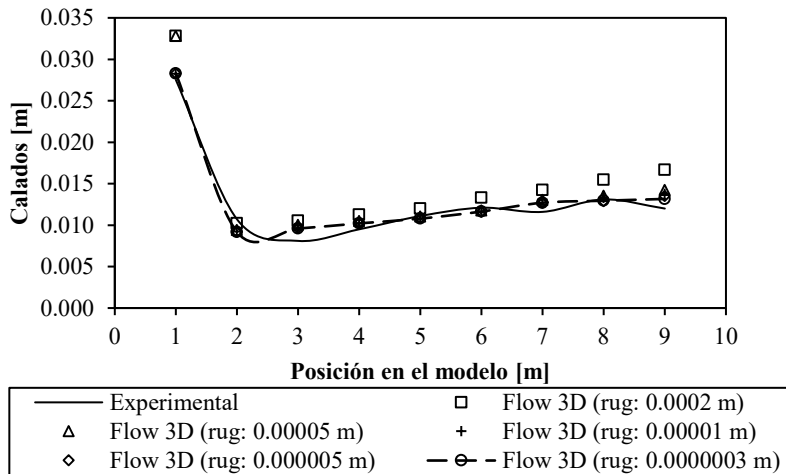


Figura V-49. Calibración hidrodinámica del modelo Flow-3D para un caudal de 6 l/s

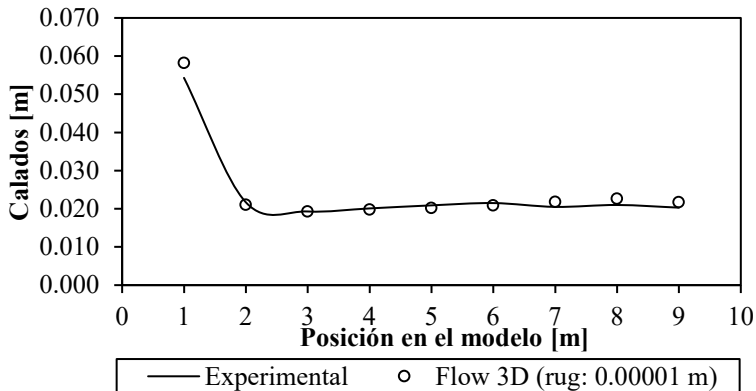


Figura V-50. Validación hidrodinámica del modelo Flow-3D para un caudal de 17 l/s

Cada combinación de calado y velocidad se obtenía estableciendo una pendiente en el modelo físico de pendiente local y modificando a su vez el caudal de circulación por el canal del laboratorio. El caso 4, según la Tabla V-5, ha sido el escogido para verificar que el vehículo responde de la misma forma en la simulación que en los ensayos de laboratorio.

En este caso se produjo el desplazamiento del vehículo con orientación perpendicular al flujo, una velocidad de 0.96 m/s y un calado de 1 cm. Estas condiciones se generaron estableciendo una pendiente del 8% y permitiendo la circulación de un caudal de 5.99 l/s.

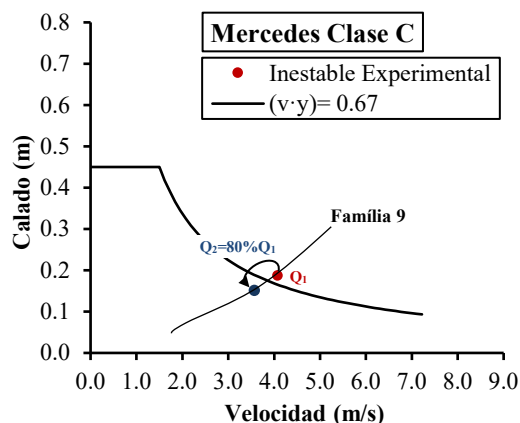
**Tabla V-5** Resultados experimentales. Variables hidráulicas que produjeron el desplazamiento (inestabilidades) del vehículo Mercedes Clase C

Caso	Orientación	Prototipo			Modelo		
		v(m/s)	y(m)	(v·y) (m <sup>2</sup> /s)	v(m/s)	y(m)	(v·y)
0	flotación	0.00	0.45	-	0.00	0.025	-
1	2	2.12	0.33	0.701	0.50	0.018	0.009
2	2	2.70	0.22	0.598	0.64	0.012	0.008
3	2	2.99	0.21	0.630	0.71	0.012	0.008
4*	1	4.08	0.19	0.763	0.96	0.010	0.010
5	2	1.10	0.49	0.536	0.26	0.027	0.007
6	2	1.37	0.46	0.623	0.32	0.025	0.008
7	2	2.88	0.23	0.674	0.68	0.013	0.009
8	1	4.05	0.23	0.941	0.96	0.013	0.012
9	2	2.49	0.31	0.768	0.59	0.017	0.010
10	2	1.43	0.52	0.736	0.34	0.029	0.010

Orientación: 1: Perpendicular  
2: Paralelo

\*Caso simulado en Flow-3D

El planteamiento de esta simulación es reproducir el caso experimental número 4, utilizando el mismo caudal que ocasionó el desplazamiento del vehículo ( $Q = 5.99$  l/s) y simular también para un caudal un 20% inferior ( $Q = 4.80$  l/s) (Figura V-51).

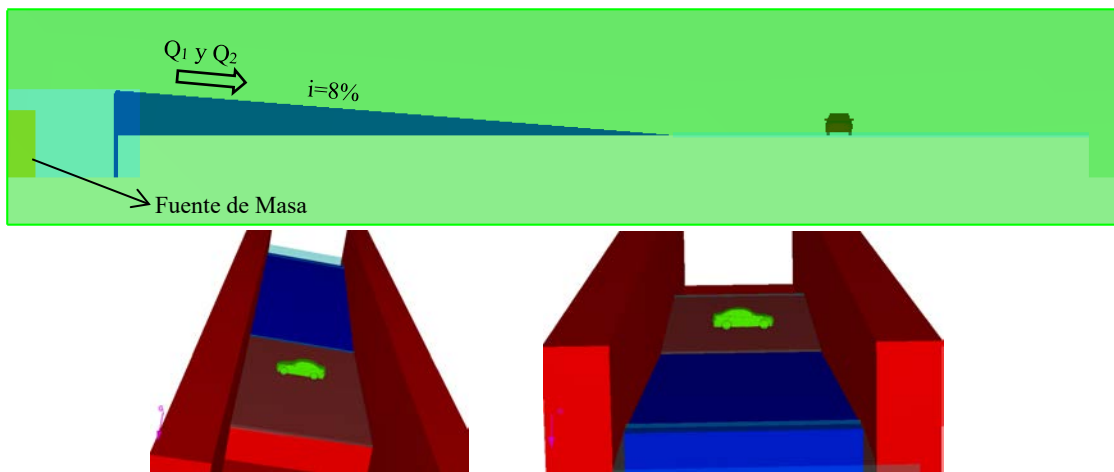


**Figura V-51.** Caudales considerados para la verificación del punto de inestabilidad del modelo Mercedes Clase C en el modelo Flow-3D de pendiente local

De esta manera la primera simulación debe generar la inestabilidad del vehículo, pero, en cambio, debe ser estable en la segunda. En la Figura V-51 se observa el umbral de estabilidad propuesto en el Capítulo IV para el modelo de vehículo Mercedes Clase C ( $(v \cdot y) = 0.67$  m<sup>2</sup>/s), así como el punto de inestabilidad debido al Caso 4. Los cambios de caudal, para una misma

pendiente establecida del 8%, siguen la dirección de la familia 9 en el plano velocidad-calado que se definió en el Capítulo IV, según la Figura IV-11.

En la Figura V-52 se observa la configuración del modelo de pendiente local con el vehículo situado en la misma posición y orientación con que se evaluó su estabilidad en el modelo físico. Como en los anteriores modelos, se ha utilizado Google Sketchup para dibujar tridimensionalmente el canal y la pendiente, y posteriormente ha sido exportado como stl e importado en Flow-3D. El caudal se incorpora a partir de una fuente de masa que se sitúa unos centímetros antes del inicio de la pendiente, según se observa en la Figura V-52. La condición de contorno aguas abajo se ha definido como outflow.



**Figura V-52.** Configuración del modelo de pendiente local en Flow-3D

En primer lugar, para la **elección del modelo de turbulencia**, se llevaron a cabo simulaciones con un único bloque de malla para todo el dominio y un tamaño de celda de 5 mm. Para un mismo caudal de inestabilidad ( $Q = 5.99$  l/s) se consideraron diferentes modelos de turbulencia:  $\kappa-\epsilon$ , RNG,  $\kappa-\omega$  y Large Eddy Simulation (LES). El último (LES) se descartó directamente tras la simulación, al observar un mal comportamiento del flujo alrededor del vehículo, muy diferente al observado en laboratorio. Para los otros tres modelos de turbulencia se llevó a cabo un análisis de las fuerzas hidrodinámicas ejercidas sobre el vehículo llegando a la conclusión que el modelo RNG representaba las fuerzas con menores oscilaciones una vez superada la fase transitoria del flujo.

En la Figura V-53, Figura V-54 y Figura V-55 se han representado las fuerzas hidrodinámicas de arrastre ( $F_D$ ) y de empuje vertical ( $F_v$ ) obtenidas mediante Flow-3D para cada modelo de turbulencia analizado. Se trata de valores instantáneos de fuerzas a lo largo de simulaciones de 10 segundos. También se ha representado la fuerza de rozamiento, que no es más que el producto del coeficiente de rozamiento ( $\mu = 0.602$ ) por el peso sumergido ( $M_c g - F_v$ ). Se confirma en cualquier caso que la fuerza de rozamiento se ve superada, independientemente del modelo de turbulencia utilizado, lo cual es coherente al haberse simulado con un caudal que produjo una inestabilidad en los ensayos de laboratorio. Previsiblemente, simulaciones con menor tamaño de celda ofrecerán fuerzas de arrastre más próximas a la fuerza de rozamiento.



La representación conjunta de las fuerzas hidrodinámicas (Figura V-56), según los tres modelos de turbulencia, indica claramente que las fuerzas presentan menores inestabilidades cuando se ha simulado con el modelo de turbulencia RNG. Además, tanto para el caso de  $\kappa\text{-}\varepsilon$ , como  $\kappa\text{-}\omega$ , parece haber una cierta tendencia ascendente en los segundos finales de la simulación. En general, pero especialmente en los segundos finales, se observan valores de fuerzas superiores para el caso de  $\kappa\text{-}\varepsilon$  y de  $\kappa\text{-}\omega$ , presentando los resultados de RNG valores hasta 0.5 N por debajo de los otros.

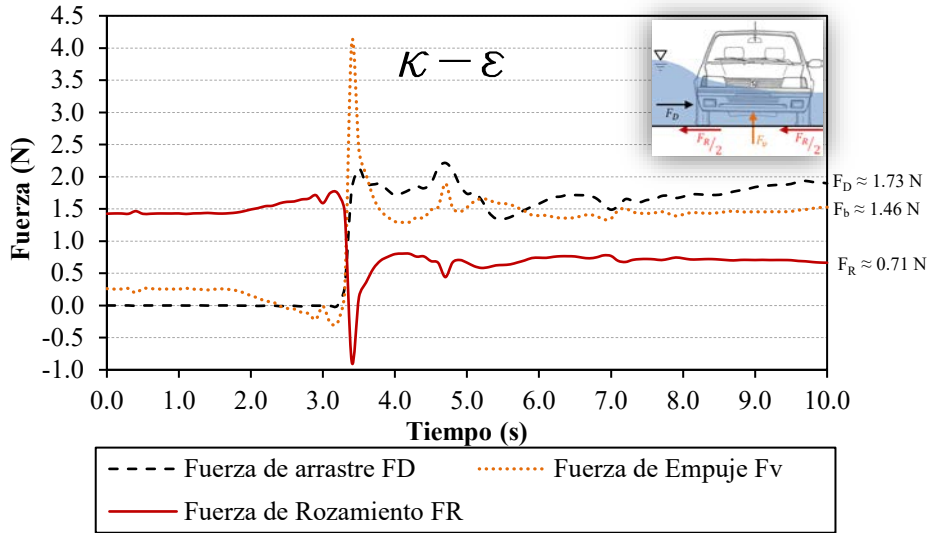


Figura V-53. Resultados de fuerzas hidrodinámicas ejercidas sobre el vehículo utilizando un modelo de turbulencia  $\kappa\text{-}\varepsilon$

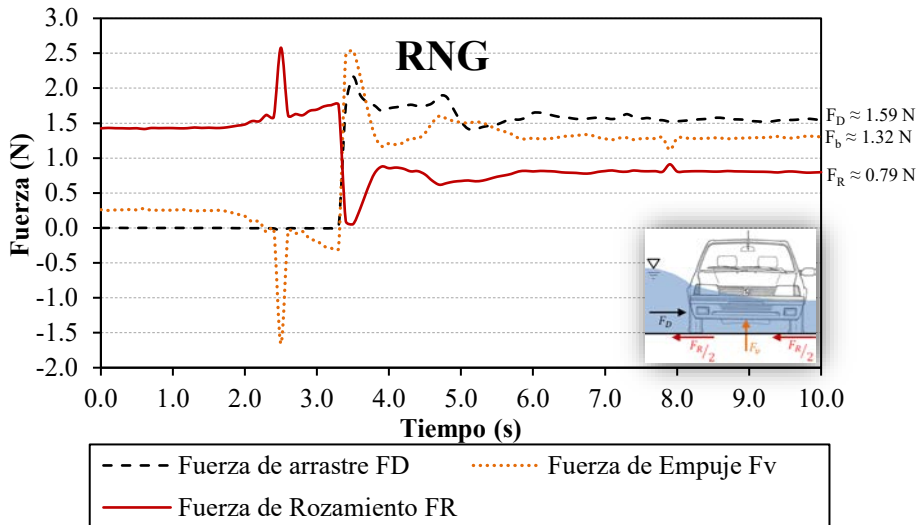


Figura V-54. Resultados de fuerzas hidrodinámicas ejercidas sobre el vehículo utilizando un modelo de turbulencia RNG

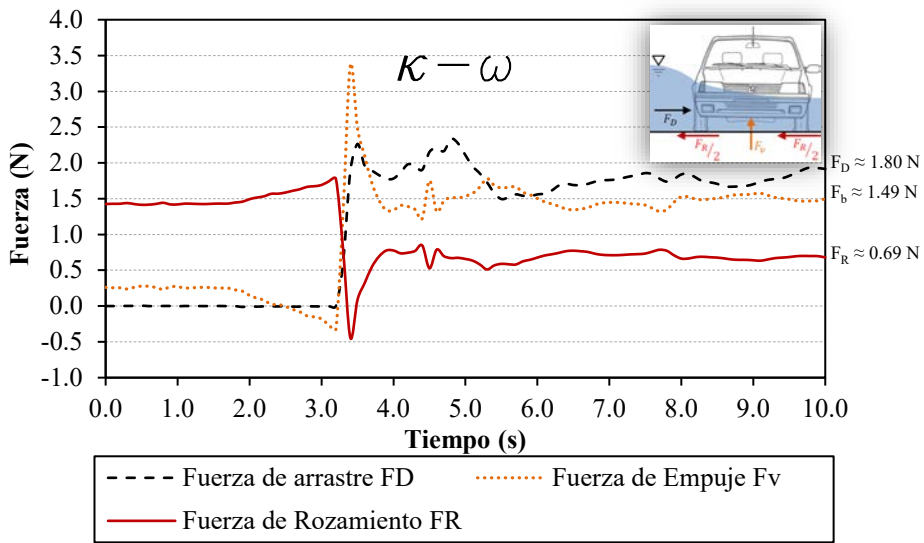


Figura V-55. Resultados de fuerzas hidrodinámicas ejercidas sobre el vehículo utilizando un modelo de turbulencia  $K - \omega$

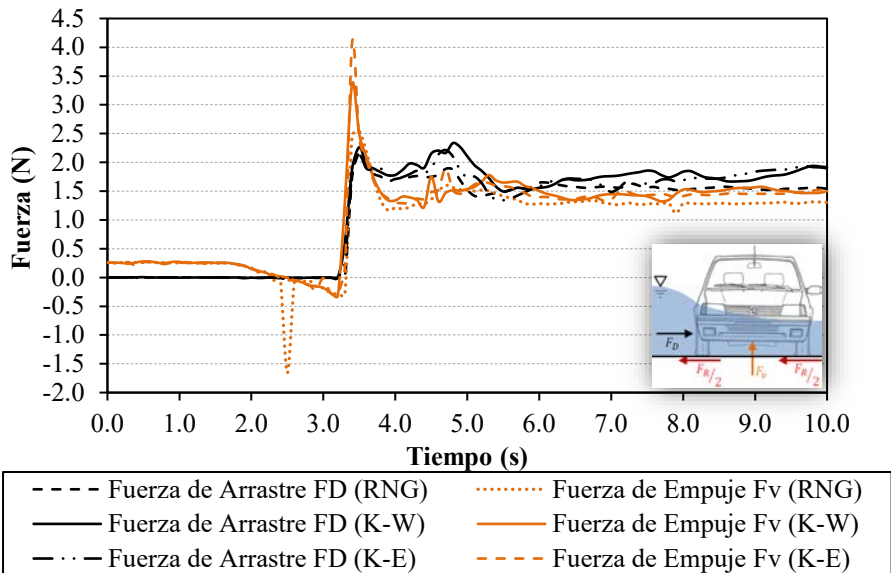


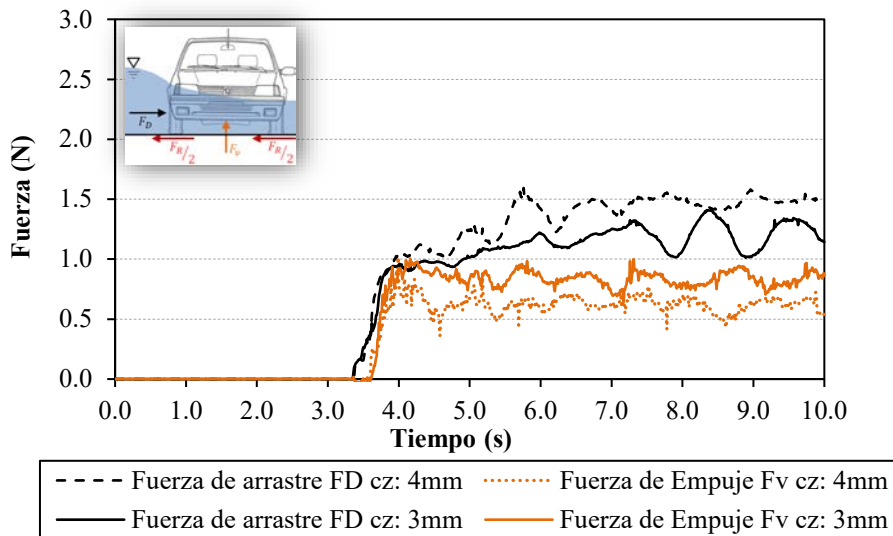
Figura V-56. Resultados de fuerzas hidrodinámicas ejercidas sobre el vehículo para los tres modelos de turbulencia considerados

En definitiva, se ha optado por emplear el modelo RNG para sucesivas simulaciones, por ser el que ofrece valores de fuerzas más uniformes y ligeramente inferiores a los otros. Este último aspecto a priori no era especialmente relevante, pero se confirmará más adelante que los resultados de fuerzas serán adecuados de acuerdo con los experimentales.

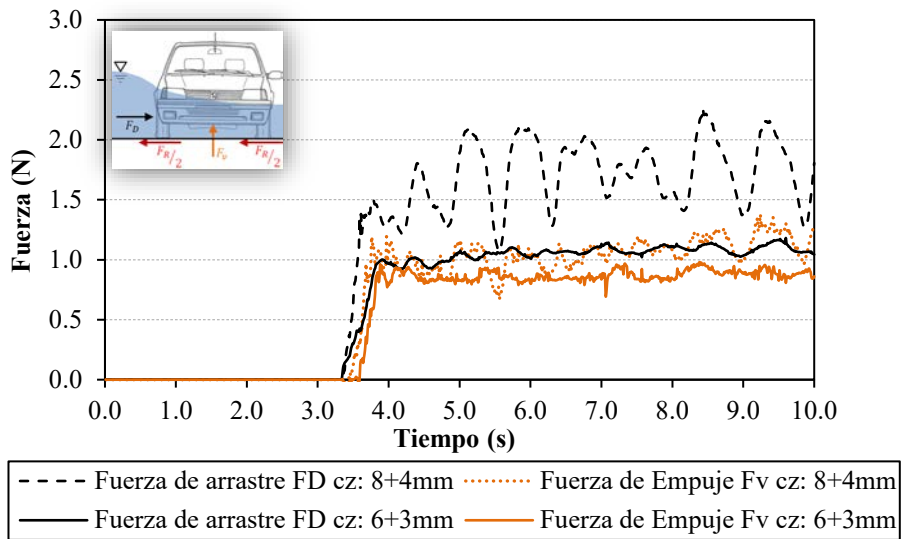
Una vez escogido el modelo de turbulencia, se ha llevado a cabo un exhaustivo estudio de la **influencia de la malla en las fuerzas** actuantes sobre el vehículo. Bajo la premisa de obtener resultados suficientemente buenos y un coste computacional asumible, se propone un tamaño de celda de 2 mm en las proximidades del vehículo y de 4 mm en el resto del dominio. Se han probado diferentes configuraciones de malla de cálculo, empezando por considerar un único bloque en todo el dominio (Figura V-57) y un bloque malla para el conjunto del dominio con otro bloque anidado de menor tamaño de celda alrededor del vehículo (Figura V-58).

En ambos casos la reducción del tamaño de celda ofrecía resultados de fuerzas hidrodinámicas inferiores. Las pequeñas dimensiones del vehículo a escala 1:18 limitaban el tamaño de celda, de manera que para definir correctamente un parámetro tan importante como la altura libre desde el suelo hasta el vehículo (GC) se requiere de un tamaño de celda de 2 mm o inferior según se observó en este análisis.

Finalmente, para las dos simulaciones de esta Fase 2 (caudal de estabilidad y caudal de inestabilidad) se ha utilizado el coeficiente de rozamiento experimental entre el neumático y el modelo de pendiente local ( $\mu = 0.602$ ), el tensor de inercia del modelo 3D del vehículo [V-51], el peso del vehículo (268 g), la rugosidad absoluta obtenida en el proceso de calibración de la hidrodinámica del modelo ( $K=1 \cdot 10^{-5}$  m), el modelo de turbulencia RNG y una configuración de malla de tamaño de celda de 4 mm para todo el dominio y un bloque anidado alrededor del vehículo de 2mm. En definitiva, con estas simulaciones se debe garantizar que el comportamiento del vehículo en el modelo numérico responde de la misma forma que en el laboratorio.



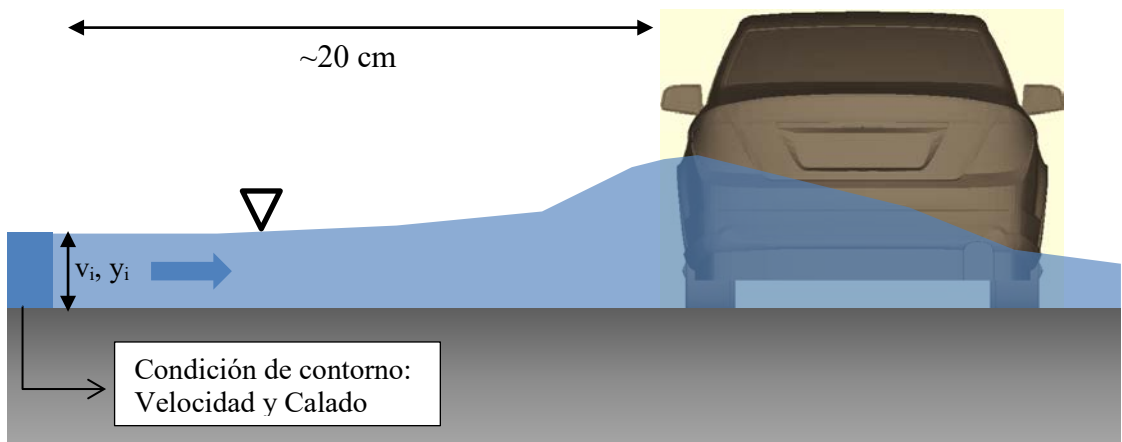
**Figura V-57.** Resultados de fuerzas hidrodinámicas ejercidas sobre el vehículo para un único bloque de malla. Simulaciones con tamaño de celda (cz) de 4 mm y de 3 mm



**Figura V-58.** Resultados de fuerzas hidrodinámicas ejercidas sobre el vehículo para dos bloques de malla. Bloque de mayor tamaño de celda para todo el dominio y bloque anidado alrededor del vehículo con menor tamaño de celda. Simulaciones con tamaños de celda de (8+4) mm y (6+3) mm

**V.5.3.3. Fase 3: Obtención de nuevos resultados no determinados mediante ensayos experimentales**

Una vez comprobado el correcto comportamiento del vehículo, es posible someterlo a diferentes flujos que no se ensayaron experimentalmente. Para ello, y ya establecidos en la **Fase 3**, se elabora un modelo con un dominio reducido para simular las condiciones de flujo deseadas con el menor coste computacional posible. Para ello se coloca una condición de contorno en la posición de la sección de trabajo en la que se impone directamente el calado y la velocidad deseados (Figura V-59).



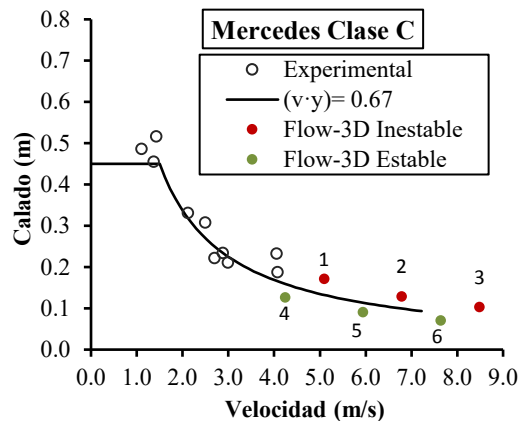
**Figura V-59.** Esquema del modelo simplificado

La curva límite de estabilidad obtenida a partir de los puntos de inestabilidad experimentales para el modelo Mercedes Clase C es una función  $(v \cdot y) = 0.67 \text{ m}^2/\text{s}$ . Se propone en estas simulaciones evaluar la estabilidad del vehículo para condiciones de flujo con producto velocidad por calado un 20% superior al límite de estabilidad  $((v \cdot y)_{\text{inestable}} = 0.8 \text{ m}^2/\text{s})$ , así como para productos velocidad por calado un 20% inferior  $((v \cdot y)_{\text{estable}} = 0.54 \text{ m}^2/\text{s})$ . Las velocidades de flujo a tener en cuenta serán superiores a las consideradas experimentalmente (4 m/s en prototipo), de manera que se pueda validar la “cola” de la curva límite de estabilidad propuesta.

Con este planteamiento se proponen las simulaciones que se recogen en la Tabla V-6, en la que se presentan los valores de velocidad y calado impuestos en el modelo numérico y los escalados a prototipo. En la Figura V-60 se representan los puntos que corresponden a las condiciones hidráulicas a las que se debe someter el vehículo, para evaluar su estabilidad. Los Puntos representados de color rojo, situados sobre la curva límite de estabilidad propuesta, previsiblemente generaran inestabilidades al vehículo, mientras que los de color azul se encuentran en la zona de estabilidad propuesta, y no deberían desestabilizar el vehículo.

**Tabla V-6** Simulaciones propuestas para el modelo simplificado de estabilidad de vehículos (Fase 3)

Run Id.	$(v \cdot y)$ limite	Modelo		Prototipo		
		v (m/s)	y (cm)	v (m/s)	y (m)	$(v \cdot y)$
2	0.67	1.20	0.88	5.09	0.158	0.80
4	0.67	1.60	0.66	6.79	0.118	0.80
6	0.67	2.00	0.53	8.49	0.095	0.80
7	0.67	1.00	0.70	4.24	0.126	0.54
10	0.67	1.40	0.50	5.94	0.090	0.54
12	0.67	1.80	0.39	7.64	0.070	0.54



**Figura V-60.** Condiciones hidráulicas para evaluar la estabilidad del modelo Mercedes Clase C

En esta Fase 3 también se lleva a cabo la simulación del vehículo prototipo correspondiente al modelo Mercedes Clase C. El objetivo de esta simulación es comprobar de nuevo la **idoneidad de la semejanza de Froude**, pero estudiando esta vez los efectos sobre un vehículo a escala real. Para esta simulación se ha escogido uno de los puntos a evaluar (punto 4) y escalando todas las dimensiones y variables de acuerdo con la semejanza de Froude se ha realizado un modelo a escala

real. Se trata de comparar las fuerzas obtenidas directamente en prototipo con las escaladas ( $\lambda_F = \lambda^3$ ) obtenidas para el modelo (1:18).

Por último, en esta fase, se lleva a cabo un breve **estudio del efecto de la fuerza de ascensión**. Para ello se lleva a cabo un modelo en el que el coche se ve sometido únicamente a fuerza de flotación (Figura V-61). La condición de contorno será una fuente de masa emitiendo un caudal constante desde el suelo, permitiendo que el agua llegue únicamente a 2 cm (36 cm en prototipo) de altura (inferior a los 2.5 cm correspondientes al calado de flotación). De esta manera Flow-3D ofrecerá la fuerza de empuje vertical que el agua ejerce sobre el vehículo. En este caso la velocidad de aproximación al vehículo es nula y por tanto no se ve afectado por ninguna fuerza de ascensión.

En segunda instancia, en el mismo dominio de cálculo, se cambia la condición de contorno a un lateral, imponiendo una velocidad y un calado fijo de 2 cm (Figura V-62). Esta vez el vehículo se verá afectado por una fuerza de ascensión, mayor según se vaya incrementando la velocidad de aproximación.

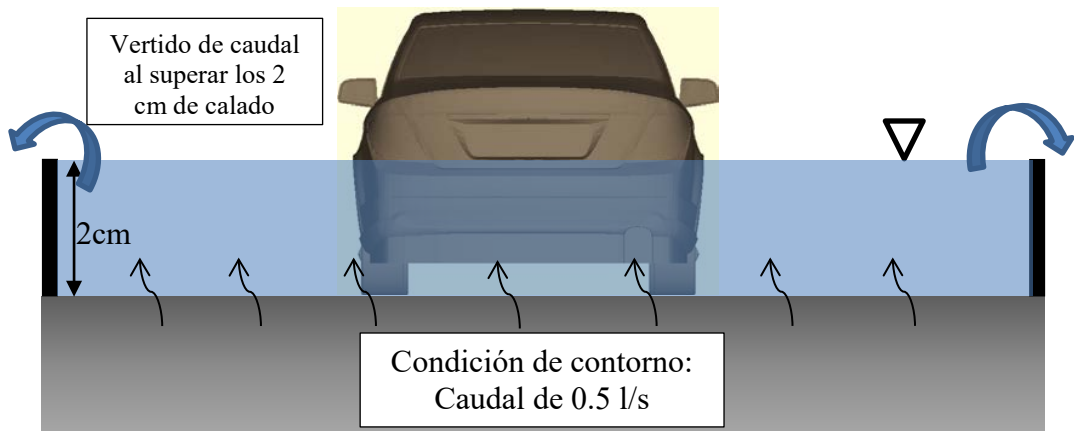
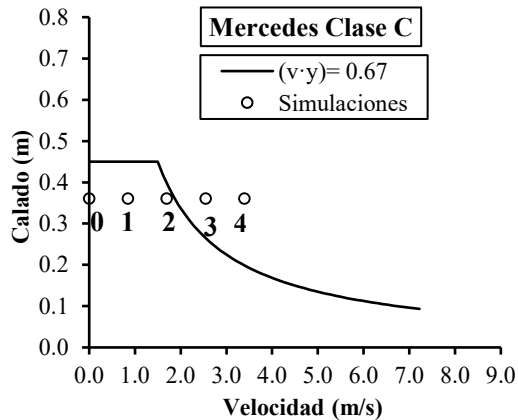


Figura V-61. Esquema del modelo para evaluar la fuerza de empuje vertical exclusivamente por flotación



Figura V-62. Esquema del modelo para evaluar la fuerza de empuje vertical como combinación de fuerza de flotación y de ascensión

Las simulaciones propuestas son cinco, según incrementos de la velocidad de aproximación y para un mismo calado, tal y como se observa en el gráfico de la Figura V-63. Los puntos representados responden al escalado a prototipo de un calado en el modelo de 2 cm y velocidades 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8.



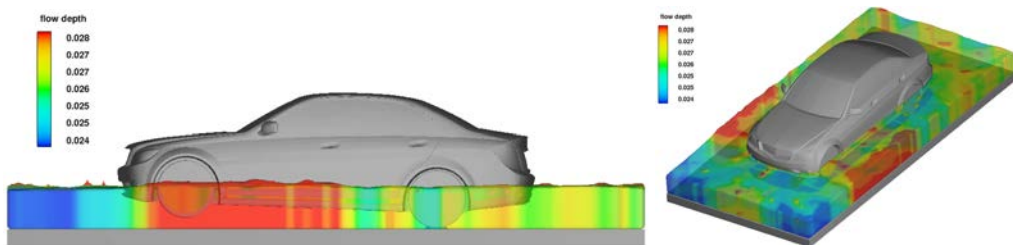
**Figura V-63.** Condiciones hidráulicas simuladas para evaluar el efecto de la fuerza de ascensión

#### V.5.4. *Discusión de los resultados de las simulaciones basada en estabilidad de vehículos*

En este apartado se presentan, discuten y analizan los resultados obtenidos a partir de las propuestas de simulaciones descritas en el apartado anterior. Éstos se agrupan según las tres fases de trabajo llevadas a cabo: flotación, modelo completo de pendiente local y modelo reducido.

##### V.5.4.1. Fase 1: Flotación del vehículo

Se ha comprobado, mediante la simulación del ensayo de flotación, que el vehículo Mercedes Clase C (e:1/8) responde de la misma forma que en los ensayos experimentales. La pérdida de contacto de las ruedas se produce cuando el calado de agua llega a los 2.5 cm (Figura V-64).

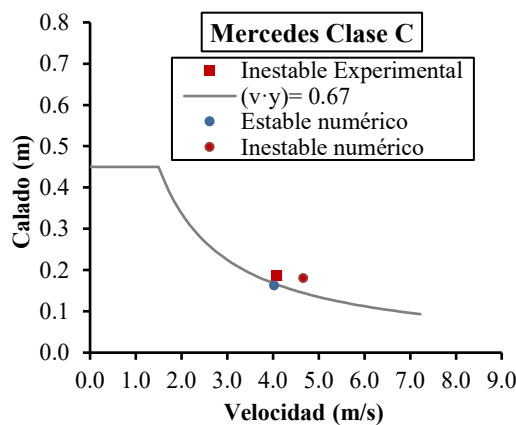


**Figura V-64.** Simulación del ensayo de flotación del vehículo Mercedes Clase C, justo cuando empieza a perder el contacto con el suelo

Al comprobarse la correcta flotación del vehículo, de acuerdo a los experimentos, ya se puede estudiar el efecto combinado de fuerza de empuje vertical junto con la fuerza de arrastre del agua (Fase 2).

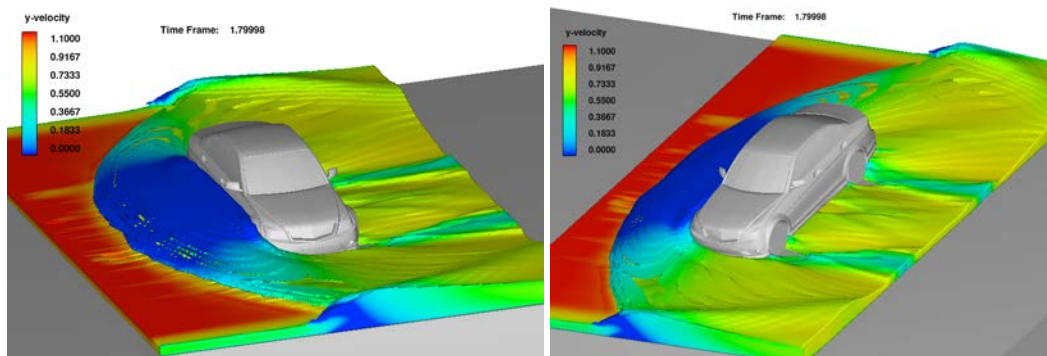
### V.5.4.2. Fase 2: Comprobación del correcto comportamiento del vehículo

Los resultados obtenidos en esta segunda fase han sido de acuerdo a los esperados, muy similares a los ensayos experimentales, tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo. Para el caudal de inestabilidad simulado se han obtenido unos valores de velocidad y calado de aproximación de 1.1 m/s y 1 cm respectivamente, ligeramente diferentes que los determinados experimentalmente ( $v= 0.96$  m/s;  $y= 1.04$  cm) para el mismo caudal de circulación. La segunda simulación ( $Q= 4.80$  l/s) ha dado lugar a una velocidad de 0.95 m/s y un calado de 0.9 cm. Aunque algunas ligeras desviaciones con respecto a lo esperado, el punto azul (Figura V-65) se sitúa por debajo del umbral de estabilidad, y los puntos rojos (inestabilidad experimental y numérica) se encuentran sobre el umbral ( $(v \cdot y)= 0.67$  m<sup>2</sup>/s).



**Figura V-65.** Representación del punto de inestabilidad experimental (Caso 4), el correspondiente numérico para el caudal de inestabilidad ( $Q= 5.99$  l/s) y el par velocidad- calado obtenido para la simulación con un caudal un 20% inferior ( $Q= 4.80$  l/s)

El postproceso de la simulación muestra una gran similitud en el comportamiento del flujo alrededor del vehículo. En la Figura V-66 se muestran los resultados (Caso 4) de velocidades en las proximidades del vehículo (únicamente en el dominio correspondiente al bloque de malla más fina) y en la Figura V-67 se muestran los resultados de calados próximos al vehículo.



**Figura V-66.** Postproceso de velocidades para la simulación con el caudal de inestabilidad ( $Q=5.99$  l/s)



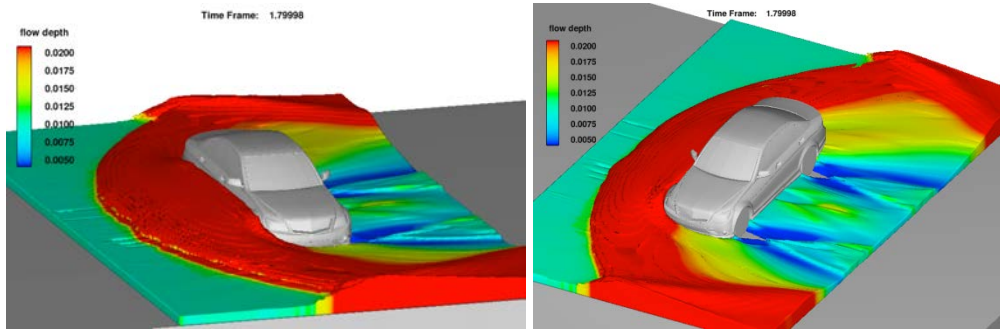


Figura V-67. Postproceso de calados para la simulación con el caudal de inestabilidad ( $Q=5.99$  l/s)

Sin embargo, se observa una gran influencia de las paredes sobre el flujo, apreciable en la forma del resalto en comparación con el desarrollo producido en laboratorio. En la Figura V-68 se observa un perfil de uno de los ensayos experimentales junto con varias visualizaciones de instantes de tiempos para la simulación del Caso 4. Se observa (Figura V-68) como el perfil es muy similar para los primeros instantes de la simulación ( $t=0.89$ s), pero el punto de contacto entre el resalto y la pared se desplaza aguas arriba hasta situarse a la altura del vehículo en los instantes finales. El ángulo de abertura del resalto en los ensayos experimentales era más cerrado y por tanto, el contacto entre el resalto y la pared se producía aguas abajo del vehículo.

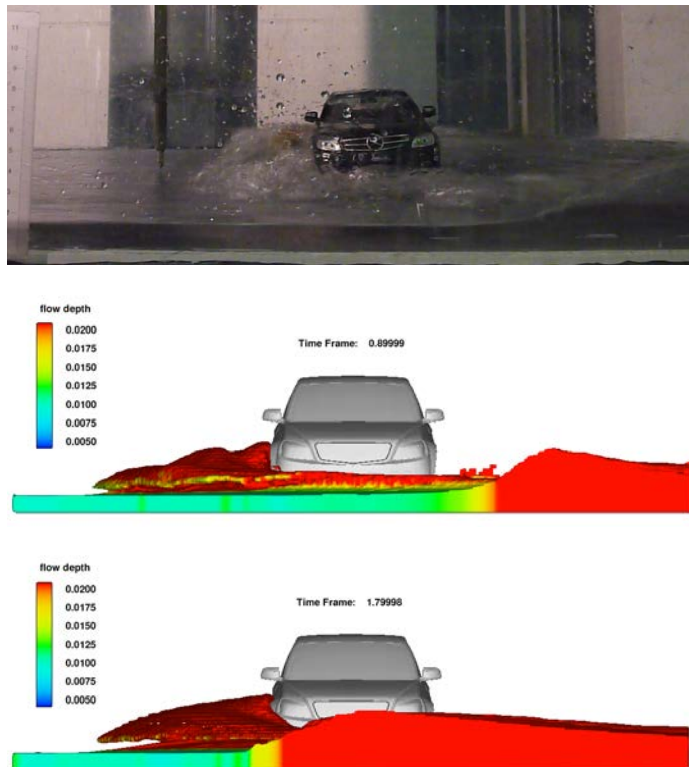
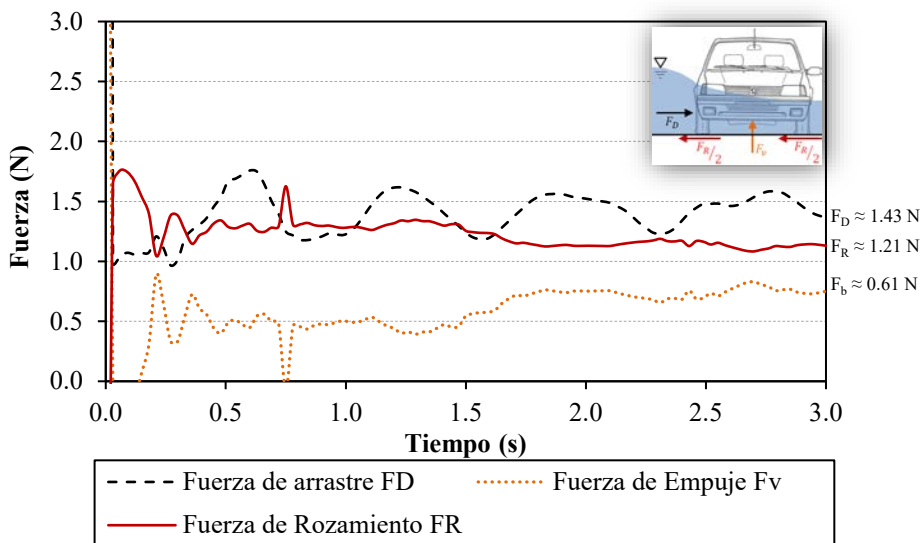


Figura V-68. Comparativa de un ensayo experimental con diferentes instantes de una simulación en Flow-3D

Cualitativamente no fue posible conseguir ninguna mejora, pero el adecuado resultado de fuerzas (**1ª Etapa**, sin considerar el movimiento del vehículo) permite validar la simulación. La primera simulación llevada a cabo, reproduciendo el caso experimental 4 ( $Q= 5.99$  l/s), supuso una fuerza de arrastre ligeramente superior a la fuerza de rozamiento. A partir del segundo 1.5 de la simulación en adelante se aprecian mayores valores en todo momento, habiendo sido intermitente el cruce de la línea negra discontinua ( $F_D$ ) con la roja continua ( $F_R$ ) (Figura V-69) en los primeros instantes de flujo transitorio. Es muy apreciable la proximidad de la fuerza de arrastre a la fuerza de rozamiento, aspecto que indica que se trata de una inestabilidad muy cercana al umbral de estabilidad del vehículo.

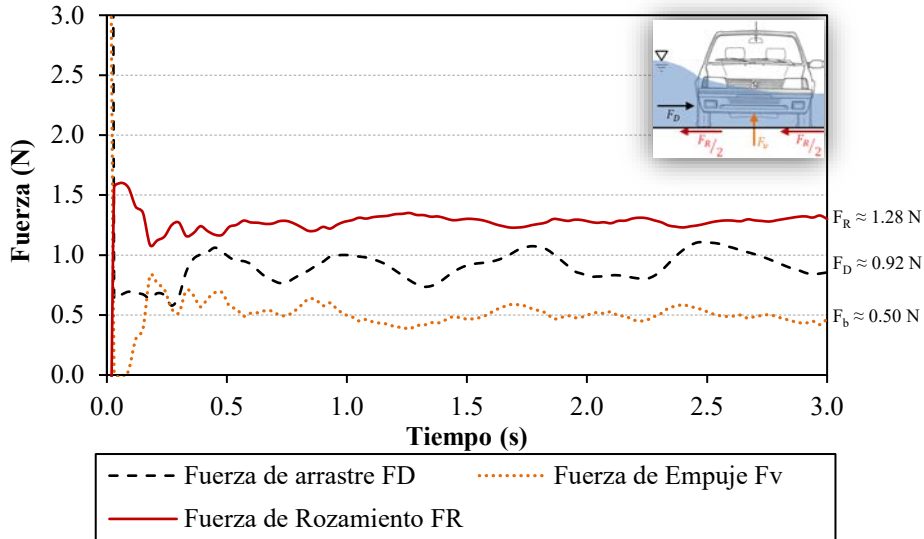


**Figura V-69.** Fuerzas actuantes sobre el vehículo Mercedes Clase C (e: 1/18). Reproducción numérica del caso experimental 4, que produjo una inestabilidad del vehículo. Caudal de circulación de 5.99 l/s y una pendiente del modelo del 8%

La simulación llevada a cabo con un caudal inferior al anterior ( $Q= 4.80$  l/s), como se esperaba, dio lugar a fuerzas de arrastre inferiores a las de rozamiento en todo momento. Como se observa en la Figura V-70, la fuerza de arrastre no supera la fuerza de rozamiento en ningún momento. Estos resultados no solo garantizan una correcta simulación numérica, sino que se comprueba que los valores del coeficiente de rozamiento determinados experimentalmente fueron medidos correctamente y se valida que efectivamente el punto de inestabilidad (Caso 4) se trata de un punto situado en el umbral de estabilidad del vehículo.

El análisis de las fuerzas hidrodinámicas actuantes sobre el vehículo es fundamental para entender su inestabilidad, aunque Flow-3D, mediante la activación del módulo GMO, ofrece la posibilidad de reproducir la inestabilidad del vehículo directamente (**2ª Etapa**, vehículo con 6 grados de libertad). Se trata de un módulo ciertamente útil cuando, una vez comprobado que responde correctamente al análisis de fuerzas, se requieren evaluar varias inestabilidades para diferentes modelos de vehículos.

En este caso, se ha llevado a cabo la comprobación de este módulo para ambas simulaciones, de forma que para la primera ( $Q=5.99$  l/s) el vehículo debe ser arrastrado y para la segunda ( $Q=4.80$  l/s) debe permanecer estable.



**Figura V-70.** Fuerzas actuantes sobre el vehículo Mercedes Clase C (e: 1/18). Reproducción numérica del Caso 4 experimental, disminuyendo un 20% el caudal de circulación (4.80 l/s)

Una vez analizadas las fuerzas actuantes sobre el vehículo y disponer de una simulación en la que, de acuerdo a las fuerzas actuantes, el vehículo debería ser arrastrado, y otra en la que no debería, se puede activar el modelo GMO y de colisión. Una vez activados, ya no se requiere hacer el análisis de fuerzas, puesto que, si la fuerza de arrastre supera la de rozamiento, el vehículo directamente será arrastrado.

Como ya se describió en profundidad en el apartado V.4.7, se debe activar el módulo de GMO, gracias al cual se le ofrecen hasta 6 grados de libertad a un objeto (al vehículo en este caso), pero también el módulo de colisiones. Este último tiene en cuenta el coeficiente de rozamiento del vehículo, puesto que considera posibles “micro-colisiones” de un objeto sólido con otro. Este modelo simularía el deslizamiento del vehículo como continuas micro-colisiones entre las ruedas y el suelo, considerando el valor del coeficiente de rozamiento establecido ( $\mu=6.02$ ). Tras varias comprobaciones, los resultados no fueron satisfactorios y tras consultar a los desarrolladores del programa, éstos confirmaron que para contactos prolongados entre dos objetos (deslizamiento del vehículo) el módulo de colisiones no funcionaba adecuadamente.

Dada esta problemática, y aprovechando la opción de Flow-3D para personalizar algunos de módulos implementados, se desarrolló un código de programación para sustituir el módulo de colisión, como si se tratara de la fuerza de rozamiento producida por el contacto de los neumáticos y el suelo, que, si se veía superada por la de arrastre, el vehículo sufriría una inestabilidad y sería arrastrado. Responde exactamente a lectura realizada con las gráficas de fuerzas presentadas anteriormente (Figura V-69 y Figura V-70). La fuerza impuesta ( $F_R$ ) se definió, según las propias variables de Flow-3D, de la siguiente manera:

$$F_R = 0.602 \cdot (f_{hzm}v_b(5) + (m_{asm}v_b(5) \cdot g_z))$$

siendo,  $f_{hzm}v_b(5)$  la fuerza en dirección vertical aplicada al objeto 5 (vehículo) que no es más que la fuerza de empuje vertical calculada por Flow-3D en cada instante de tiempo,  $m_{asm}v_b(5)$  la masa del vehículo y  $g_z$  la componente de la aceleración de la gravedad en la dirección z.

Con el código implementado (Figura V-71), la respuesta es correcta, siendo el vehículo arrastrado para la primera simulación y permaneciendo estable para la segunda. Se dispone, por tanto, de un modelo validado para ser utilizado con otros vehículos no ensayados en laboratorio. Para futuras investigaciones se propone el uso de este modelo, como si de un laboratorio virtual se tratara.

```

1 integer::nob_usr
2 real,save::cont_t
3 nob_usr=5
4 if (cont_t.lt.0) cont_t=0
5 if (nob.ne.nob_usr) return
6 if ((zmcmbv(5)-zmcmbv0(5)).le.0.001) then
7     fy=0.602*(f_hzmvb(5)+(massmvb(5)*gz))
8     if (abs(f_hymvb(5)).le.abs(fy)) then
9         fy=-f_hymvb(5)
10    else
11        if (cont_t.le.0.2) then
12            fy=-f_hymvb(5)
13            cont_t=cont_t+delt
14        else
15            cont_t=0
16        endif
17    endif
18 endif

```

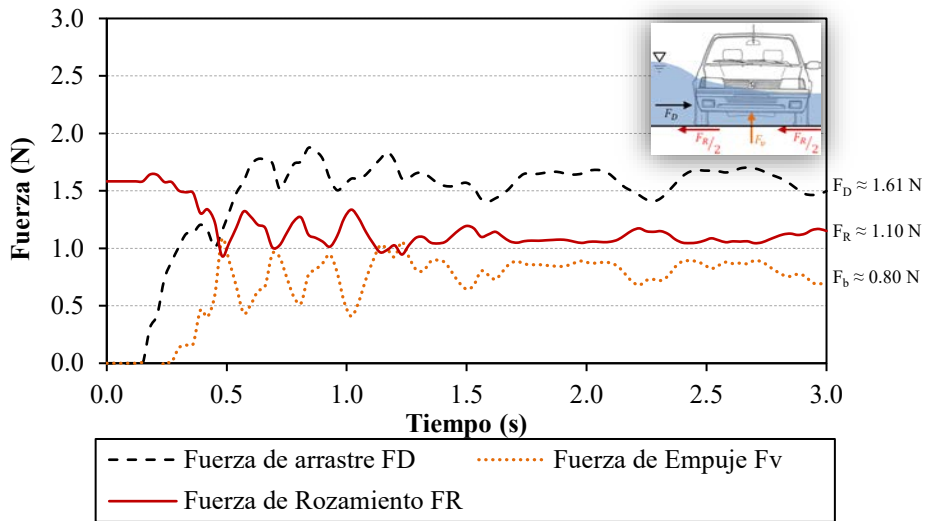
**Figura V-71.** Código fortran implementado para introducir la fuerza de rozamiento artificial al vehículo

#### V.5.4.3. Fase 3: Obtención de nuevos resultados no determinados mediante ensayos experimentales

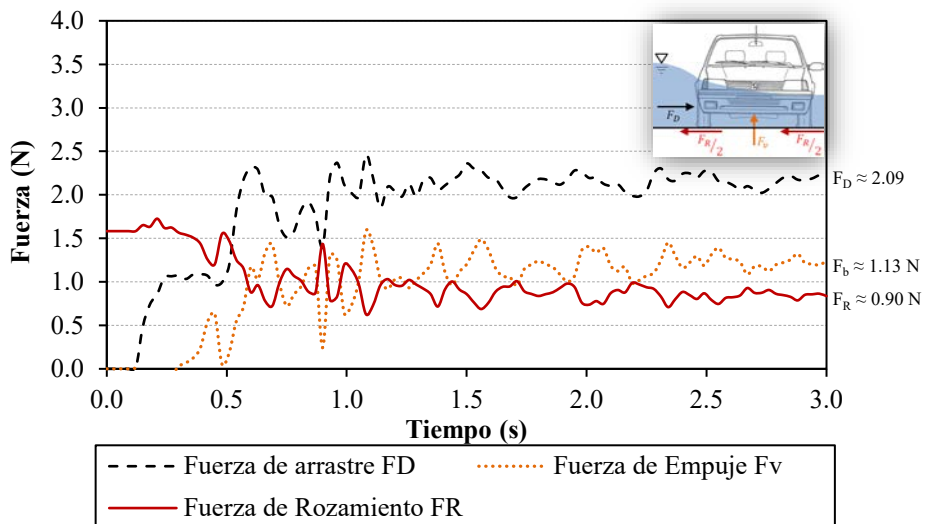
Una vez analizado el correcto comportamiento numérico de la estabilidad del vehículo, sometido a fuerzas de arrastre y de empuje vertical combinadas, se discuten los resultados obtenidos a partir de las simulaciones con el modelo simplificado.

En primer lugar, se presentan los resultados referentes a la validación de la curva de estabilidad obtenida experimentalmente para el vehículo Mercedes Clase C (e: 1/18). Para las 6 diferentes condiciones de flujo propuestas se presentan las fuerzas de arrastre ( $F_D$ ) y de empuje vertical ( $F_v$ ) a las que se ve sometido el vehículo. A pesar de disponer del código desarrollado en la Fase 1, se lleva a cabo el análisis de fuerzas igualmente, para continuar validando su correcto funcionamiento.

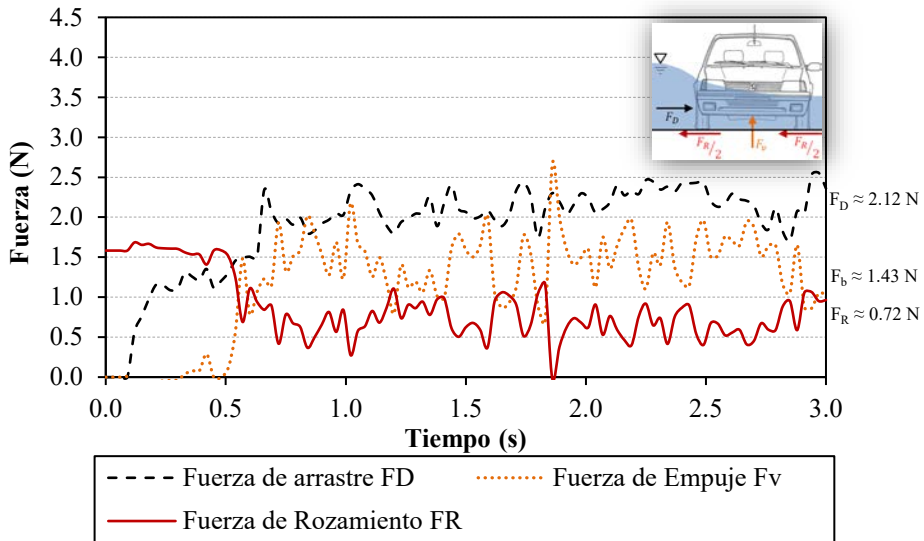
Como se describió en la segunda fase, el vehículo presentará una inestabilidad cuando la fuerza de arrastre supere la fuerza de rozamiento ( $F_R$ ). Esta última no es más que el producto del coeficiente de rozamiento ( $\mu=0.602$ ) por el peso sumergido ( $M_c g - F_v$ ). Se trata de un valor instantáneo, dependiente del valor de la fuerza de empuje vertical ( $F_v$ ) en cada instante que hace variar el peso sumergido del vehículo. En los gráficos de la Figura V-72 hasta Figura V-77 se presentan las fuerzas actuantes sobre el vehículo para cada condición de flujo establecida (puntos del 1 al 6 según Figura V-60).



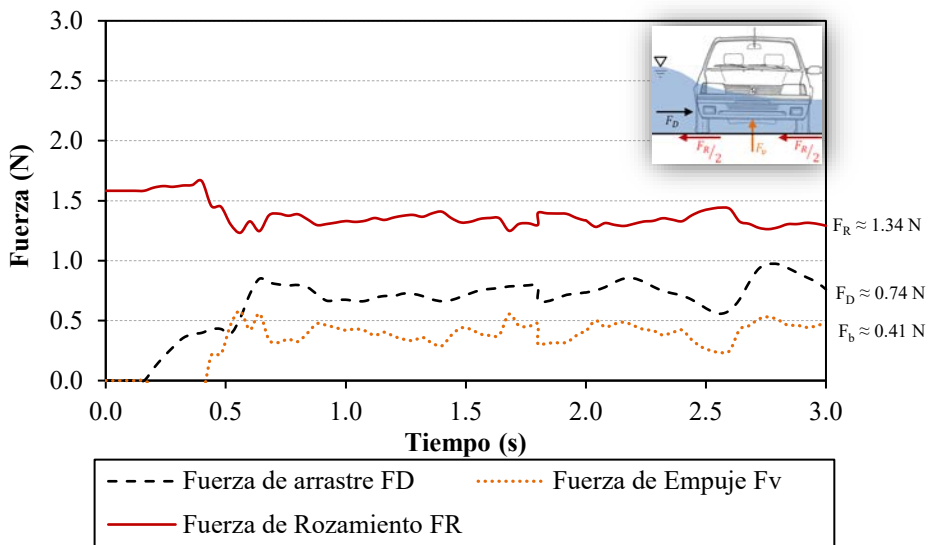
**Figura V-72.** Fuerzas hidrodinámicas sobre el vehículo a escala 1:18, resultado obtenidas mediante simulación del modelo reducido. **Punto 1:**  $v=1.2 \text{ m/s}$   $y=0.88 \text{ cm}$



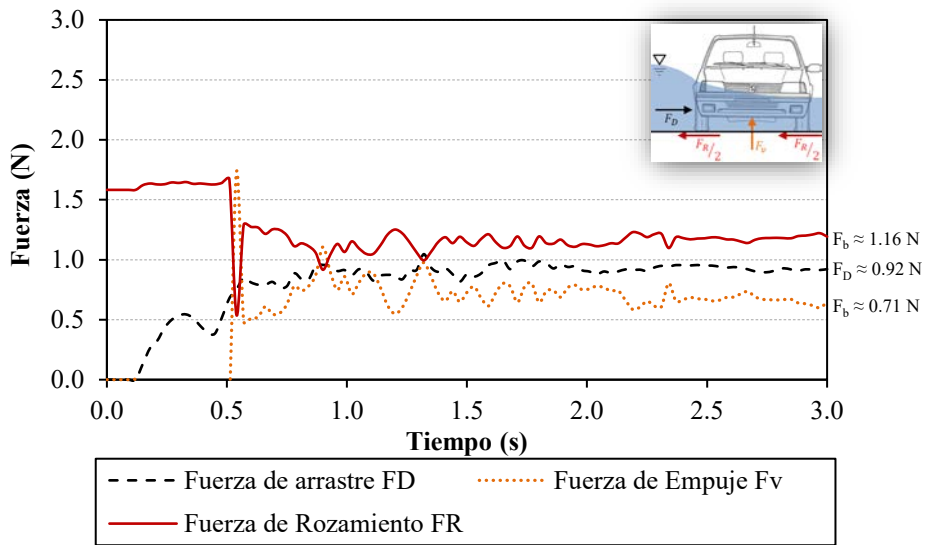
**Figura V-73.** Fuerzas hidrodinámicas sobre el vehículo a escala 1:18, resultado obtenidas mediante simulación del modelo reducido. **Punto 2:**  $v=1.6 \text{ m/s}$   $y=0.66 \text{ cm}$



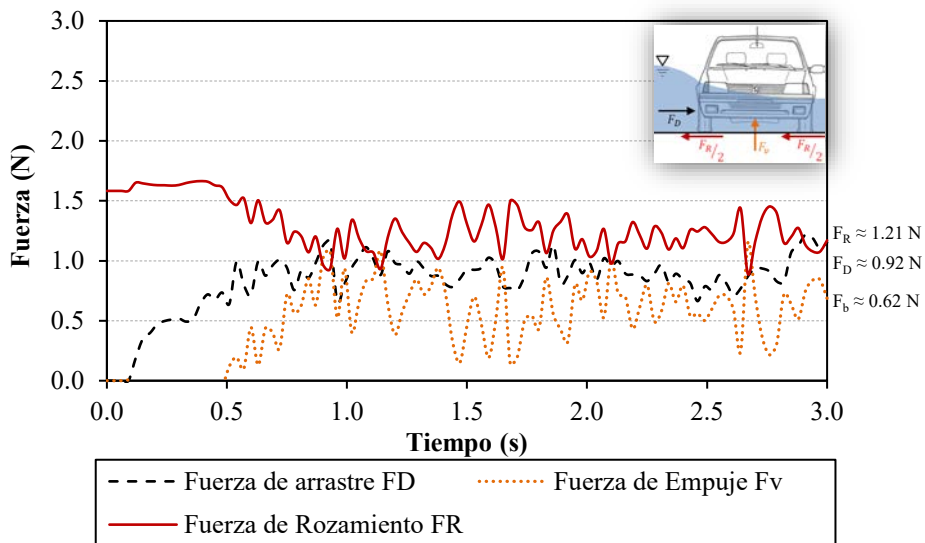
**Figura V-74.** Fuerzas hidrodinámicas sobre el vehículo a escala 1:18, resultado obtenidas mediante simulación del modelo reducido. **Punto 3:**  $v = 2.0 \text{ m/s}$   $y = 0.53 \text{ cm}$



**Figura V-75.** Fuerzas hidrodinámicas sobre el vehículo a escala 1:18, resultado obtenidas mediante simulación del modelo reducido. **Punto 4:**  $v = 1.0 \text{ m/s}$   $y = 0.70 \text{ cm}$



**Figura V-76.** Fuerzas hidrodinámicas sobre el vehículo a escala 1:18, resultado obtenidas mediante simulación del modelo reducido. **Punto 5:**  $v = 1.4 \text{ m/s}$   $y = 0.50 \text{ cm}$



**Figura V-77.** Fuerzas hidrodinámicas sobre el vehículo a escala 1:18, resultado obtenidas mediante simulación del modelo reducido. **Punto 6:**  $v = 1.8 \text{ m/s}$   $y = 0.39 \text{ cm}$

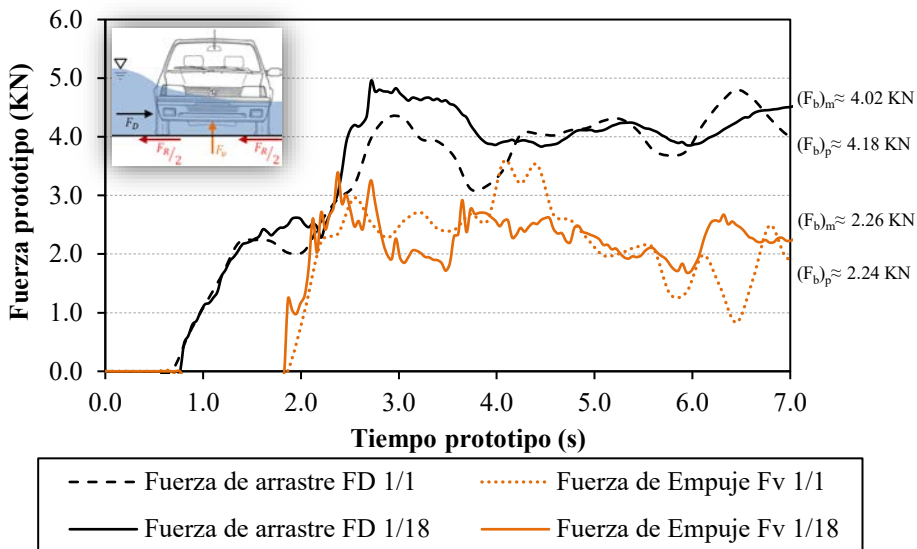
Como se preveía, la fuerza de rozamiento, definida por una línea roja continua, únicamente se ve superada en los tres primeros puntos, situados por encima del umbral de estabilidad determinado a partir de los resultados experimentales. El uso del modelo GMO junto con el código desarrollado respondió adecuadamente, generándose el arrastre del vehículo en estas tres simulaciones. Y, por lo tanto, para los tres últimos puntos (4, 5 y 6) se observa como la línea negra

discontinua (Fuerza de arrastre) se presenta por debajo de la línea roja (Fuerza de rozamiento). Para estos tres puntos, considerando el módulo GMO y el código desarrollado, el vehículo permaneció estable.

Estos resultados validan la curva para velocidades superiores a las ensayadas experimentalmente. El desarrollo de simulaciones análogas a éstas, utilizando diferentes modelos de vehículos, lleva a poder obtener las curvas o umbrales de estabilidad para cualquier tipo de vehículo. De esta manera el trabajo llevado a cabo en laboratorio se hace extensible a unas simulaciones numéricas calibradas y comprobadas. Otros aspectos como la variación del centro de masas, acercándolo más a la posición del motor del vehículo, o la consideración de infiltración del agua en el vehículo, podrán ser analizados en futuras simulaciones.

El segundo aspecto a tratar ha sido la comprobación de la correcta asunción de que este fenómeno seguía la semejanza de Froude, sin que los efectos de escala afectaran de manera sustancial a los resultados de estabilidad de los vehículos. Las simulaciones del modelo (e: 1/18) y del prototipo (e: 1/1) han resultado en unas fuerzas hidrodinámicas actuantes sobre ambos muy similares (acorde a su respectiva escala en cada caso). La simulación para el prototipo se preparó escalando el modelo 18 veces en cada dirección del espacio y estableciendo una condición de contorno de entrada con unos valores de calado ( $\lambda \cdot y_m$ ) y velocidad ( $\sqrt{\lambda} \cdot v_m$ ) escalados de acuerdo a la semejanza de Froude.

La evolución de estas fuerzas a lo largo del tiempo simulado responde a idénticas tendencias para ambas escalas, tal y como se presenta en la Figura V-78. Para llevar a cabo esta comparación se han escalado a prototipo las fuerzas sobre el modelo ( $\lambda^3 \cdot F_m$ ), así como el tiempo de cálculo ( $\sqrt{\lambda} \cdot t_m$ ), de acuerdo a las escalas de la semejanza de Froude.

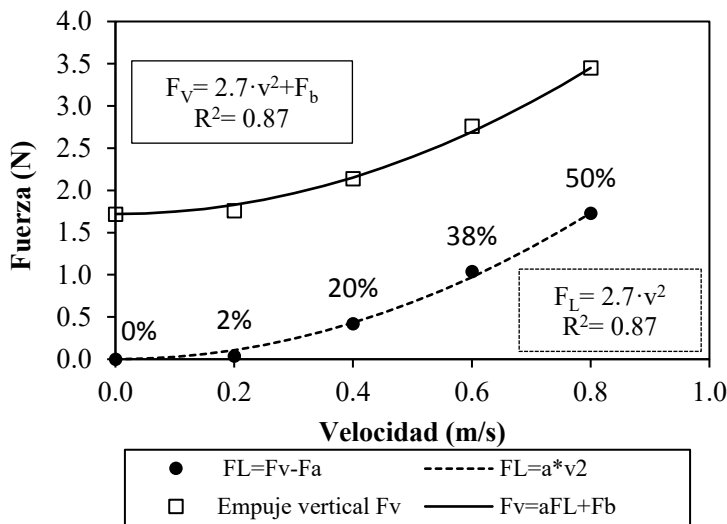


**Figura V-78.** Comparativa de las fuerzas hidrodinámicas sobre el vehículo a escala 1:18 y sobre su prototipo (e:1/1). **Punto 4:**  $v=1.0$  m/s (4.24 m/s)  $y=0.70$  cm (12.6 cm)



Quedó demostrado experimentalmente en el Capítulo IV, mediante la técnica de series de escala, que el fenómeno seguía la semejanza de Froude y los efectos de escala no alteraban sustancialmente las variables hidráulicas determinantes en el análisis de la estabilidad. En este apartado, mediante simulaciones numéricas, se ha comprobado que las fuerzas hidrodinámicas escaladas desde modelo a prototipo corresponden a las obtenidas directamente simulando el prototipo.

Por último, se presentan los resultados referentes al análisis de la fuerza de ascensión. En la Figura V-79 se han representado los 5 valores de las fuerzas de empuje vertical promedio actuantes sobre el vehículo, para las diferentes simulaciones realizadas. El primer valor corresponde a la simulación en la que no hay velocidad de aproximación y por tanto la única fuerza actuante es la de flotación (Figura V-61), pero sin llegar a la crítica que produzca la inestabilidad por flotación. El resto de puntos representan la fuerza de empuje vertical promedio, una vez estabilizado el flujo, según la velocidad impuesta en las siguientes simulaciones (Figura V-62).



**Figura V-79.** Evolución de la Fuerza de empuje vertical sobre el vehículo con la variación de la velocidad de aproximación. Influencia de la fuerza de ascensión con respecto el total de la fuerza de empuje vertical

Recordando lo comentado en el Capítulo IV, la fuerza de empuje vertical actuante sobre el vehículo se compone de la Fuerza de Flotación y de la Fuerza de Ascensión. Las simulaciones propuestas en este capítulo permiten poder evaluar la influencia de la Fuerza de Ascensión cuando se incrementa la velocidad de aproximación. La fuerza de ascensión se define analíticamente como:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_w v^2 C_L A \rightarrow F_L(v) = a v^2 \tag{V-52}$$

siendo,

- $\rho_w$ : Densidad del agua

- $v$ : Velocidad del agua
- $C_L$ : Coeficiente de ascensión que depende del flujo y la forma del obstáculo. Dependerá del número de Reynolds.
- $A$ : Área sumergida y proyectada en el plano perpendicular a la dirección del flujo

Según la expresión [V-52], la fuerza de ascensión es una función parabólica, en la que la variable es la velocidad y en la que se asumen el resto de parámetros constantes. Por lo tanto, la fuerza de empuje vertical podría definirse como:

$$F_V = F_L + F_b = av^2 + F_b \quad \text{[V-53]}$$

Llevando a cabo un ajuste de mínimos de esta última expresión, con los valores de representados en la gráfica de la Figura V-79, se obtiene un muy buen ajuste, resultando un coeficiente de correlación de  $R^2=0.87$ . El valor de la constante ( $a$ ) de la parábola, para el ajuste realizado es de 2.7.

De esta manera, se puede representar también la función de la Fuerza de Ascensión restando el valor de la Fuerza de Flotación a los valores de Fuerza de empuje vertical. Obviamente, la hipótesis de que la fuerza de flotación se mantiene constante para todos los flujos debe ser estudiada con mayor detalle, pero permite realizar una primera estimación.

Bajo dicha hipótesis, se observa en el gráfico de la Figura V-79 la evolución de la influencia de la Fuerza de Ascensión, siendo tan influyente como la propia Fuerza de Flotación para velocidades de 0.8 m/s en modelo, correspondientes a 3.4 m/s en prototipo. Para velocidades inferiores a 1 m/s en prototipo ( $v_m = 0.24 \text{ m/s}$ ), la influencia de la Fuerza de Ascensión podría ser despreciable, con una aportación entorno al 2% del total.

Por otro lado, de acuerdo con la anterior expresión [V-52] y con el valor de la constante obtenida para el ajuste de la parábola, se presenta la siguiente igualdad:

$$\frac{1}{2} \rho_w C_L A = a = 2.7 \quad \text{[V-54]}$$

El valor del área proyectada ( $A$ ), se puede estimar, según el esquema de la Figura V-80, de la siguiente manera:

$$A = l_c \cdot (y - GC) \quad \text{[V-55]}$$

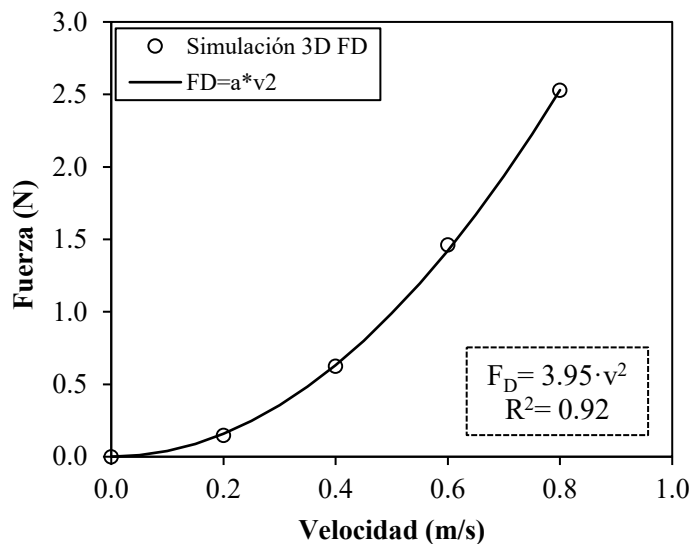


**Figura V-80.** Aproximación del área proyectada del vehículo con respecto la dirección principal del flujo

El valor del área proyectada para el caso de estudio es de  $0.28 \text{ cm}^2$ , para un calado de 2 cm, una longitud del vehículo (e: 1/18) de 255 mm y con una altura libre de 9 mm.

Considerando el valor del área proyectada constante para todas las simulaciones, se ha obtenido un valor del coeficiente de ascensión ( $C_L$ ), despejando de [V-54], de 1.93. En el trabajo de Arrighi *et al.* (2015) se presentan valores del coeficiente de ascensión muy variantes, desde 0.002 hasta 23, dependiendo de las condiciones de flujo y la orientación del vehículo. Para el vehículo a escala simulado (e: 1/18) orientado frontalmente al flujo, con 2 cm de calado y una velocidad de aproximación de 0.78 m/s se obtuvo un coeficiente de ascensión de 0.156, muy inferior al aquí propuesto.

Siguiendo el mismo procedimiento, se ha realizado el ajuste de la parábola para las fuerzas de arrastre obtenidas en cada simulación (Figura V-81), obteniendo un valor de la constante (a) de 3.95. El ajuste de la curva presenta un coeficiente de correlación de 0.92, lo que indica un gran ajuste, mejorando incluso el anterior. Para el mismo valor de área proyectada y un valor de la constante (a) de 3.95 se obtiene un coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) de 2.82. Los valores del coeficiente de arrastre en el trabajo de Arrighi *et al.* (2015) varían desde 0.006 hasta 0.471, dependiendo de las condiciones de flujo y la orientación del vehículo. En el estudio de Arrighi *et al.* (2015), para el vehículo a escala simulado (e: 1/18) orientado frontalmente al flujo, con 2 cm de calado y una velocidad de aproximación de 0.78 m/s se obtuvo un coeficiente de ascensión de 0.208, muy inferior al aquí propuesto.



**Figura V-81.** Ajuste a una función parabólica de los valores de fuerza de arrastre de cada simulación

El análisis de los coeficientes de ascensión y arrastre merece un mayor estudio, contemplando, entre otros aspectos, la variación del área proyectada que realmente sí sucede. Sin embargo, los valores propuestos por Arrighi *et al.* (2015) parecen excesivamente bajos en la mayoría de los casos. En el libro Manual de Ingeniería Hidráulica (Lencastre, 1998) se propone un valor de  $C_d =$

2.0 para cuerpos paralelepípedos sumergidos, muy similar a un coche atravesado al flujo. Se trata de un valor de referencia más próximo al propuesto en este estudio.

## V.6. Síntesis y conclusiones

En este capítulo se han descrito las aplicaciones de técnicas numéricas tridimensionales en el estudio de la estabilidad de peatones y vehículos. Sin ser los resultados numéricos la base fundamental de esta tesis, con ellos se profundiza en los campos analizados y sobretodo se abren nuevas líneas de investigación mediante el uso de códigos tridimensionales. Se trata de campos de investigación en los que los experimentos son fundamentales, pero el uso y la información aportada por herramientas numéricas no deben ser despreciados.

En primer lugar, se ha llevado a cabo una revisión del estado de la cuestión, la cual indica el escaso desarrollo de simulaciones 3D en la estabilidad de vehículos y peatones. Se han encontrado únicamente tres estudios sobre vehículos, de los cuales solo uno se centra exclusivamente en su inicio de movimiento. La dificultad de llevar a cabo ensayos experimentales con vehículos prototipo, así como con personas, podría ser el motivo principal por el que estas herramientas tridimensionales podrían ser utilizadas. Un único estudio centrado en la estabilidad de peatones ha sido encontrado en la bibliografía.

Se ha presentado también en este capítulo una muestra de los principales códigos tridimensionales del mercado, agrupados por libres y comerciales. El software comercial utilizado en este caso es Flow-3D, que, aunque también presenta ciertas limitaciones, se trata de un programa ampliamente contrastado en el mercado. Los modelos realizados son, por un lado, la plataforma de ensayos de estabilidad para peatones, y por otro, la pendiente local variable en la que se ensayaron los vehículos a escala reducida. Inicialmente se han descrito los procedimientos generales para realizar ambos modelos, incidiendo en las formulaciones utilizadas por Flow-3D, el tipo de resolución numérica llevada a cabo, métodos de resolución del contacto entre fluidos y entre fluido y estructura, la disipación de energía, geometría y mallado, condiciones de contorno, y por último, con un poco más de detalle, la manera como Flow-3D simula los objetos móviles para determinar la inestabilidad de los vehículos. En última instancia, se describe el procedimiento de calibración de cada uno de los modelos numéricos y la discusión de los resultados obtenidos a partir de cada uno.

Respecto al análisis numérico de la estabilidad de peatones, la modelación llevada a cabo trata de la incorporación de la silueta de una persona en posición de cruce en la plataforma de ensayos, donde se llevó a cabo la campaña experimental. El caso escogido para la simulación numérica supuso una inestabilidad en los ensayos experimentales, para un sujeto de género femenino, de 1.67 m de altura y 65 kg de peso, en buenas condiciones de visibilidad, manos desocupadas y llevando chanclas. Las condiciones hidráulicas que generaron esta inestabilidad fueron una velocidad media ( $\bar{v}$ ) de 2.5 m/s y un calado ( $y$ ) de 12.9 cm junto al bordillo más alto.

El proceso de calibración del modelo se ha llevado a cabo a partir de la definición del mallado (8.7 mm en la zona de detalle), el modelo de turbulencia ( $k - \omega$ ) y el ajuste del valor de la rugosidad ( $K = 0.2$  mm). Una vez elegido el modelo de turbulencia y realizado un mallado apropiado en la zona de interés, se ha modificado el valor de la rugosidad hasta que cinco perfiles de velocidades, situados equiespaciados en la sección de estudio, numéricos y experimentales se

ajustaban adecuadamente. Además, se ha comprobado que el calado numérico era muy similar al experimental en las posiciones de los cinco perfiles de velocidad.

Gracias a la obtención de la fuerza ejercida por el flujo de agua sobre la silueta de una persona mediante Flow-3D en base a un caso experimental en el que se produjo una inestabilidad, ha sido posible estimar el valor del coeficiente de rozamiento para el que se produjo dicha inestabilidad ( $\mu=0.18$ ). Si bien los coeficientes de rozamiento entre el calzado y el hormigón obtenidos experimentalmente son correctos y útiles para poder ser comparados entre ellos, la realidad es que dicho coeficiente varía dependiendo de la posición de la persona cuando camina, produciéndose la inestabilidad para un valor significativamente inferior al obtenido experimentalmente. Otros factores como las maniobras bruscas, ansiedad o miedo también afectan a la pérdida de equilibrio, pudiéndose generar situaciones de inestabilidad para coeficientes de rozamiento superiores a los supuestamente límites.

En cuanto al análisis numérico de la estabilidad de vehículos, se han llevado a cabo 3 fases de simulaciones para un único vehículo Mercedes Clase C (e: 1/18). La primera responde a la simulación del vehículo únicamente sometido a la fuerza de flotación, de manera que se valida que el calado de flotación numérico corresponde al experimental.

Para la segunda fase se comprueba el correcto comportamiento del vehículo cuando se ve sometido a ciertas condiciones hidrodinámicas. Se simulan dos situaciones: una correspondiente al caso 4 experimental, con un caudal de 5.99 l/s y una pendiente del 8%, y otra correspondiente a un caudal un 20% inferior (4.80 l/s). En ambos casos se comprueba una respuesta correcta en cuanto a la estabilidad, en primer lugar, analizando las fuerzas hidrodinámicas ejercidas sobre el vehículo y en segundo lugar, activando el módulo GMO para comprobar si el vehículo pierde su estabilidad o no. La fuerza de arrastre superaba la de rozamiento en la primera simulación, no siendo así en la segunda. La activación del módulo GMO, estableciendo 6 grados de libertad al vehículo, respondía de la misma forma.

Quedaba comprobado, por tanto, que el vehículo respondía numéricamente de la misma manera que lo hacía en laboratorio. Además, ese comportamiento confirmaba que el valor del coeficiente de rozamiento determinado en laboratorio era adecuado, pues el valor de la fuerza de rozamiento es razonable en cuanto a la estabilidad e inestabilidad del vehículo al compararla con la fuerza de arrastre del agua en cada caso.

Como última fase, se analizan diferentes situaciones que no fueron ensayadas en laboratorio. En primer lugar, se evalúa el comportamiento del vehículo ante seis diferentes condiciones de flujo (calados y velocidades), comprobando así la adecuación de la curva de estabilidad propuesta en base a los resultados experimentales. De las seis condiciones de flujo, tres debían ser estables y otras tres inestables, correspondiendo el análisis de fuerzas con lo previsto.

El desarrollo en esta fase de un modelo de un dominio de cálculo menor, permitió llevar a cabo, con unos costes computacionales razonables, el análisis de fuerzas para un vehículo prototipo (e: 1/1) que al compararse con las fuerzas escaladas del modelo (e: 1/18) correspondían adecuadamente. Queda comprobado numéricamente que los efectos de escala no alteran las fuerzas aplicadas sobre el vehículo prototipo y que, por tanto, los ensayos realizados en laboratorio son perfectamente escalables a prototipo.

Por último, se ha llevado a cabo un análisis de la influencia de la fuerza de ascensión, como componente de la fuerza de empuje vertical actuante sobre el vehículo. Se han evaluado 5 situaciones: la primera, en la que solo actúan fuerzas de flotación (sin velocidad de aproximación) para un calado de 2 cm, y las cuatro siguientes, para un mismo dominio y calado de 2 cm, pero con velocidades de aproximación de 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8 m/s. De esta manera se ha podido comprobar la influencia de la fuerza de ascensión, asumiendo que la fuerza de flotación permanecía constante, suponiendo que la diferencia entre la fuerza total de empuje vertical (obtenida mediante Flow-3D) y la fuerza de flotación es la parte correspondiente a la fuerza de ascensión actuante sobre el vehículo. Bajo estas suposiciones, se demuestra que la Fuerza de Ascensión es tan influyente como la propia Fuerza de Flotación para velocidades de 0.8 m/s en modelo, correspondientes a 3.4 m/s en prototipo. Para velocidades inferiores a 1 m/s en prototipo ( $v_m = 0.24 \text{ m/s}$ ), la influencia de la Fuerza de Ascensión podría ser despreciable, con una aportación entorno al 2% del total.

El hecho de realizar un modelo numérico calibrado con los resultados obtenidos experimentalmente, permite en este caso la modelación de cualquier vehículo y determinar su punto de inestabilidad ante diferentes condiciones de flujo. En este caso, al tratarse de objetos sólidos rígidos, no entran en juego conceptos como la maniobrabilidad de las personas, que introducen impredecibilidad en los resultados y, por tanto, permite la modelación numérica con un movimiento de éste acoplado al flujo. Se pueden obtener, además, las fuerzas actuantes sobre el vehículo, tanto la de arrastre como la de empuje vertical, de manera que el fenómeno puede ser comprendido con mayor detalle.

Es posible, por tanto, el desarrollo de curvas de estabilidad para cualquier vehículo a partir de simulaciones numéricas como las llevadas a cabo para el modelo Mercedes Clase C simulado para este estudio.

Se ha presentado en este capítulo, por tanto, una aplicación de herramientas hidráulicas tridimensionales para el estudio de la gestión del riesgo de inundaciones en zonas urbanas, con la que se abre una nueva y amplia línea de trabajo para futuros desarrollos.



## Capítulo VI

# *Aplicación a un caso de estudio: Badalona*

### VI.1. Introducción

En el presente trabajo se han desarrollado las herramientas que permiten evaluar la estabilidad de los peatones y la estabilidad de vehículos expuestos a inundaciones derivadas de lluvias extraordinarias o desbordamientos fluviales. Las funciones umbral, definidas en el Capítulo III y IV, permiten establecer criterios para definir los rangos de peligrosidad tanto para peatones como para vehículos. Como ya se introdujo en el primer capítulo de esta tesis, la peligrosidad es un componente fundamental de la evaluación del riesgo de inundaciones.

Para comunicar los resultados del análisis de riesgo y sensibilizar a las personas sobre éste, la descripción espacial del riesgo juega un papel muy importante. La mayoría de los enfoques de mapas de riesgo se centran en la escala local. Tales mapas permiten evaluar la situación de la inundación para parcelas de tierra y elementos como edificios e infraestructuras. Éstos son la base para la defensa de inundaciones locales. En este capítulo se describe el procedimiento llevado a cabo para aplicar las herramientas desarrolladas en esta investigación en un caso real, a escala local. Se presentan mapas de peligrosidad que serán el resultado de aplicar los rangos de peligrosidad (baja, media y alta) para peatones y vehículos en base a las funciones de estabilidad desarrolladas previamente. Un mapa de peligrosidad por inundación muestra la distribución espacial de dicha magnitud, es decir, aporta información de la intensidad y probabilidad de ocurrencia de la inundación (Merz *et al.*, 2007). En este sentido, se analizan diferentes periodos de retorno que tendrán como respuesta diferentes intensidades de inundaciones y por lo tanto diferentes impactos y distribución de la peligrosidad en la zona de estudio.

Los edificios son los elementos de las zonas urbanas que hasta el momento han presentado en la literatura el foco principal de la evaluación económica de daños ante inundaciones. Se debe tener en consideración que los daños económicos directos para un edificio inundado no solo dependen del calado de agua y del uso del edificio (Merz *et al.*, 2004). Otros factores importantes son las características del edificio (susceptibilidad de la estructura del edificio, medidas de precaución en la construcción, etc), variables socio-económicas (conocimiento de las inundaciones, estado financiero del dueño del edificio, perfil de edad de los habitantes o inquilinos etc.) y la calidad de la respuesta de emergencia (uso operacional del sistema de aviso temprano,



tiempo utilizado hasta que llega la asistencia, cantidad y calidad de la respuesta, etc.). Puesto que los vehículos, hasta el momento, no han sido el centro de atención en la evaluación de daños, no existen en la literatura consideraciones como las propuestas para edificios, aunque aspectos como la edad del vehículo o en este caso también el tiempo de alerta podrían hacer variar sensiblemente el daño ocasionado sobre éstos. En este caso de estudio, se lleva a cabo una evaluación de los daños económicos directos sobre vehículos para las inundaciones asociadas a cada uno de los periodos de retorno contemplados. En apartados posteriores se definen las curvas de daños consideradas.

Cuando se analizan otros tipos de daño de inundación (fatalidades, daños económicos indirectos, etc.) la situación es incluso más compleja. Por lo tanto, evaluaciones de daños por inundación normalmente se limitan a la consideración de daños directos, tal y como se procede en este capítulo poniendo el centro de atención en los vehículos. Esta limitación es problemática ya que diferentes indicadores de daños pueden llevar a distintas conclusiones sobre el riesgo de la inundación. El riesgo de inundación puede ser evaluado como más severo si el análisis de éste no solo considera los daños directos sino también las consecuencias adversas en la población y en las actividades económicas a largo plazo en las áreas propensas a ser inundadas. En cualquier caso, el objeto principal de este capítulo es poner en práctica las herramientas desarrolladas en esta investigación.

El caso de estudio escogido, la ciudad de Badalona, se enmarca dentro del proyecto BINGO (2015-2019) (Bringing INnovation to onGOing water management – a better future under climate change) que está financiado por el programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Union Europea, bajo el acuerdo de subvención con número 641739. La coordinación a nivel europeo de dicho proyecto se lleva a cabo desde el Laboratorio Nacional de Engenharia Civil (LNEC, Portugal). El propósito de este proyecto es proporcionar conocimiento práctico y herramientas a los usuarios finales, gestores de agua y a los responsables de la toma de decisiones y aplicación de políticas afectados por el cambio climático, para permitirles hacer frente de la mejor manera posible a las proyecciones climáticas, relativas a sequías e inundaciones. El proyecto se desarrolla por 20 socios de seis países diferentes, entre los que se incluyen centros de investigación e innovación, autoridades del agua y usuarios y compañías de agua. En el caso de estudio español (Badalona) la investigación se centra en los impactos por inundación en las actividades en zonas urbanas, así como los impactos por vertidos en masas de agua receptoras (aguas de baño o corrientes naturales). Badalona forma parte del área metropolitana de Barcelona y es la tercera ciudad más poblada en Cataluña con 220.000 habitantes.

La ciudad se enfrenta a dos principales problemas de drenaje: las inundaciones urbanas debidas a la morfología de la cuenca de aportación (altas pendientes en cabecera y zonas planas aguas abajo) y los vertidos de la red de drenaje unitaria para medios y elevados eventos de lluvia en sus 5 km de playas que causan un gran impacto en la calidad del agua y en el turismo. Inundaciones y sobrecargas de la red en septiembre del año 1999 ocasionaron pérdidas económicas de más de 125 millones de euros en reclamaciones a compañías aseguradoras. Estas pérdidas solo consideraban daños directos los cuales eran cubiertos por los seguros (y en consecuencia no estaban incluidos los daños indirectos y aquellos que aún siendo directos no estaban cubiertos por las compañías). En agosto del año 2000 se produjo una inundación costera que también ocasionó serios problemas medioambientales, sociales y daños económicos de los que 80 millones de euros fueron reclamados a las compañías de seguros.

De acuerdo con la metodología empleada por la Unión Europea (Dirección general de política regional) para un informe de auditoría que tiene que ver con intervenciones financiadas por fondos de cohesión, las pérdidas económicas debidas a vertidos del sistema de drenaje unitario a masas de agua pueden ser estimadas en al menos 1700 millones de euros para cada temporada de baño. Estos problemas se espera que sean crecientes a causa del cambio climático.

El trabajo se centrará en mejorar la resiliencia ante inundaciones y vertidos del sistema de drenaje unitario en un contexto de cambio climático mediante una gestión avanzada de drenaje urbano. Esto estará basado en la modelación integrada del ciclo del agua urbana.

Se trata por tanto de un caso de estudio idóneo para la aplicación de los resultados obtenidos en esta tesis. El análisis se centra únicamente en las inundaciones producidas en la ciudad de Badalona, definiendo niveles de peligrosidad y riesgo para peatones y vehículos, para inundaciones derivadas de precipitaciones de diseño asociadas a diferentes periodos de retorno. El riesgo sobre vehículos se define en base a la estimación de los daños directos de dichas inundaciones sobre los vehículos presentes en Badalona.

## VI.2. Datos de partida

Para la realización de los mapas de peligrosidad y la estimación de daños, en primer lugar, se debe llevar a cabo una modelación hidrodinámica de un cierto evento de lluvia, para poder delimitar la zona de inundación. En este caso la empresa Aquatec (*SUEZ Water Advanced Solutions*), quien se encarga de desarrollar el proyecto BINGO para el caso de estudio en Badalona, ha llevado a cabo el modelo hidrodinámico.

Por tanto, se parte de los archivos de resultados de velocidades y de calados facilitados. Éstos son el resultado de la modelación hidrodinámica bidimensional obtenidos mediante el programa Infoworks, con el que se considera no solo la circulación de la escorrentía en las calles sino también la entrada y/o salida de agua de la red de drenaje (Djordjevic *et al.*, 1999).

Se han considerado los periodos de retorno de 1, 5, 10, 100 y 500 años y se han construido lluvias de proyecto mediante el método de los bloques alternados en base a las curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF) Barcelona-Fabra, ya que se trata del observatorio más próximo a la zona de estudio y con mayor información disponible. Las curvas IDF fueron recientemente actualizadas en base a series de datos de 81 años (desde 1927 hasta 1992 y desde 1995 hasta 2009) (Rodríguez *et al.*, 2014). Cada lluvia ha dado lugar a la delimitación de la inundación producida y, por tanto, se parte de un archivo de resultados, con velocidades y calados entre otros, para cada periodo de retorno considerado.

Por otro lado, puesto que la herramienta de trabajo para la elaboración de los mapas de peligrosidad será el programa ArcGIS, la empresa Aquatec (*SUEZ Water Advanced Solutions*) también ha facilitado los archivos de información cartográfica y usos del suelo para la ciudad de Badalona.

En la Figura VI-1 se muestran los mapas de calados, elaborados mediante el software ArcGIS y a partir de los resultados de calados facilitados como información de partida. Con éstos se puede obtener una primera idea de las zonas más afectadas, y para qué periodo de retorno empieza a ser considerable la inundación. Estas zonas se comentarán en detalle en apartados posteriores a partir de los mapas de peligrosidad y riesgo construidos.

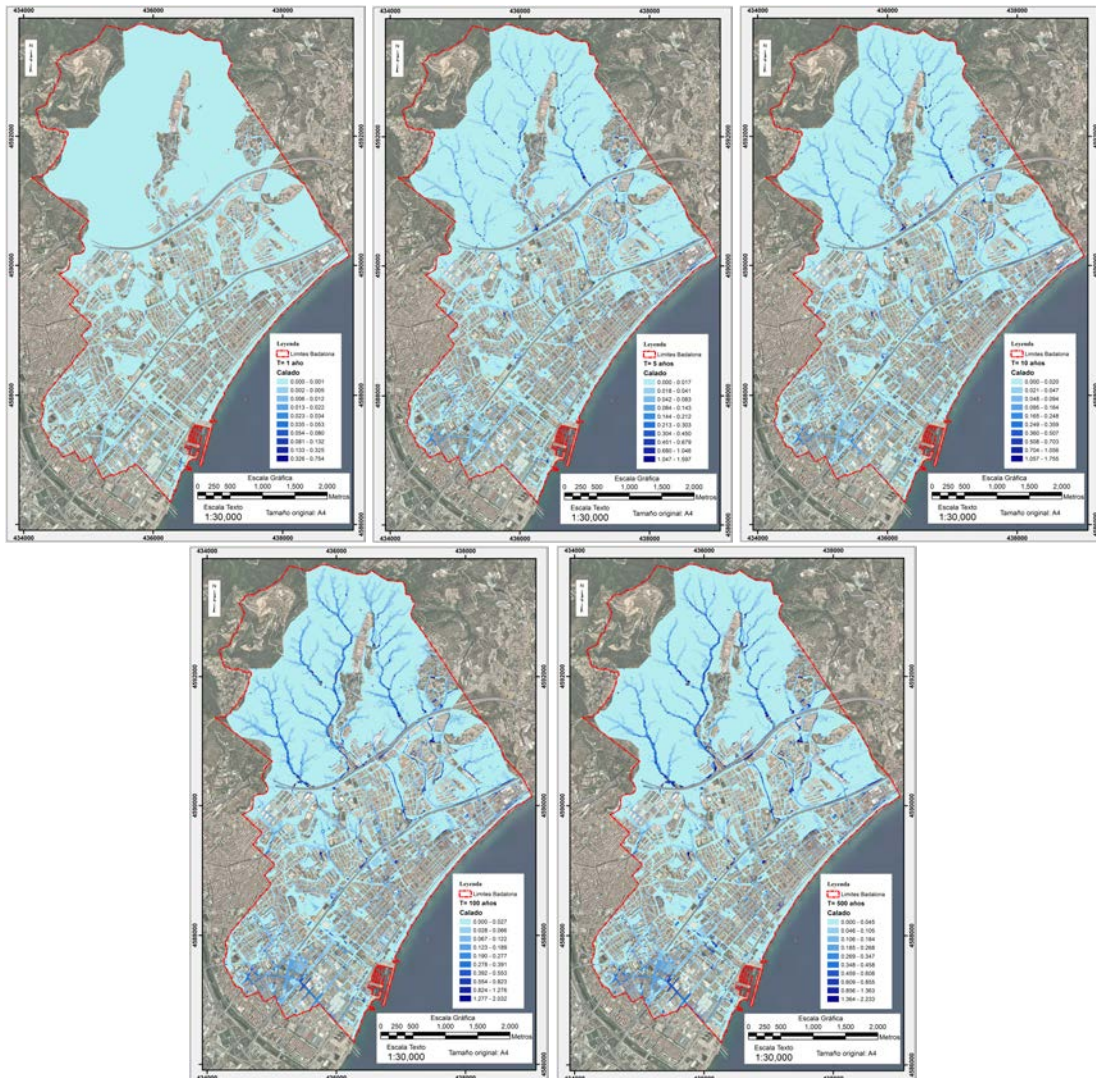


Figura VI-1. Mapas de calados. T= 1, 5, 10, 100 y 500 años. Unidades en metros

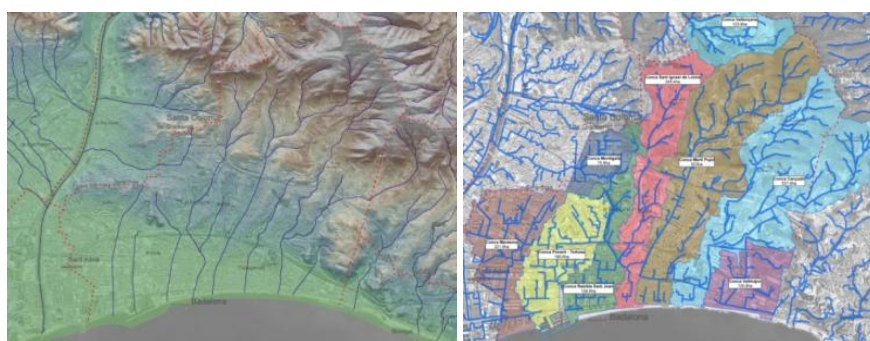
### VI.3. Descripción de la zona de estudio: Municipio de Badalona (Barcelona)

Badalona es una ciudad y municipio español de la comarca catalana del Barcelonés, en la provincia de Barcelona. Se encuentra situada a 10 km de distancia de Barcelona en la costa del mar Mediterráneo y ocupa parcialmente el delta del Besós y las estribaciones de la Sierra de la Marina. El término municipal está situado en el extremo norte de la comarca del Barcelonés y junto con otras poblaciones forma parte del Área metropolitana de Barcelona. Se trata además de la ciudad más importante de la región conocida como Barcelonés Norte. Badalona es la tercera ciudad más poblada de Cataluña con 220.000 habitantes, tras Barcelona y Hospitalet de Llobregat, y por delante de Terrassa y Sabadell, así como la vigesimosegunda de España.



**Figura VI-2.** Localización de Badalona en España y Cataluña y Cartografía del municipio

Badalona es una ciudad tanto de mar como de montaña. La sierra de la Marina, pasa por la parte norte y oeste del término municipal. Podemos destacar las montañas del Amigó, con la colina de la Coscollada (466 m de altitud), la colina de las Maleseles (462 m) y la colina del Fraile Rafael (414 m). También la sierra de Mosques d’Ase (131 m), la sierra de Montigalá (150 m), la sierra del Mediterráneo (171 m), la sierra de Boscá (206 m) y la sierra de Caritg (80 m). También cabe destacar las abundantes rieras presentes en la ciudad. La Riera de Cañet, la Riera Matamoros y la Riera de Canyonó son algunas de las más importantes. Aparte, desde la vertiente hidrográfica, existen fuentes en la parte montañosa que alimentan las rieras.



**Figura VI-3.** Principales cursos de agua en Badalona (izquierda) y delimitación de subcuencas (derecha)

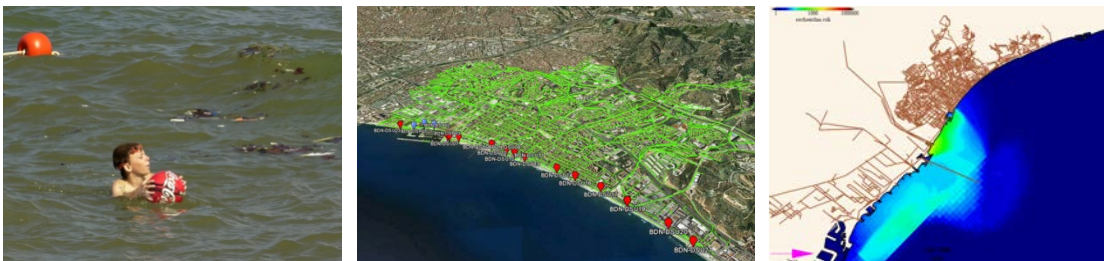
La morfología de la cuenca de Badalona se caracteriza por altas pendientes (4% de promedio) en la parte superior de ésta y zonas planas en la parte baja de la cuenca.

Además, el terreno del municipio ha sufrido una gran urbanización en los últimos siglos. Estas características facilitan la ocurrencia de inundaciones repentinas en varios puntos críticos de la ciudad que producen grandes daños económicos y condiciones de alta peligrosidad.



**Figura VI-4.** Inundación producida tras un fuerte evento de lluvia por falta de capacidad de la red de drenaje (izquierda). Comportamiento hidráulico del sistema de drenaje indicando en rojo las conducciones con sobrecarga (derecha)

Badalona presenta otros problemas medioambientales, que afectan al turismo cuando ocurren vertidos en tiempo de lluvia hacia las aguas de baño en sus varios kilómetros de playa. Tras los eventos de lluvia, no toda el agua es tratada por las estaciones depuradoras y es esa agua que es vertida directamente al mar, generando daños sociales y económicos, lo que produce la inhabilitación de las aguas de baño tras esos vertidos.



**Figura VI-5.** Consecuencias de los vertidos (izquierda). Puntos de vertido (centro) y modelación de la dispersión de contaminantes en aguas de baño (derecha)

Algunas ciudades del Área Metropolitana de Barcelona (AMB) aún hoy en día se ven afectadas por frecuentes inundaciones y problemas de contaminación tras fuertes eventos de lluvia. Aunque éstas disponen de recientes Planes Directores de Drenaje Urbano, el contexto económico de hoy en día no permite la construcción de las infraestructuras necesarias para evitar tales problemáticas. Además estas ciudades disponen de una red de drenaje poco o nada flexible y su gestión se lleva a cabo de una manera convencional.

## VI.4. Evaluación de la peligrosidad para peatones y vehículos: Mapas de peligrosidad

La evaluación de la peligrosidad en este caso de estudio se centra en peatones y vehículos cuando éstos se ven expuestos a inundaciones en entorno urbano. En los capítulos anteriores de esta tesis se ha propuesto el límite de estabilidad para ambos y en este apartado se presentan los criterios basados en tales umbrales para clasificar la peligrosidad a ambos según tres niveles: leve, media o alta.

### VI.4.1. Criterio aplicado a la estabilidad de peatones

En el Capítulo III se describió la campaña experimental llevada a cabo para obtener los límites de estabilidad de peatones cuando se ven expuestos a corrientes de agua típicas de inundaciones pluviales que a menudo se dan en nuestras ciudades. Cada ensayo se agrupó en peligrosidad baja, media o alta según los siguientes criterios:

- **Peligrosidad alta:** únicamente aquellos experimentos en los que la persona perdió por completo la estabilidad
- **Peligrosidad media:** La persona ensayada mostró una clara dificultad para llevar a cabo el protocolo completo. Se observa un gran esfuerzo por parte del individuo. Lentitud, tropiezos puntuales, resbalones, pérdidas del calzado son otras características tenidas en cuenta en la clasificación de este nivel de peligrosidad
- **Peligrosidad baja:** Pequeñas o nulas inestabilidades. La persona ensayada realiza el protocolo al completo sin complicaciones ni esfuerzos significativos

La representación de aquellos puntos que ocasionaron peligrosidad alta define el umbral que delimita la zona de seguridad para los peatones  $(v \cdot y) = 0.22 \text{ m}^2/\text{s}$ . Si por otro lado se consideran también aquellas situaciones que se clasificaron como peligrosidad media en este estudio y también en el de Russo (2009), el umbral inferior que definiría la zona de seguridad sería  $(v \cdot y) = 0.16 \text{ m}^2/\text{s}$  (Figura VI-6).

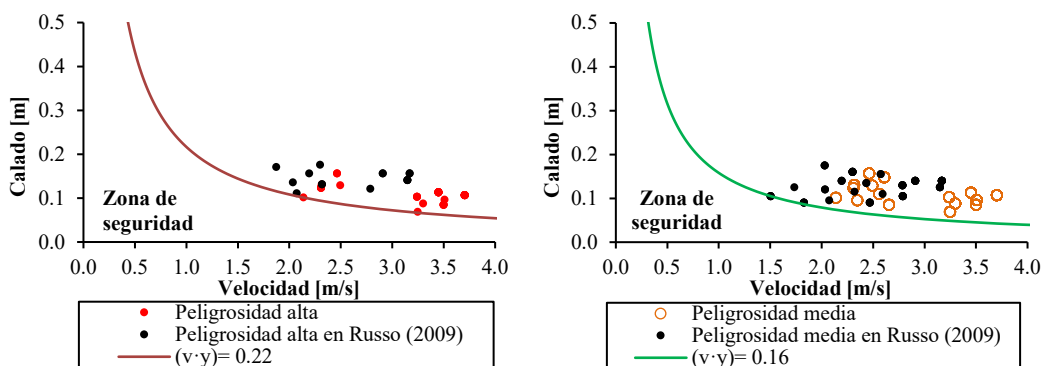


Figura VI-6. Representación de puntos de alta y media peligrosidad junto con los límites  $(v \cdot y) = 0.22 \text{ m}^2/\text{s}$  y  $(v \cdot y) = 0.16 \text{ m}^2/\text{s}$  respectivamente

Los límites propuestos para la delimitación de la peligrosidad para peatones son: Peligrosidad Baja para condiciones de flujo con producto  $(v \cdot y)$  inferior a  $0.16 \text{ m}^2/\text{s}$ , Peligrosidad Media para

valores comprendidos entre  $0.16 \text{ m}^2/\text{s}$  y  $0.22 \text{ m}^2/\text{s}$ , y Peligrosidad Alta por encima de  $0.22 \text{ m}^2/\text{s}$ . El máximo calado de agua aceptado será de  $0.5 \text{ m}$  tal y como Cox *et al.* (2010) proponen, quienes consideraron este umbral como calado límite para la estabilidad de niños. Por lo tanto, condiciones de peligrosidad Media y Leve se encuentran ambas por debajo de un calado de  $0.5 \text{ m}$ .

Es cierto que, aplicando una visión conjunta de las consecuencias de una inundación urbana, en el caso de calados de hasta  $0.5 \text{ m}$  el impacto económico sobre edificios sería muy elevado. Por tanto, tales valores no deben ser asumibles en ningún caso en una ciudad. El valor propuesto representa meramente un límite de estabilidad para personas, justificado por autores previos. En muchas ciudades existen propuestas de calados máximos asumibles ( $6 \text{ cm}$  en Barcelona), muy inferiores al aquí propuesto. Es decir, se pretende evaluar de manera independiente, la peligrosidad para vehículos y para peatones, lejos de querer ofrecer unas restricciones conjuntas en cuanto a calado y velocidad que limiten todos los impactos de una inundación urbana. En el municipio de Badalona no hay establecida ninguna restricción en cuanto al calado y velocidad en las calles.

Además, en este estudio, se considera una velocidad máxima admisible en las calles de  $1.88 \text{ m/s}$  tal y como Russo (2009) propuso tras evaluar experimentalmente que no se daban inestabilidades para velocidades por debajo de dicho valor (Figura VI-7).

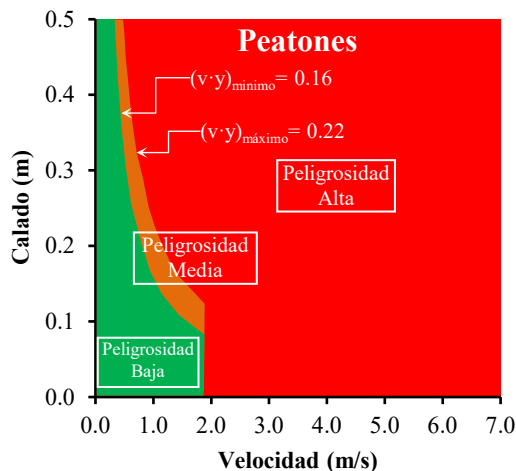


Figura VI-7. Criterio de rangos de peligrosidad propuesto para peatones

#### VI.4.2. Criterio aplicado a la estabilidad de vehículos

La metodología para evaluar la estabilidad de vehículos propuesta en el Capítulo IV, se basaba en la determinación del coeficiente de estabilidad modificado ( $SC_{mod}$ ) para aquel vehículo para el que se quiera obtener su umbral de estabilidad:

$$SC_{mod} = \frac{GC \cdot M_c}{PA} \cdot \mu \quad \text{[VI-1]}$$

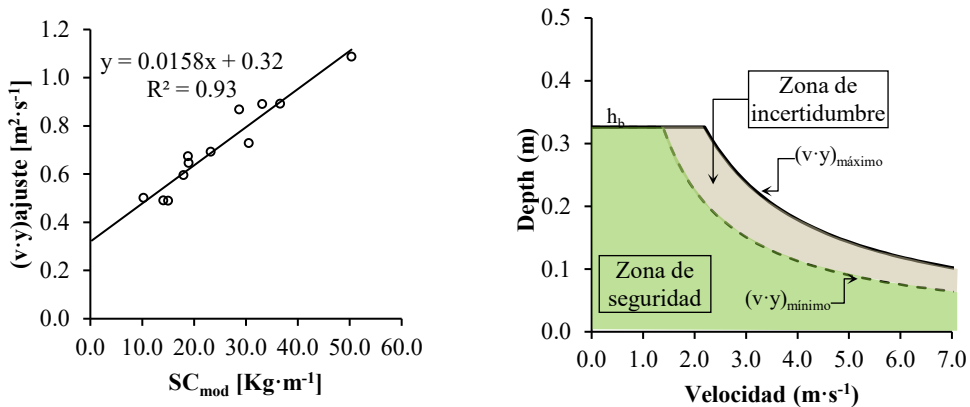
Siendo  $GC$  la altura libre bajo el vehículo en metros,  $M_c$  el peso del vehículo en kilos,  $PA$  es el área en planta en  $\text{m}^2$  y  $\mu$  es el coeficiente de rozamiento entre el neumático y el terreno. Se trata de

una herramienta que pueden usar los responsables en la toma de decisiones definiendo un **vehículo tipo** para la zona de estudio y obteniendo su correspondiente umbral de estabilidad.

Para delimitar completamente el umbral de estabilidad, se define teóricamente el calado de flotación a partir de la expresión [VI-2],

$$h_b = \frac{M_c}{\rho_w \cdot PA} + GC \tag{VI-2}$$

donde  $h_b$  es el calado de flotación en metros,  $M_c$  es la masa del vehículo en kilos y  $\rho_w$  es la densidad del agua en  $\text{kg/m}^3$ .



**Figura VI-8.** Ajuste lineal de los valores  $(v \cdot y)_{\text{ajuste}}$  y  $SC_{\text{mod}}$  para cada vehículo ensayado (izquierda) y definición gráfica de la metodología propuesta (derecha)

De acuerdo con los datos de la Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC), los tres vehículos más vendidos en España son el Citroen C4, el Seat León y el Seat Ibiza. El vehículo tipo propuesto para llevar a cabo el presente caso de estudio es el modelo **Seat Ibiza** puesto que presenta el menor valor de  $SC_{\text{mod}}$ , según se determinó en el Capítulo IV al obtener los límites de estabilidad para estos tres vehículos. El umbral de estabilidad del modelo Seat Ibiza, según la metodología propuesta, es  $(v \cdot y)_{\text{mínimo}} = 0.40 \text{ m}^2/\text{s}$  y presenta un calado de flotación teórico de 28 cm. Para definir los límites de los niveles de peligrosidad se propone un nuevo valor para  $(v \cdot y)_{\text{máximo}}$ . En este caso, en lugar de un valor de  $\mu = 0.75$ , tal y como se propuso en el Capítulo IV, se utiliza un valor promedio de los valores obtenidos experimentalmente. Este valor promediado es  $\mu = 0.58$  con el que se obtiene un  $SC_{\text{mod}} = 11.16 \text{ kg/m}$ , y por lo tanto un umbral de  $(v \cdot y)_{\text{máximo}} = 0.50 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Así, los límites propuestos para la delimitación de los rangos de peligrosidad son: Peligrosidad Baja, para valores  $(v \cdot y)$  por debajo de  $0.40 \text{ m}^2/\text{s}$ , Peligrosidad Media, para valores  $(v \cdot y)$  comprendidos entre  $0.40 \text{ m}^2/\text{s}$  y  $0.50 \text{ m}^2/\text{s}$  y Peligrosidad Alta, para valores  $(v \cdot y)$  por encima de  $0.50 \text{ m}^2/\text{s}$  (Figura VI-9).



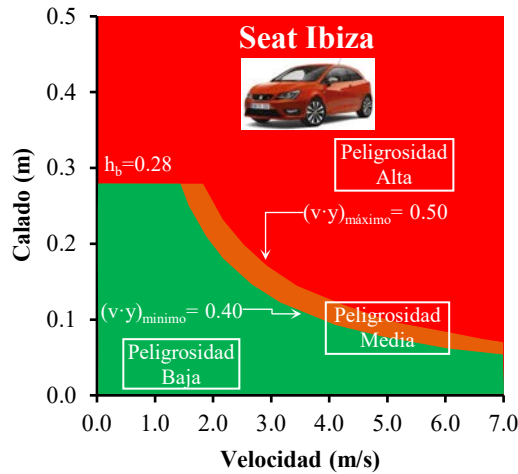


Figura VI-9. Criterio de rangos de peligrosidad propuesto para el vehículo de diseño

### VI.4.3. Metodología para la elaboración de mapas de peligrosidad para peatones y vehículos

En este apartado se describe el procedimiento para la definición de los mapas de peligrosidad para peatones y vehículos para los tres periodos de retornos considerados, según los criterios descritos anteriormente. En éstos se presentan tres rangos de peligrosidad: leve, media y alta.




Los mapas de peligrosidad, por tanto, son la aplicación directa de los criterios de peligrosidad propuestos en este mismo capítulo para peatones y vehículos, resultado de la investigación llevada a cabo para esta tesis. Los resultados de la simulación numérica bidimensional, mediante el programa Infoworks, permiten exportar un archivo .shp que puede ser abierto mediante ArcGIS (u otros programas SIG). Se trata de un conjunto de celdas triangulares que contienen, entre otros, el valor de la velocidad y del calado. Mediante operaciones en el programa ArcGIS se establece el criterio de peligrosidad a cada una de las celdas, de forma que se representaran colores indicando el nivel de peligrosidad.

El criterio para asignar a una celda un nivel de peligrosidad responde al valor del calado, de la velocidad y del producto velocidad por calado, tal y como se representó en la Figura VI-7 (peatones) y en la Figura VI-9 (vehículos). En la Tabla VI-1 y Tabla VI-2 se presentan los criterios expresados en forma analítica, los cuales han sido implementados en el programa ArcGIS, mediante un código en VBScript, relacionando cada criterio al color correspondiente, también indicado en cada tabla. Se obtienen, por tanto, tres mapas de peligrosidad para personas y otros tres mapas para representar la peligrosidad para vehículos, según los resultados de las inundaciones derivadas de las lluvias de periodo de retorno de 1, 5, 100 y 500 años.

Tabla VI-1 Criterios adoptados para los tres niveles de peligrosidad para peatones

Nivel de peligrosidad	Criterio adoptado	Color
Baja:	$y \leq 0.5 \text{ m}$ y $(v \cdot y) \leq 0.16 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	
Media:	$y \leq 0.5 \text{ m}$ y $0.16 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} < (v \cdot y) \leq 0.22 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	
Alta:	$y > 0.5 \text{ m}$ ó $(v \cdot y) > 0.22 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ó $v > 1.88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	

Tabla VI-2 Criterios adoptados para los tres niveles de peligrosidad para vehículos

Nivel de peligrosidad	Criterio adoptado	Color
Baja:	$y \leq 0.28 m$ y $(v \cdot y) \leq 0.40 m^2 \cdot s^{-1}$	
Media:	$y \leq 0.28 m$ y $0.40 m^2 \cdot s^{-1} < (v \cdot y) \leq 0.50 \cdot m^2 \cdot s^{-1}$	
Alta:	$y > 0.28 m$ ó $(v \cdot y) > 0.50 m^2 \cdot s^{-1}$	

## VI.5. Evaluación del riesgo para peatones y vehículos: Mapas de Riesgo

La evaluación del riesgo para peatones y vehículos se lleva a cabo de una manera bien diferenciada. Para la descripción espacial del riesgo para peatones se requiere en primer lugar el mapa de peligrosidad para peatones, en el que se distinguen tres niveles de peligrosidad: Alta, Media y Baja. En segundo lugar, se deben definir niveles de vulnerabilidad para los peatones, que serán representados espacialmente y cruzados con el mapa de peligrosidad.

El riesgo para vehículos se centra en la estimación de los daños económicos producidos sobre éstos, para un determinado evento. Dicha estimación se lleva a cabo mediante la aplicación de curvas de daños individuales para diferentes tipos de vehículos. En este apartado, sin pretensión de desarrollar nuevas curvas de daños, se adoptan directamente las más apropiadas en base al análisis del estado de la cuestión llevado a cabo en el Capítulo II de este documento. Se describe también en este apartado el concepto de Daño Anual Esperado, obtenido tras considerar los daños por inundación para distintos eventos de lluvia asociados a diferentes periodos de retorno, con el que se tiene una idea del riesgo de inundación para vehículos en términos económicos.

### VI.5.1. Metodología para la elaboración de Mapas de Riesgo para peatones

Para la descripción espacial del riesgo para peatones, se deben definir inicialmente niveles de vulnerabilidad. En este caso de estudio se proponen tres niveles de vulnerabilidad: Alta, para zonas urbanas con gran densidad de viviendas; Media, para zonas urbanas de baja densidad de viviendas; Baja, para zonas rurales o áreas en las que no se prevén peatones.

El concepto de vulnerabilidad es muy amplio y subjetivo, tal y como se describió en el Capítulo I, con lo que los niveles de vulnerabilidad para personas podrían considerarse según diferentes enfoques. Aspectos como la ubicación de zonas turísticas, centros hospitalarios o residencias de ancianos delimitarían zonas de gran vulnerabilidad en estudios de detalle. Se aplica en este caso un enfoque menos detallado, con el principal objetivo de presentar una metodología y pudiendo ésta adaptarse según el grado de detalle deseado en el estudio en cuestión. La definición espacial de los niveles de vulnerabilidad se ha llevado a cabo mediante observación de la fotografía aérea del municipio (Figura VI-10).

Las zonas de alta vulnerabilidad se han delimitado en aquellas áreas donde se ha observado una gran densidad de viviendas con calles más estrechas. La vulnerabilidad media recoge las zonas urbanas menos densas y con calles más anchas. Por último, se han definido como áreas de baja vulnerabilidad para peatones, aquéllas rurales y donde no se prevén peatones, como por ejemplo las carreteras principales que cruzan el municipio (C-31 y B-20) y la vía del tren.

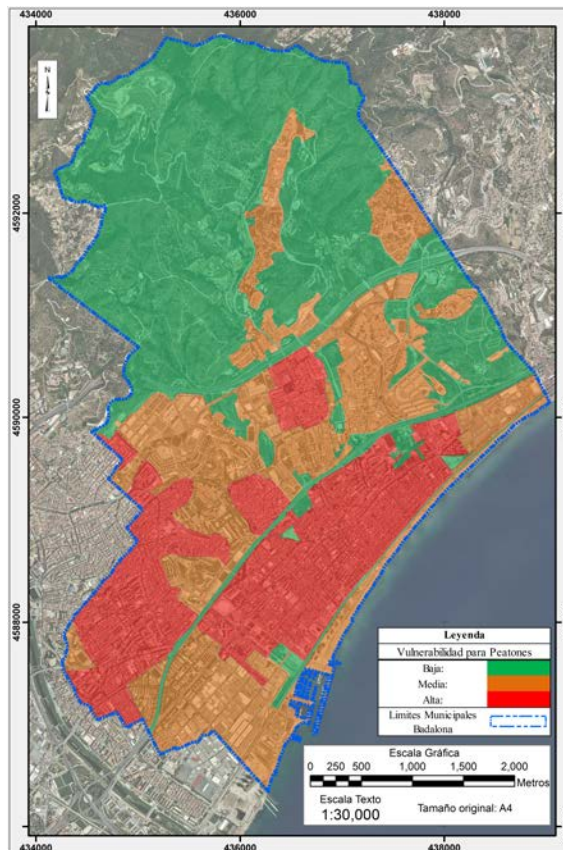
Dada esta propuesta de distribución espacial de los tres niveles de vulnerabilidad establecidos, el cruce con la distribución espacial de la peligrosidad de peatones definirá los niveles de riesgo

para peatones en el municipio de Badalona. Los tres niveles de riesgo se definen igualmente como: Bajo (B), Medio (M) y Alto (A). Una zona será delimitada con un cierto nivel de riesgo dependiendo de la combinación de los niveles de peligrosidad y de vulnerabilidad en esa misma zona, tal y como se propone en la Tabla VI-3.

**Tabla VI-3** Niveles de riesgo en función de los niveles de peligrosidad y vulnerabilidad

<b>Peligrosidad</b>	B	B	B	M	M	M	A	A	A
<b>Vulnerabilidad</b>	B	M	A	B	M	A	B	M	A
<b>Riesgo</b>	B	B	M	B	M	A	B	A	A

B: Baja, M: Media, A: Alta








**Figura VI-10.** Distribución espacial de los niveles de vulnerabilidad establecidos en Badalona

### VI.5.2. Curvas de daños para vehículos

La estimación de daños a vehículos, especialmente en inundaciones en zonas urbanas, resulta de gran importancia y es un tipo de daño directo que no suele ser considerado en la mayoría de estudios. De la misma manera que se procede con edificios, es posible determinar curvas de daños asociadas a diferentes tipologías de vehículos. Por ser éstas las más actuales y cuyo desarrollo queda suficientemente justificado, se han aplicado las curvas de daños desarrolladas por el U.S. Army Corps of Engineers (2009).

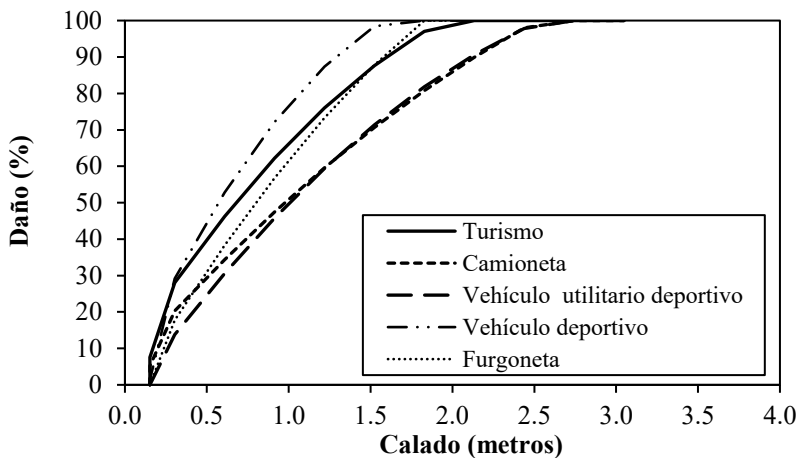
*Inundaciones urbanas: criterios de peligrosidad y evaluación del riesgo para peatones y vehículos*

**Tabla VI-4** Porcentaje de daños según calado de agua para los cinco tipos de vehículos considerados por el USACE. Valores considerados en el presente caso de estudio

Turismo		Camioneta		Vehículo utilitario deportivo		Vehículo deportivo		Furgoneta	
									
Calado (m)	Daño (%)	Calado (m)	Daño (%)	Calado (m)	Daño (%)	Calado (m)	Daño (%)	Calado (m)	Daño (%)
0.15	0	0.15	0	0.15	0	0.15	0	0.15	0
0.15	7.6	0.15	5.2	0.15	0	0.15	1.4	0.15	0
0.30	28.0	0.30	20.3	0.30	13.8	0.30	29.2	0.30	17.8
0.61	46.2	0.61	34.4	0.61	30.6	0.61	52.8	0.61	38.3
0.91	62.2	0.91	47.5	0.91	45.8	0.91	72.2	0.91	56.8
1.22	76.0	1.22	59.6	1.22	59.4	1.22	87.4	1.22	73.3
1.52	87.6	1.52	70.7	1.52	71.4	1.52	98.4	1.52	87.8
1.83	97.0	1.83	80.8	1.83	81.8	1.83	100	1.83	100
2.13	100	2.13	89.9	2.13	90.6	2.13	100	2.13	100
2.44	100	2.44	98.0	2.44	97.8	2.44	100	2.44	100
2.74	100	2.74	100	2.74	100	2.74	100	2.74	100
3.05	100	3.05	100	3.05	100	3.05	100	3.05	100

Se elaboraron curvas de daños para cinco tipos de vehículos a partir de una muestra de 640 vehículos. Tales datos fueron tratados estadísticamente para, mediante un análisis de regresión, construir dichas curvas.

En el Capítulo II se llevó a cabo un completo análisis del estado de la cuestión referente a curvas de daños para vehículos, y se ofrece una descripción detallada de las curvas desarrolladas por el U.S. Army Corps of Engineers (2009). Se presentan en la Tabla VI-4 los datos de calados frente al porcentaje de daños para las cinco tipologías de vehículos considerados, y en la Figura VI-11 la representación gráfica de dichos valores. El hecho de tratarse curvas de daño porcentual hace que sean trasladables y aplicables a otros países, considerando el coste pertinente del vehículo del país en cuestión.



**Figura VI-11.** Curvas de daños para vehículos desarrolladas por el USACE y consideradas en el presente caso de estudio

Para la aplicación de tales curvas, según la metodología que se describe más adelante, éstas deben ser modificadas para que ofrezcan el daño expresado en unidades monetarias por superficie ( $\text{€/m}^2$ ). El primer paso para su elaboración consiste en obtener superficies en planta y precios promedio de cada tipo de vehículo asociado a cada una de las curvas de daño. Se ha llevado a cabo una clasificación en las cinco tipologías de vehículos de la muestra considerada en el Capítulo IV y recogida en la Tabla IV-2. Dichos vehículos también han sido valorados según precio de venta de primera mano y se ha calculado el coste promedio de cada tipología. De la misma forma se han promediado las superficies en planta para cada uno de los grupos, recogándose en Tabla VI-5 los diferentes valores calculados.

**Tabla VI-5** Características promedio de los diferentes grupos de vehículos considerados

Tipo de vehículo	Superficie promedio ( $\text{m}^2$ )	Precio promedio (€)	% en Badalona
Turismo	7.31	18,253 €	83
Camioneta	7.54	17,599 €	7.5
Vehículo utilitario deportivo	8.80	58,337 €	1.5
Vehículo deportivo	8.80	103,949 €	0.5
Furgoneta	9.35	29,961 €	7.5

Según datos del Ayuntamiento de Badalona, el 85% de los vehículos registrados en el municipio son turismos y el 15% restante son camiones y furgonetas. Se excluye en este caso el grupo clasificado como “Autobuses y otros”, que no se considera en este estudio. De acuerdo con estos números proporcionados por el Ayuntamiento, se han propuesto los porcentajes que se recojen también en la Tabla VI-5 para cada grupo de vehículos considerado. De esta forma, los turismos considerados por el Ayuntamiento (85%) corresponderían a la suma de Turismos (83%), Vehículos utilitarios deportivos (1.5%) y Vehículos deportivos (0.5%), de acuerdo a la agrupación propuesta. La suma de Camionetas (7.5%) y Furgonetas (7.5%) corresponde al 15% de camiones y furgonetas propuesto por el Ayuntamiento. Obviamente se trata de vehículos que no necesariamente estarán todos los días en las calles de Badalona, pero aporta un orden de magnitud que se considera suficientemente representativo para este estudio.

A partir de las características promedio para cada grupo de vehículos, se tienen unos valores de un vehículo tipo para cada grupo. Es posible construir, por tanto, las curvas de daños asociadas a cada uno de ellos según se muestra en la Figura VI-12. El porcentaje de vehículos asociado a cada grupo, en definitiva, será la probabilidad de que un vehículo recogido en uno de esos grupos sufra daños por inundación. Es más probable que sea un turismo el que se vea afectado por la inundación en Badalona, en cuanto que el número de ellos es mucho mayor. En este sentido, se puede construir una única curva de daños obtenida a partir de la ponderación de cada una de ellas, que se verán afectadas por el porcentaje de vehículos de cada grupo según la expresión [VI-3] y tal como se representa en la Figura VI-13.

$$D_p = 0.83 \cdot D_T + 0.075 \cdot (D_C + D_F) + 0.015 \cdot D_{VUD} + 0.005 \cdot D_{VD} \quad \text{[VI-3]}$$

siendo  $D_p$  el daño ponderado,  $D_T$  el daño a turismos,  $D_C$  el daño a camionetas,  $D_F$  el daño a furgonetas,  $D_{VUD}$  el daño a vehículos utilitarios deportivos y  $D_{VD}$  el daño a vehículos deportivos.

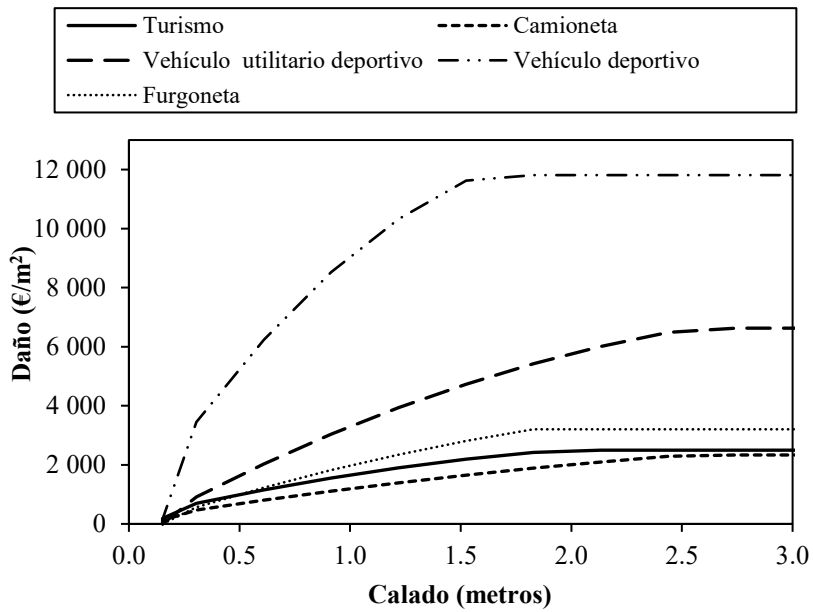


Figura VI-12. Curvas de daños para vehículos modificadas de las desarrolladas por el USACE

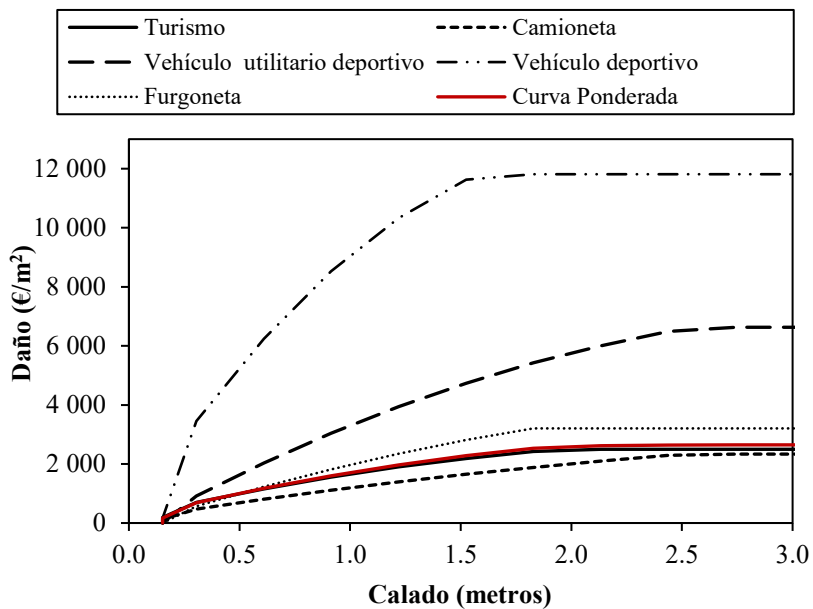


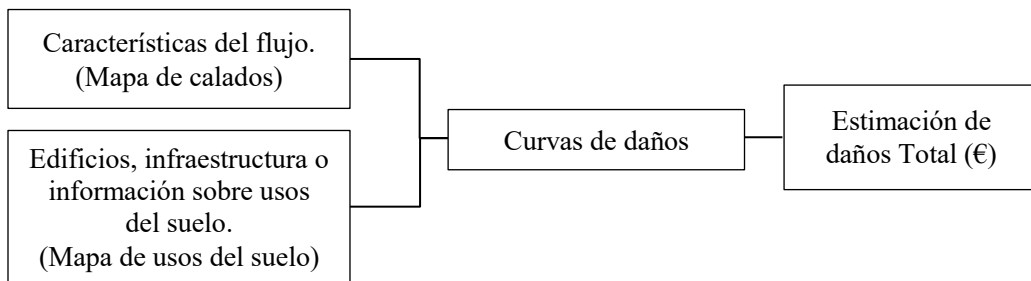
Figura VI-13. Curva de daños ponderada según el porcentaje de vehículos en Badalona

Se aplicará al caso de estudio, en Badalona, la curva de daños ponderada según el porcentaje de vehículos propuesto (Tabla VI-5).

### VI.5.3. Metodología para la elaboración de Mapas de Riesgo, basados en la evaluación del daño económico sobre vehículos

En este apartado se describe el procedimiento para la definición de **mapas de riesgo**, basados en la evaluación económica del daño sobre vehículos (daños directos) en la ciudad de Badalona para inundaciones derivadas de eventos de lluvia de 1, 5, 10, 100 y 500 años de periodo de retorno. Tales mapas de riesgo aportarán una idea de las zonas de Badalona más vulnerables en lo que se refiere a vehículos. A partir de estos mapas se determina el Daño Anual Esperado (DAE) según se describe en detalle en el próximo apartado.

Merz *et al.* (2010) describieron tres pasos en el cálculo de daños tangibles directos. En primer lugar, los elementos expuestos a riesgo deben ser clasificados en clases homogéneas (tipos de vehículos definidos en el apartado anterior), con mayor o menor detalle en función de la disponibilidad de datos, la escala y los recursos disponibles para el estudio. En segundo lugar, se debe realizar un análisis de los bienes y de su exposición, describiendo el número y tipo de elementos expuestos, y estimando su valor. En tercer y último lugar, se debe llevar a cabo un análisis que relacione el daño de tales elementos expuestos a las características de la inundación.



**Figura VI-14.** Pasos para el cálculo de daños tangibles directos propuestos por Merz *et al.* (2010)

Aunque no se ha aplicado en este caso de estudio, en un análisis con mayor nivel de detalle, se debería cruzar el umbral de estabilidad de los vehículos con los daños ocasionados sobre éstos (y sobre otros elementos de la ciudad). Las curvas de daños se consideran aquí únicamente para daños en función del calado de agua, sin que otras variables, como la velocidad, influyan en el daño al vehículo. En la evaluación del daño al vehículo se debería considerar la aplicación de las curvas de daño hasta que el vehículo sufra una inestabilidad, ya sea por flotación o por arrastre. Cuando el vehículo es arrastrado por el agua, puede chocar contra otros elementos de la ciudad y ocasionar más daño sobre estos elementos e incrementar los daños sobre él mismo. Se asume en este estudio, por tanto, independiente la estabilidad del vehículo y la aplicación de las curvas de daños.

La representación de las curvas de daño como €/m<sup>2</sup> (Figura VI-12) resulta de especial utilidad cuando se pretende aplicar estas curvas a un caso de estudio mediante herramientas SIG. De esta manera se puede asociar un **coste a cada una de las celdas** que presentan una determinada superficie, mayor o menor dependiendo de la resolución, y que componen el archivo de resultados (calados) obtenido a partir de simulaciones hidrodinámicas previas.

La variabilidad espacial de los daños en zonas urbanas es muy elevada. Los impactos ocasionados por las inundaciones en zonas urbanas pueden diferir mucho de una calle a otra. Por

lo tanto, en términos de escala espacial, las evaluaciones en zonas urbanas requieren de un estudio a microescala (Messner *et al.*, 2006). Este hecho se acentúa cuando, en lugar de edificios, se trata de vehículos que presentan dimensiones muy inferiores y, además, cuando no están aparcados, se encuentran en continuo movimiento.

Este tipo de evaluaciones en pocas ocasiones ha sido llevado a cabo en ciudades españolas, destacando como caso principal el llevado a cabo en el proyecto CORFU (Velasco *et al.*, 2013), para el barrio del Raval en Barcelona. Con excepción del proyecto CRUE (Francés *et al.*, 2008), en el que no se describe de forma detallada el procedimiento llevado a cabo, no se ha encontrado constancia documental de estudios en los que se evalúen los daños económicos a vehículos, ni en ciudades españolas ni en el resto del mundo.

Las curvas de daños a vehículos consideradas son las desarrolladas por el U.S. Army Corps of Engineers (2009) y adaptadas a daños por metro cuadrado (Figura VI-12). Además, se ha elaborado una curva ponderada (Figura VI-13) en base al porcentaje de vehículos que se han supuesto en Badalona (Tabla VI-5). Para llevar a cabo la evaluación económica de daños a vehículos se debe cruzar la información de resultados del estudio hidrodinámico, calados en este caso, con la distribución de vehículos en Badalona, clasificados según la Tabla VI-4, y las curvas de daños a vehículos propuestas.

Los dos aspectos principales en la evaluación de daños que deben ser estudiados en primer lugar son: la ocupación de vehículos y la hipótesis propuesta para su distribución espacial. Estos son los primeros pasos que deben ser llevados a cabo y se describen a continuación.

### VI.5.3.1. Caracterización de la ocupación de vehículos en Badalona

En primer lugar, en base a fotografías aéreas de 25 cm de resolución, obtenidas del Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC), se ha llevado a cabo una evaluación de la presencia de vehículos en Badalona. La resolución de las fotografías permite distinguir la presencia de un vehículo, aunque no permite definir con claridad el tipo de vehículo. La incertidumbre del tipo de vehículo quedará recogida en la ponderación de la curva de daños, en base a la hipótesis del porcentaje de las diferentes tipologías de vehículos considerados en Badalona.



**Figura VI-15.** Zona de detalle de Badalona. Fotografía aérea de 25 cm de resolución



La ocupación de vehículos, a diferencia de la de edificios, es un fenómeno temporal, puesto que varía dependiendo del día e incluso de la hora de un mismo día. Parece razonable considerar que un día laborable durante las horas de trabajo es el momento más desfavorable desde el punto de vista de los daños producidos por una inundación. En la Figura VI-15 se presenta una foto de una zona industrial de Badalona donde se observan claramente todos los vehículos presentes. Dos aspectos a considerar en esta imagen son que se trata de una fotografía tomada un día laborable, puesto que la zona industrial presenta multitud de vehículos, y además se aprecia que la cantidad de vehículos en circulación es despreciable frente a los aparcados. Con estas observaciones se puede concluir que el instante de tiempo en el que fue tomada la fotografía es adecuado para el análisis de la ocupación de vehículos y que el hecho de asumir que la totalidad de los vehículos están aparcados no supone alterar de forma apreciable los resultados.

Para evaluar la ocupación de vehículos en Badalona se han delimitado ocho zonas de análisis, de unas 11.5 hectáreas cada una (Figura VI-16). Se trata de zonas sobre las que se delimitan todos y cada uno de los vehículos presentes dentro de los límites de cada zona, obteniendo así el número de vehículos presente y la superficie en planta de cada uno de ellos.

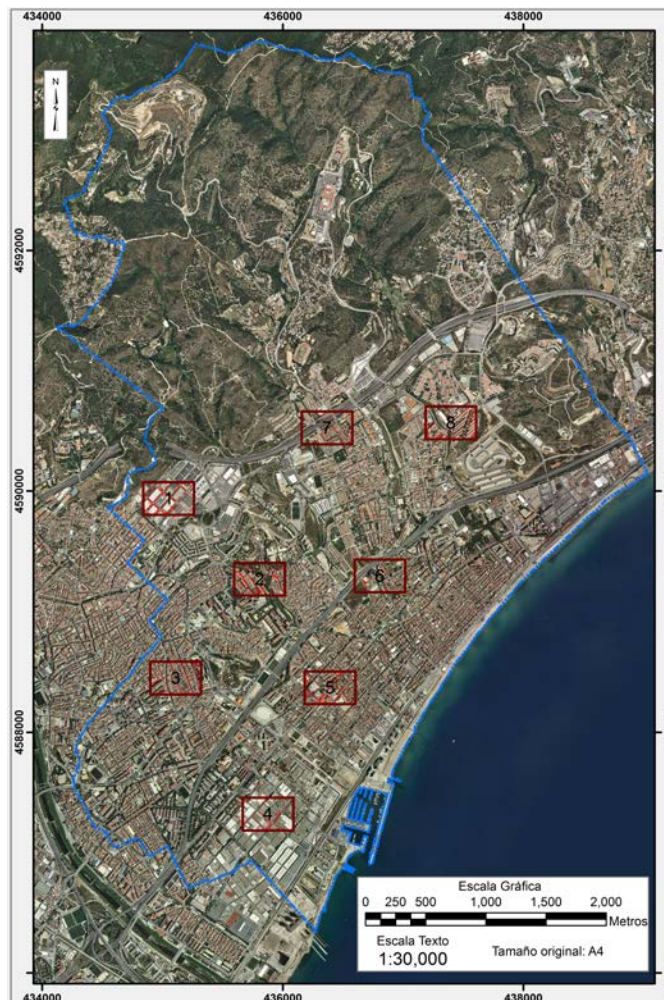


Figura VI-16. Localización de las ocho zonas de análisis en Badalona

Estas zonas han sido distribuidas por toda Badalona, exceptuando la zona norte más rural y con apenas presencia de vehículos, de manera que dé una idea de la ocupación de vehículos en diferentes puntos de Badalona un día laborable. Se puede apreciar en cada zona una ocupación de vehículos bastante diferenciada (Figura VI-17).



Figura VI-17. Detalle de las ocho zonas de estudio en Badalona y selección de los vehículos presentes

En la Tabla VI-6 se recogen las características de cada una de las zonas analizadas. El objetivo final es determinar la relación de metros cuadrados de vehículo por cada metro cuadrado de superficie útil. Se considera superficie útil aquella sobre la que pueden encontrarse vehículos, básicamente las calles, sin considerar la parcela de los edificios. Se observan ocupaciones desde el 2.3% en la zona 6 (106 vehículos) hasta un 9.8% (449 vehículos) en la zona 1.

**Tabla VI-6** Características de las zonas evaluadas y porcentaje de ocupación de vehículos en cada una

	Zona							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Superficie (m <sup>2</sup> )	114,566.99	114,566.99	114,566.99	114,566.99	114,566.99	114,566.99	114,566.99	114,566.99
Superficie útil (m <sup>2</sup> )	30,487.83	35,522.64	27,172.37	23,439.16	37,327.20	27,892.59	49,376.99	37,601.37
% superficie sobre total	0.54%	0.54%	0.54%	0.54%	0.54%	0.54%	0.54%	0.54%
nº vehículos	449	418	355	202	515	102	196	295
% sobre total	0.46%	0.42%	0.36%	0.21%	0.52%	0.10%	0.20%	0.30%
m <sup>2</sup> vehículo m <sup>2</sup>	2994.21	2777.02	2288.77	1289.96	3122.94	639.16	1191	1837.11
vehículo/m <sup>2</sup> sup útil	9.8%	7.8%	8.4%	5.5%	8.4%	2.3%	2.4%	4.9%

Cada zona evaluada se ha considerado como un patrón representativo de una mayor superficie de Badalona, de manera que toda el área municipal puede ser dividida según estos patrones con diferentes ocupaciones vehiculares (Figura VI-18):

- **Patrón 1:** Zona Industrial de alta ocupación vehicular.
- **Patrón 2:** Zona Residencial con alto porcentaje de zonas verdes y alta ocupación vehicular.
- **Patrón 3:** Zona Urbana Semiintensiva, con bajo porcentaje de zonas verdes y alta ocupación vehicular. Ubicación entre la carretera B-20 y la carretera C-31.
- **Patrón 4:** Zona Industrial de baja ocupación vehicular.
- **Patrón 5:** Zona Urbana Semiintensiva, alto porcentaje de nucleo antiguo y alta ocupación vehicular. Ubicación entre la carretera C-31 y la costa.
- **Patrón 6:** Zona Urbana con alto porcentaje de nucleo antiguo, alto porcentaje de zona verde y baja ocupación vehicular. Incluye carretera C-31 y la parte de zona urbana que no se encuentra en zona costera.
- **Patrón 7:** Zona residencial de baja ocupación vehicular, incluyendo carretera B-20.
- **Patrón 8:** Zona residencial con alto porcentaje de zonas verdes y baja ocupación vehicular.
- **Zona sin vehículos:** Se establece como zona sin vehículos la zona de cabecera de cuenca, donde prácticamente la totalidad de la superficie es rural. También una zona comprendida entre la carretera B-20 y la C-31 al Este del límite municipal.

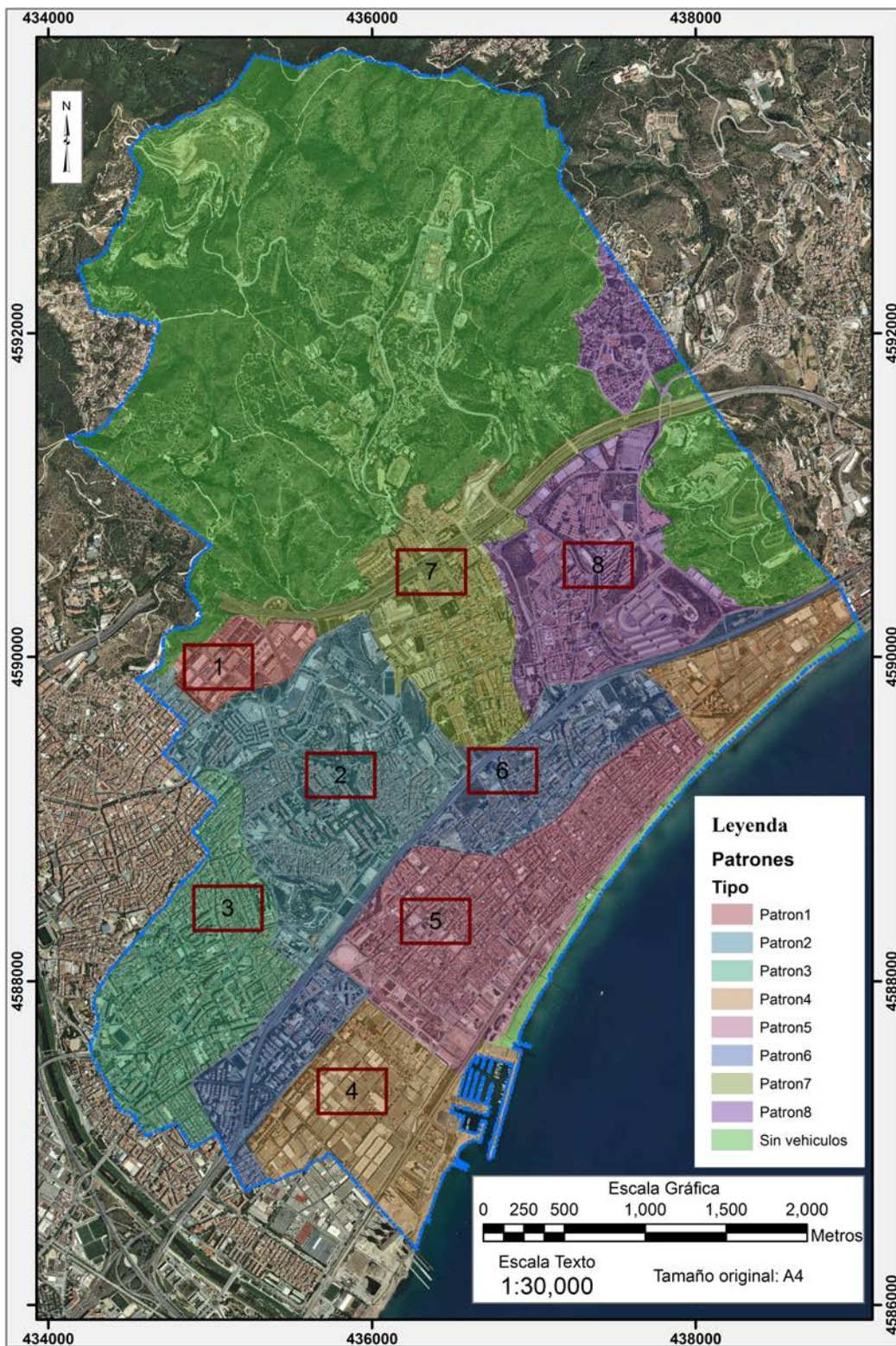


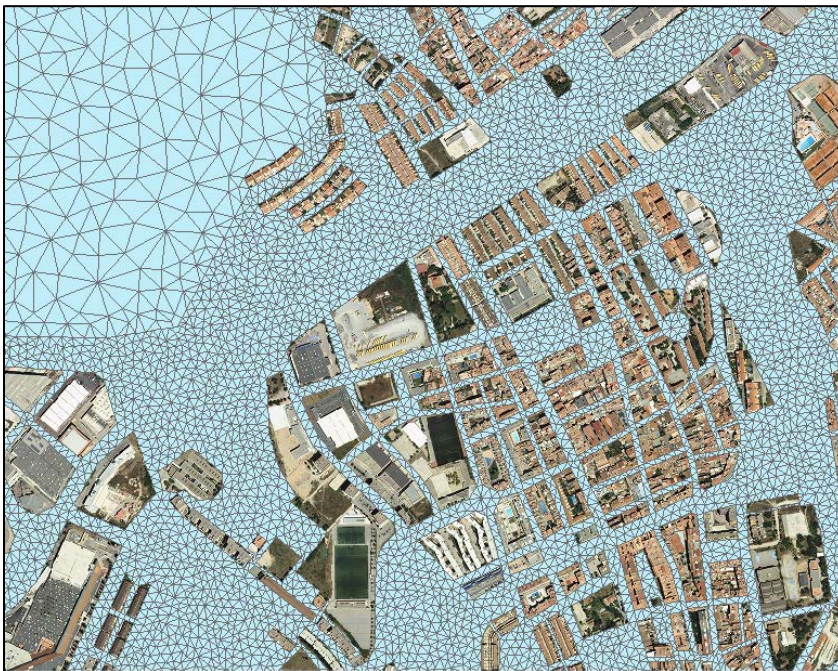
Figura VI-18. Patrones de ocupación de vehículos en Badalona

La división llevada a cabo permite considerar una ocupación vehicular heterogénea en el municipio de Badalona y mucho más realismo. Si bien la delimitación de todos y cada uno de los coches que se vieran en la imagen sería aún más realista, se trataría de una tarea extremadamente laboriosa, siendo prescindible en el presente estudio.

### VI.5.3.2. Distribución espacial de los vehículos. Método de aplicación de la curva de daños ponderada

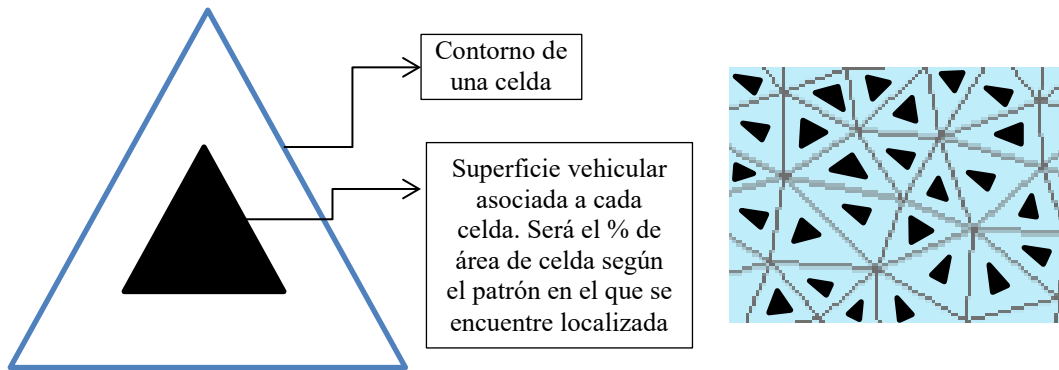
Podemos definir como **método completo**, aquel con el que se delimitarían todos los vehículos de la imagen para, una vez cruzada esta información con la hidrodinámica (calados), aplicar la curva de daños ponderada ( $\text{€/m}^2$ ) para la superficie en planta de cada vehículo. Se trata de la metodología ideal, puesto que se define con exactitud la posición de los vehículos en un instante de tiempo. La problemática es que dicho método es extremadamente laborioso si es llevado a cabo de forma manual. El desarrollo o aplicación de técnicas de fotogrametría, que permitan delimitar los vehículos presentes en la zona de interés, supondría un gran avance en este sentido, salvando así las dificultades que supone el trabajo manual. La disponibilidad frecuente de imágenes satelitales permitiría, además, llevar a cabo este proceso en varios instantes de tiempo y analizar las variaciones en cuanto a ocupación vehicular para diferentes momentos.

Pero en este estudio no se han aplicado técnicas de fotogrametría, siendo inviable, por tanto, el estudio de todo el municipio de Badalona mediante el método completo. En su lugar, habiendo determinado una ocupación vehicular heterogénea en Badalona, se establece un **método distribuido** considerando dicha ocupación en cada celda correspondiente al resultado hidrodinámico (Figura VI-19).



**Figura VI-19.** Celdas triangulares, resultado del cálculo hidrodinámico bidimensional. Cada celda almacena información hidráulica, entre otras variables el calado

Con dicho método distribuido se impone en cada celda la ocupación vehicular correspondiente, según la localización de dicha celda. Ese porcentaje, multiplicado por el área de la celda, ofrece la superficie vehicular presente en dicha celda (Figura VI-20). Por tanto, cada celda tiene asociada una superficie vehicular ( $m^2$ ) y un calado (m), con lo que mediante la curva de daños ponderada ( $€/m^2$  frente m) se obtiene un coste económico (€) por celda, y la suma de todas las celdas será el coste total en el área de estudio. Este método distribuido no presenta gran complejidad de implantación para una gran superficie como puede ser el término municipal de Badalona, siendo en cambio una tarea ardua la aplicación del método completo. Sin embargo, no existen garantías de que los resultados obtenidos sean lo suficientemente precisos, al no disponer de datos de daños reales para comparar.



**Figura VI-20.** Superficie vehicular asociada a una celda para la aplicación del método distribuido

Puesto que en las ocho zonas de análisis se ha llevado a cabo la delimitación de todos los vehículos presentes (método completo) (Figura VI-17), se ha realizado una comprobación del método distribuido frente al completo en cada una de las zonas de análisis. Para ello se ha cruzado la delimitación de cada vehículo, con las celdas que almacenan los resultados de calados (Figura VI-21).



**Figura VI-21.** Cruce de la delimitación de vehículos con las celdas que almacenan resultados de calados

Mediante esta operación se obtiene el calado relacionado a cada vehículo, con lo que la curva de daños ponderada puede ser aplicada a cada uno de ellos. En los casos en los que un vehículo se encuentra entre dos o más celdas, cada calado se asocia a la superficie de vehículo contenida en cada celda. Puesto que la diferencia de calado entre celdas contiguas no es significativa (entre 1 y 3 cm en la mayoría de los casos), el daño económico obtenido es prácticamente el mismo que considerando únicamente el mayor de los calados o el promedio de ellos sobre la totalidad de la superficie del vehículo.

Los resultados obtenidos de la evaluación económica de daños a vehículos, en las ocho zonas en las que se delimitaron todos los vehículos, se presentan en la Tabla VI-7. Esta tabla recoge la evaluación económica, para una inundación derivada de un evento de lluvia de 500 años de periodo de retorno, en cada zona mediante ambos métodos: completo y distribuido. Se observa que los resultados en ambos casos presentan el mismo orden de magnitud. El mayor desvío entre ellos es de un 41%, aunque el promedio de todas las zonas sería de un 13%, siendo el método distribuido el que ofrecería el valor más elevado. Se considera el método distribuido, por tanto, suficientemente representativo y válido para la estimación de daños en una gran superficie como puede ser el término municipal de Badalona.

**Tabla VI-7** Comparativa de la valoración económica del método distribuido frente al completo

500 años	Zona							
Método	1	2	3	4	5	6	7	8
Completo	179,715.12 €	504,570.01 €	85,927.63 €	16,581.74 €	28,179.48 €	15,662.16 €	382,049.82 €	250,756.66 €
Distribuido	171,681.41 €	560,977.14 €	120,989.49 €	12,813.98 €	35,207.92 €	16,301.54 €	534,614.37 €	198,385.93 €
Error (%)*	-4%	11%	41%	-23%	25%	4%	40%	-21%

\* Error negativo indica que obtenemos menos daño del real. Error positivo indica un daño superior al real. Se asume real al obtenido por el método completo

Una vez comprobado que el método distribuido es aplicable al caso de estudio, se lleva a cabo el procedimiento descrito para este método para las inundaciones derivadas de los eventos de precipitación de 1, 5, 10, 100 y 500 años de periodo de retorno. El resultado final, más allá de la preparación del mapa de riesgo (debido a los daños económicos directos a vehículos), será un valor económico del daño asociado a cada uno de los tres periodos de retorno considerados.

#### VI.5.4. Daño Anual Esperado (DAE)

Una vez estimado el daño para la zona de inundación y para los periodos de retorno que se han considerado, se procede a calcular el DAE. Se ha establecido que la evaluación del riesgo sigue principalmente una perspectiva de evaluación económica. Usando esta idea del riesgo para estimar el DAE por inundación, se calcula con la integración del área bajo la curva que se forma al graficar la probabilidad de ocurrencia del daño respecto de la cantidad económica de daños, mediante la expresión [VI-4] (Meyer *et al.*, 2011).

La estimación del DAE consiste, entonces, en calcular el daño promedio de dos eventos de probabilidad de excedencia  $i$ , con un intervalo ( $\Delta P_i$ ) de probabilidad entre las probabilidades de excedencia de ambos eventos. La estimación del DAE se realiza para los periodos de retorno para los que se tenga información de calados.

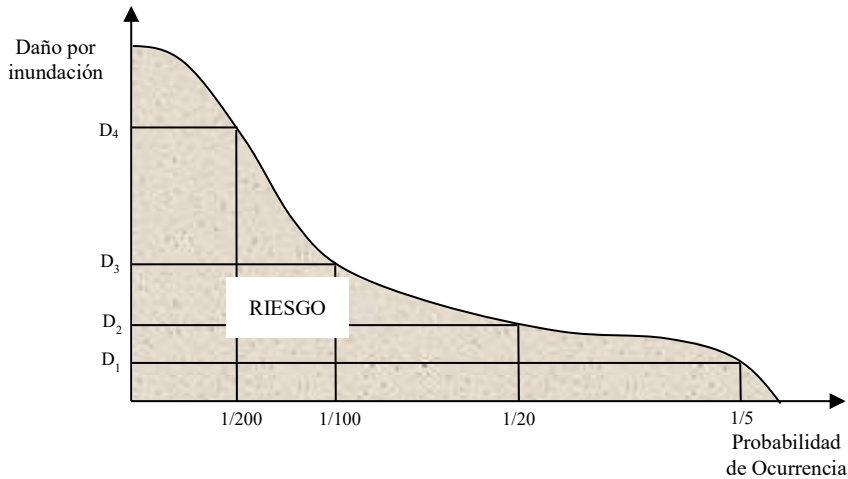


Figura VI-22. Curva descriptiva del riesgo de inundación (Meyer *et al.*, 2009)

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^k D[i] \times \Delta P_i \qquad \bar{D} = \text{Daño Anual Esperado} \qquad \text{[VI-4]}$$

Donde,

$$D[i] = \frac{D(P_{i-1}) + D(P_i)}{2} \qquad D[i] = \text{media del año de dos eventos de daño } D(P_{i-1}) \text{ y } D(P_i)$$

$$\Delta P_i = |P_i - P_{i-1}| \qquad \Delta P_i = \text{intervalo de probabilidad entre las probabilidades de excedencia de ambos eventos}$$

Las inversiones adecuadas en mitigación de los daños de las inundaciones deberían ser determinadas por los beneficios de las medidas de mitigación consideradas. Desde un punto de vista económico, esos beneficios son iguales a la prevención de pérdidas debidas a un desastre gracias a las medidas de mitigación. Los beneficios continúan mientras dure la medida de mitigación. Sin embargo, dado que el patrón de eventos desastrosos no puede ser conocido -en términos de sus probabilidades o posibilidades de ocurrencia para cualquier periodo de tiempo- ninguna inversión en mitigación de riesgos tiene que ser económicamente justificada en términos de beneficios esperados en promedio cada año. Esto se consigue calculando el Daño Anual Esperado.

Más allá de saber si el daño estimado es poco o mucho, lo rescatable de los valores resultantes es que se tiene un punto de partida para evaluar la reducción del riesgo. Los resultados del DAE obtenidos sirven para establecer un panorama inicial (cuantificación) de daños en algunas zonas de inundación en Badalona, a fin de definir acciones de mitigación y respuesta para la preparación, planificación a medio largo plazo en la gestión de emergencias, así como proponer políticas públicas al respecto. Normalmente, en la literatura, este indicador se ha utilizado para daños a edificios, pero en este estudio se calcula para el daño referido únicamente a vehículos.



## VI.6. Discusión de los resultados

Se presentan y discuten en este apartado los resultados obtenidos sobre el caso de estudio de Badalona. A partir de los criterios y metodologías propuestas en los apartados anteriores, se recogen en primer lugar los diferentes mapas de peligrosidad y riesgo para peatones. En segundo lugar, se presentan los correspondientes a vehículos en relación a las inundaciones derivadas de lluvias de proyecto para 1, 5, 10, 100 y 500 años de periodo de retorno.

El mapa de riesgo para peatones se ha obtenido a partir del cruce del mapa de peligrosidad y de vulnerabilidad para peatones en Badalona. En el caso de vehículos, el riesgo se asocia al daño producido, siendo la zona con mayores daños aquella que corresponde a un mayor riesgo. El cálculo del daño total para cada periodo de retorno permite la obtención del Daño Anual Esperado (DAE), cuyo valor ha sido calculado según el procedimiento descrito anteriormente y se presenta en este apartado.

### VI.6.1. Peligrosidad y riesgo para peatones en Badalona

En la representación espacial de la la peligrosidad y del riesgo para peatones para los diferentes periodos de retorno se observa un claro incremento de la peligrosidad y del riesgo para mayores periodos de retorno. Para un periodo de retorno de 1 año no se producen zonas de alta peligrosidad y/o riesgo en ninguna parte de Badalona. Para un periodo de retorno de 5 (Figura VI-23) y 10 años (Figura VI-24), se aprecia claramente como solo se produce peligrosidad y/o riesgo alto en alguna zona de Badalona de muy poca extensión, más allá de la peligrosidad alta indicada en las rieras. Este hecho es un indicativo del correcto dimensionamiento de la red de drenaje para tales periodos de retorno.

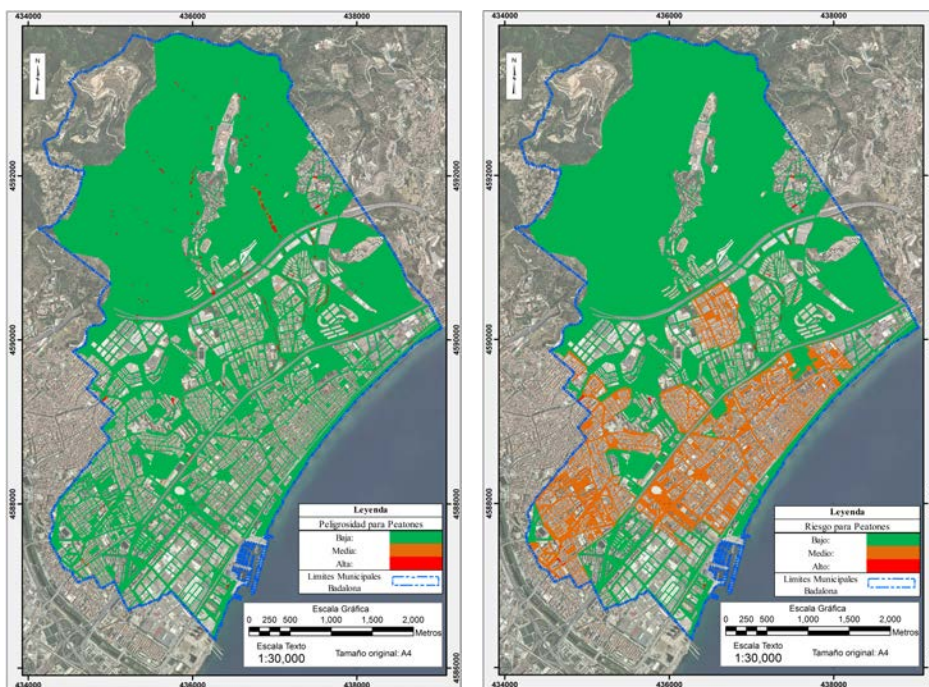


Figura VI-23. Mapas de peligrosidad y riesgo para peatones (T= 5 años)

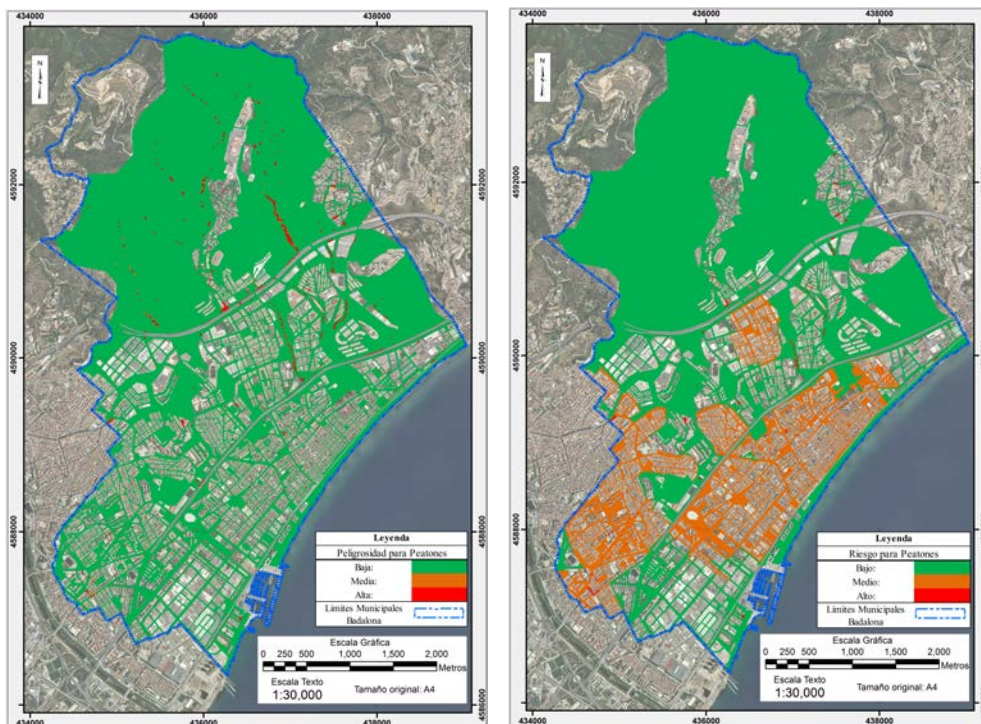


Figura VI-24. Mapas de peligrosidad y riesgo para peatones (T= 10 años)

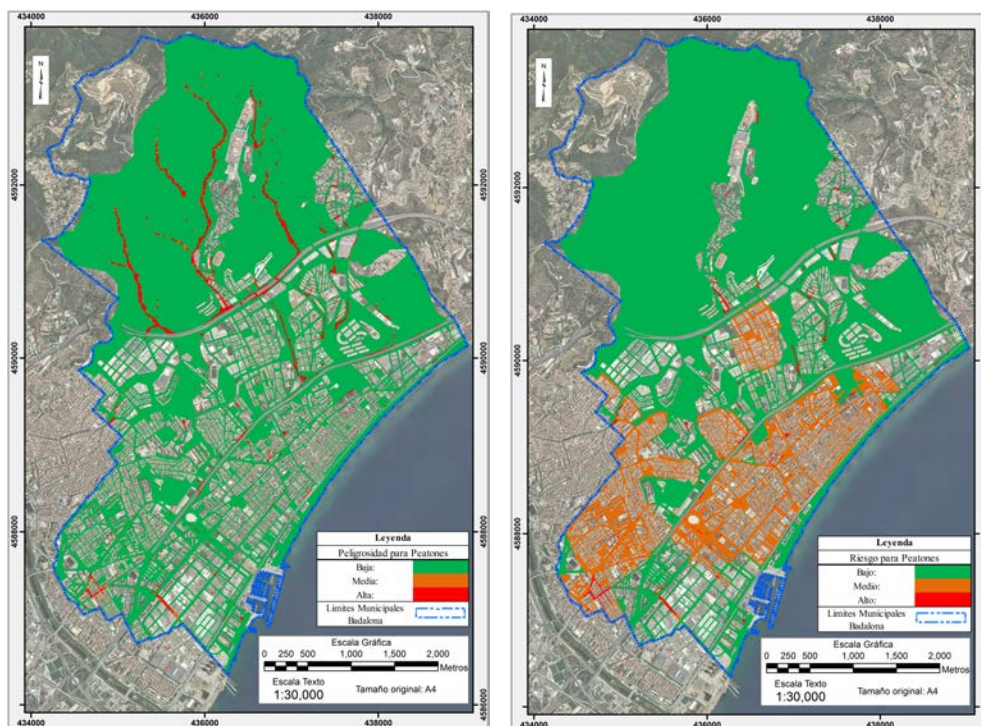
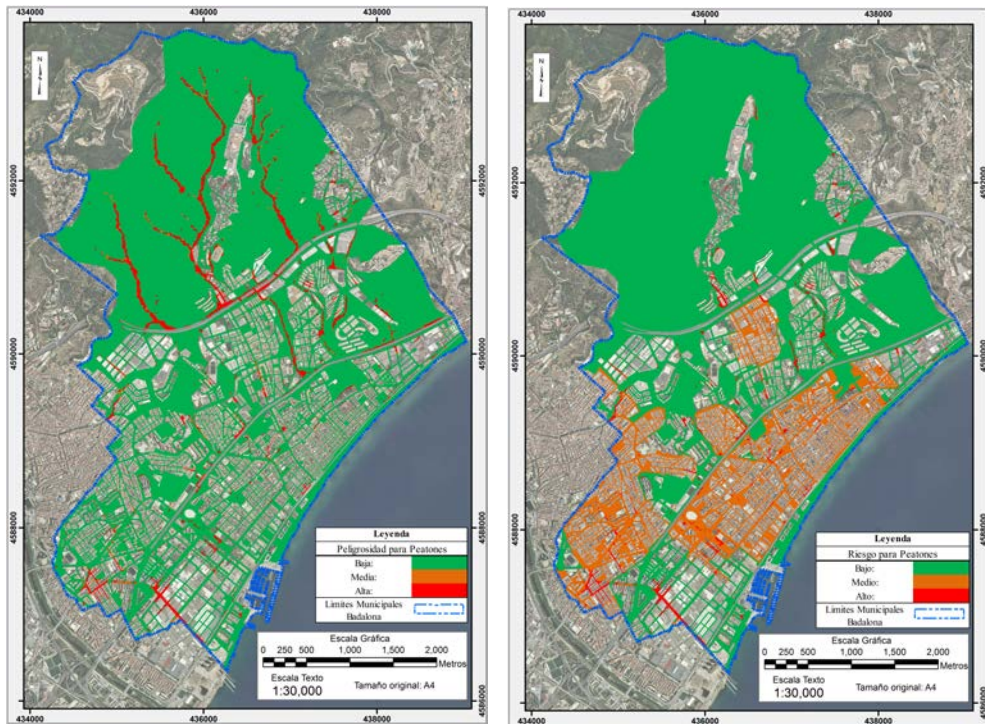


Figura VI-25. Mapas de peligrosidad y riesgo para peatones (T= 100 años)



**Figura VI-26.** Mapas de peligrosidad y riesgo para peatones (T= 500 años)

En cambio, para inundaciones asociadas a lluvias de 100 años (Figura VI-25) y 500 años de periodo de retorno (Figura VI-26), se aprecian zonas en las que la peligrosidad y el riesgo para peatones es elevada. Las zonas más relevantes en cuanto a peligrosidad y riesgo para peatones se localizan en el sur del municipio. Se trata de las zonas con mayor extensión indicada como peligrosidad y riesgo alto, puesto que la combinación de calados y velocidades en el lugar ocasionarían la inestabilidad de los peatones. Son zonas definidas con media o alta vulnerabilidad, en cuanto que la presencia de peatones se prevé significativa.

La avinguda del Maresme, entre la carretera C-31 y la línea de costa va incrementando su peligrosidad y riesgo para peatones según aumenta el periodo de retorno. La avinguda d'Alfons XII, entre la calle del Mariscal Cabanes y la calle de Covadonga presenta también una alta peligrosidad y riesgo para peatones, extendiéndose también a calles secundarias y perpendiculares a esta avenida para el evento de 500 años de periodo de retorno. En la Figura VI-27 se presenta un detalle de ambas zonas comentadas, que presentan la mayor extensión de peligrosidad y riesgo para peatones. La localización de estas zonas, aguas abajo de la cuenca de aportación, corresponde a terrenos de bajas pendientes (Figura VI-28), favoreciendo así la ocurrencia de inundaciones.

Existen otras zonas en el municipio de Badalona que también se consideran de alta peligrosidad, según se observa en los mapas presentados, aunque con mucha menos extensión y de forma mucho más localizada. En cuanto a prioridades de actuación para los técnicos municipales (encargados de la toma de decisiones) se debería mejorar el drenaje de la zona más afectada en primera instancia. Con menor prioridad, aunque también con necesidades de mejora de drenaje, se deben arreglar los diferentes puntos indicados en los mapas. Se trata de actuaciones, basadas en la

evaluación de la peligrosidad y el riesgo para peatones, que mejorarán la resiliencia del municipio ante impactos futuros ocasionados por inundaciones.

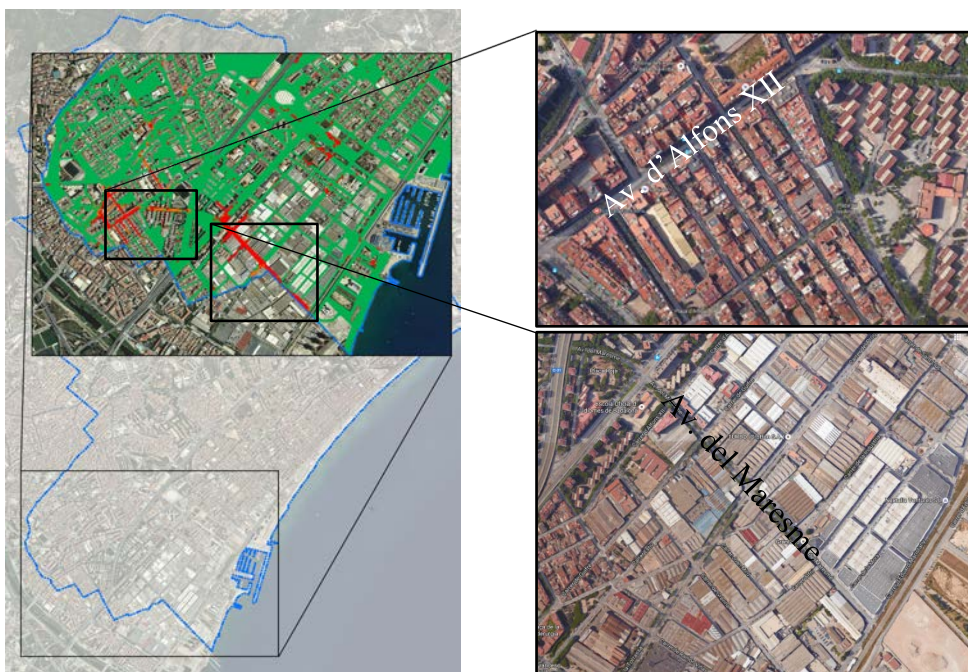


Figura VI-27. Detalle del mapa de peligrosidad de la zona más crítica para peatones (T= 500 años)

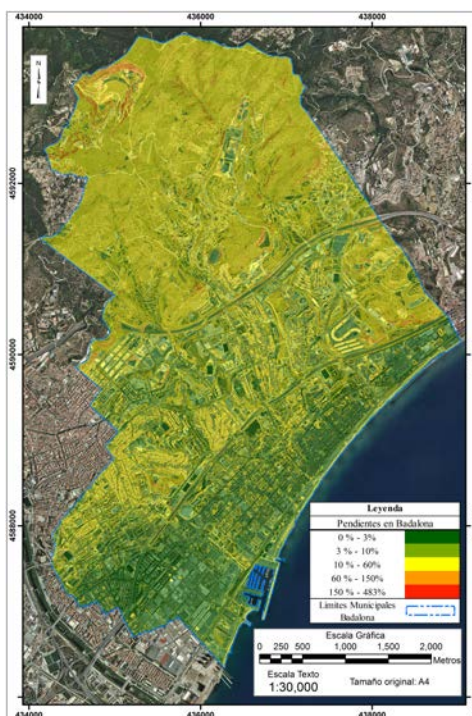


Figura VI-28. Pendientes del terreno en el municipio de Badalona

## VI.6.2. Peligrosidad y Riesgo para los vehículos en Badalona

Este apartado se compone en primer lugar de los mapas de riesgo del daño producido a vehículos. Estos mapas se representan, como así se ha hecho con la peligrosidad y riesgo para peatones, en tres niveles según, en este caso, rangos de costes diferentes dependiendo del periodo de retorno considerado. También se presentan aquí los valores económicos de daños globales en Badalona estimados sobre vehículos para cada periodo de retorno, obteniendo a partir de estos valores el Daño Anual Esperado (DAE).

### VI.6.2.1. Mapas de peligrosidad y riesgo para vehiculos

Los resultados obtenidos presentan un patrón similar al obtenido para los peatones. Para el periodo de retorno de 1 año no se obtienen áreas de alta peligrosidad ni daños a vehículos. Respecto a los periodos de retorno de 5 y 10 años, ofrecen algunos puntos de alta peligrosidad pero no existen zonas críticas de gran extensión (Figura VI-29 y Figura VI-30). Como en el caso anterior, es un indicativo de un correcto dimensionamiento general de la red de drenaje para este periodo de retorno. La peligrosidad resulta elevada especialmente en las rieras situadas en la cabecera de la cuenca, al norte de la carretera B-20. Sin embargo, el daño (y por tanto el riesgo) solo se producirá en aquellos lugares en los que previsiblemente pueda haber vehículos. Se ha limitado, por tanto, la evaluación del daño a aquellas zonas en la que un vehículo pueda circular o aparcar. La zona más crítica corresponde con la avinguda d'Alfons XII, como así lo era para el caso de peatones. Para mayores periodos de retorno (100 y 500 años) la peligrosidad y riesgo se extienden por la zona industrial del sur del municipio, principalmente por la avinguda del Maresme.

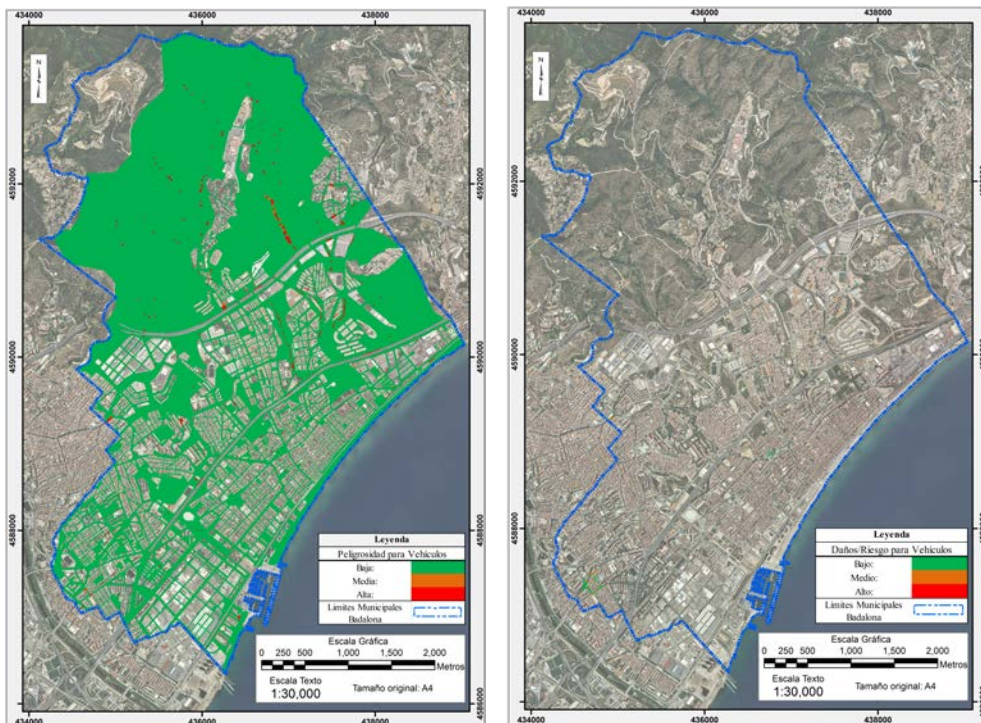


Figura VI-29. Mapas de peligrosidad y daños/riesgo para vehiculos (T= 5 años)

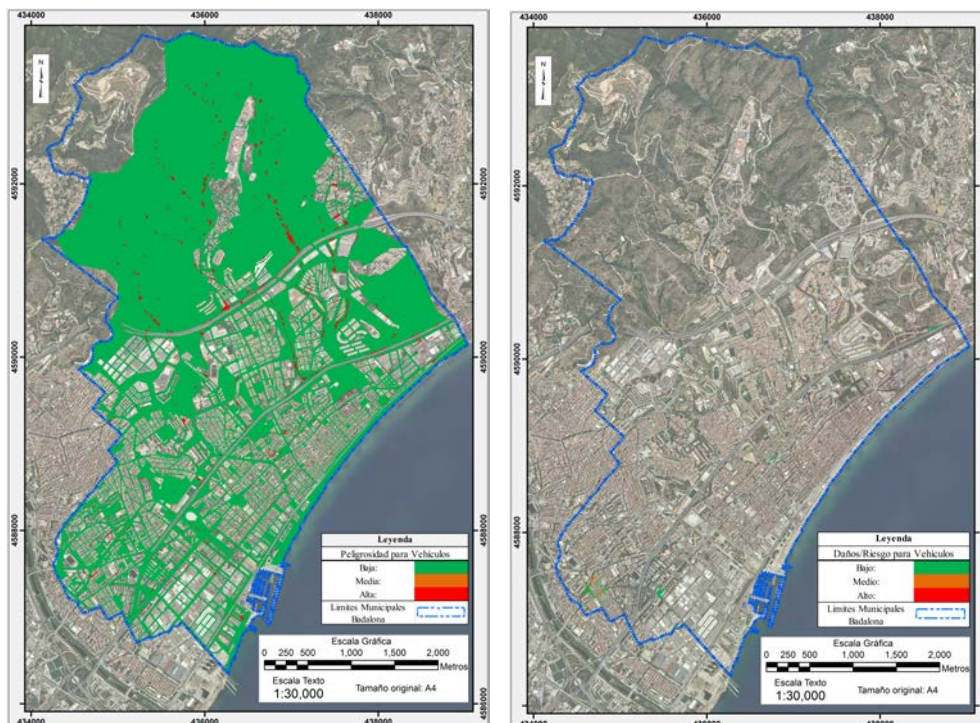


Figura VI-30. Mapas de peligrosidad y daños/riesgo para vehículos (T= 10 años)

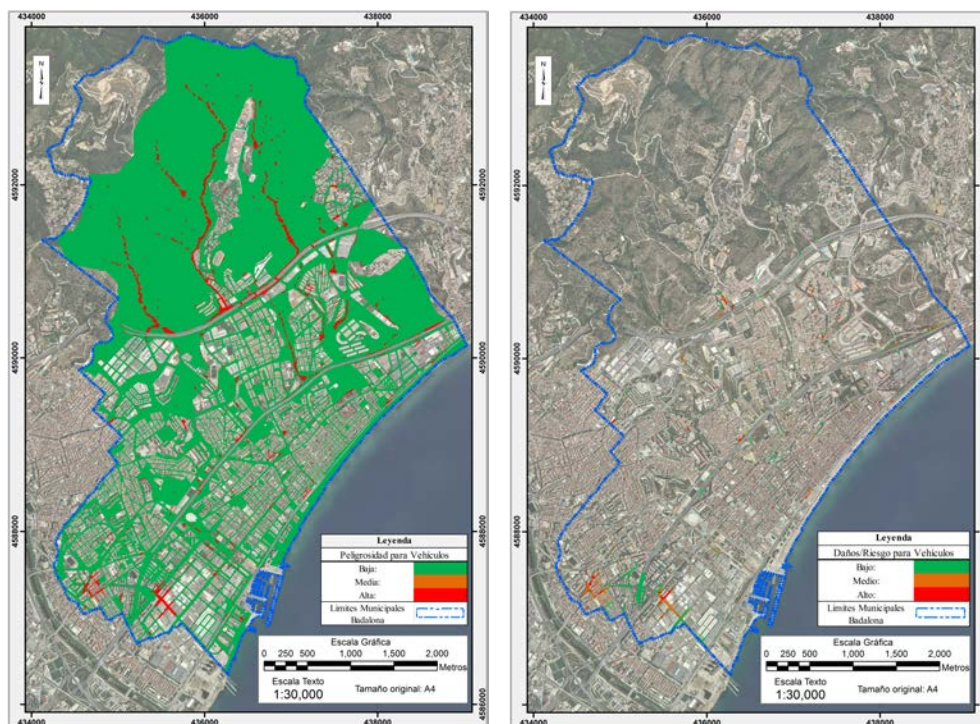


Figura VI-31. Mapas de peligrosidad y daños/riesgo para vehículos (T= 100 años)

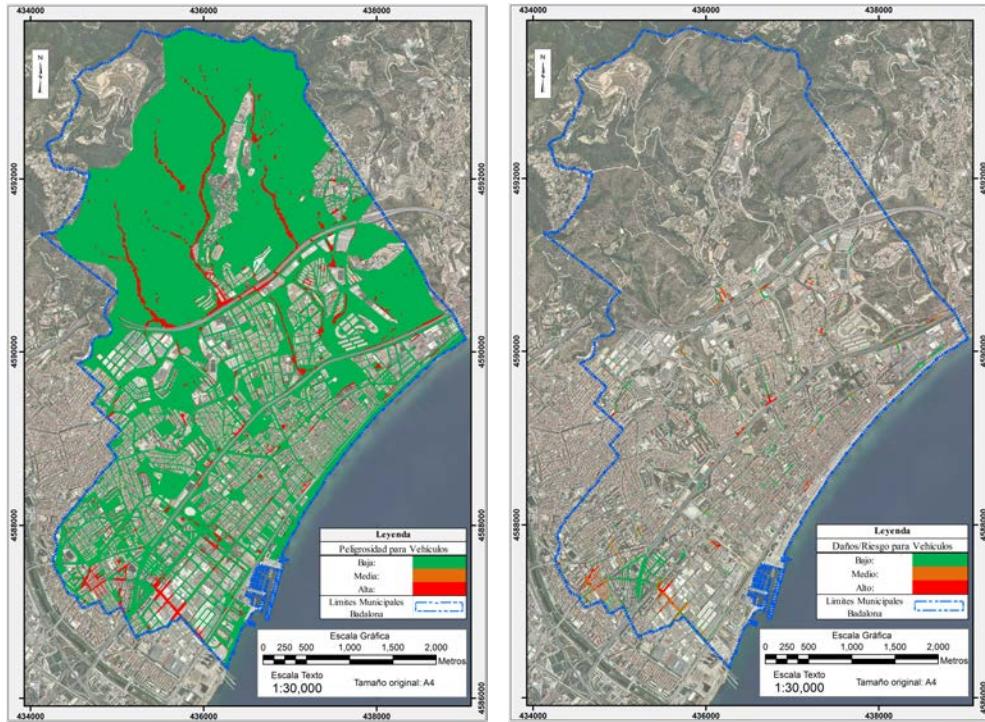


Figura VI-32. Mapas de peligrosidad y daños/riesgo para vehículos (T= 500 años)

La representación espacial del daño/riesgo en este caso difiere del presentado para peatones, puesto que aquí un riesgo o daño bajo indica que se producen daños a vehículos, aunque los costes son inferiores a otras zonas también afectadas. Las zonas no coloreadas indican en este caso que no se produce ningún tipo de daño.

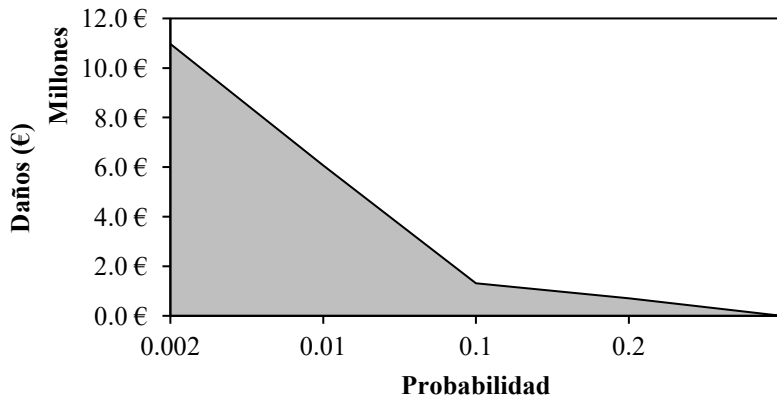
### VI.6.2.2. Daño Anual Esperado (DAE)

De acuerdo con la metodología presentada en apartados anteriores, se presenta aquí el cálculo del Daño Anual Esperado (DAE). En la Tabla VI-8 se recogen los costes económicos calculados para las inundaciones derivadas de los periodos de retorno de 1, 5, 10, 100 y 500 años, así como la relación de la probabilidad asociada a cada periodo de retorno. Los valores aquí presentados han sido calculados como la suma de la cantidad económica asociada a cada una de las celdas en las que se divide el mapa de daños para vehículos.

Tabla VI-8 Probabilidades y daños para las inundaciones derivadas de las diferentes lluvias de diseño consideradas

Periodo de retorno (años)	1	5	10	100	500
Probabilidad	1	0.2	0.1	0.01	0.002
Daños (€)	0 €	706,371.84 €	1,307,781.07 €	6,067,940.09 €	10,971,743.33 €

La representación gráfica de estos valores se muestra en la Figura VI-32. El DAE se calcula mediante la integración del área bajo la curva graficada. A efectos prácticos, el área bajo la curva se puede calcular mediante la suma de áreas de figuras sencillas (triángulos y rectángulos), resultando en este caso en un valor de 783,322.57 €.



**Figura VI-33.** Curva Daño-Probabilidad para el municipio de Badalona. El área bajo la curva representa el Daño Anual Esperado (DAE) del municipio.

Como ya se argumentó anteriormente, más allá de saber si el daño estimado es poco o mucho, lo rescatable de este valor es que se tiene un punto de partida para evaluar la reducción del riesgo. El resultado del DAE obtenido sirve para establecer una situación inicial o punto de partida en Badalona, a fin de definir acciones de mitigación y respuesta para la preparación y planificación a medio y largo plazo en la gestión de emergencias, así como proponer políticas públicas al respecto.

## VI.7. Síntesis y conclusiones

Para comunicar los resultados del análisis de riesgo y sensibilizar a las personas sobre éste, la descripción espacial del riesgo juega un papel muy importante. En este capítulo se ha llevado a cabo la aplicación práctica de las herramientas desarrolladas, en un caso a escala local para el municipio de Badalona. Se han desarrollado mapas de peligrosidad, para tres periodos de retorno distintos, resultado de aplicar los rangos de peligrosidad (baja, media y alta) para peatones y vehículos en base a las funciones de estabilidad desarrolladas previamente.

Se han desarrollado mapas de riesgo para los peatones, partiendo de la definición previa de niveles de vulnerabilidad para éstos en Badalona. Dichos mapas han sido el resultado de cruzar los mapas de peligrosidad con el mapa de vulnerabilidad, definido según grados de densidad de viviendas en todo el municipio de Badalona.

Los vehículos, hasta el momento, no han sido ampliamente tratados en la evaluación de daños y no existe en la literatura consideraciones como las propuestas para edificios, aunque se presupone que aspectos como la edad del vehículo o el tiempo de alerta podrían hacer variar sensiblemente el daño ocasionado sobre éstos.

En este capítulo, además, se ha realizado un estudio para evaluar el impacto económico que tendría una inundación desde el punto de vista de daños directos a vehículos en Badalona. Para ello, se ha partido de las curvas de daños a vehículos desarrolladas por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE). La revisión del estado de la cuestión, en lo que se refiere al desarrollo de curvas de daños para vehículos, indica que dicho campo de investigación se encuentra aún en fase de desarrollo. Prácticamente no se han encontrado curvas de daños y, en la



mayoría de los pocos trabajos encontrados, no se presenta una explicación justificada de su desarrollo.

Se ha presentado una metodología de aplicación de tales curvas, considerando diferentes ocupaciones vehiculares según la ubicación y características del suelo en todo el municipio de Badalona. El análisis de presencia de vehículos, para un día laborable, ha dado lugar a la obtención de ocho patrones que responden a diferentes ocupaciones vehiculares. Sobre esos patrones, repartidos apropiadamente por todo el municipio, se han aplicado las curvas de daños del USACE para las cinco tipologías de vehículos propuestas.

El Daño Anual Esperado (DAE) ha sido calculado de forma análoga a como se procede con la estimación de daños a edificios, ofreciendo una idea del riesgo que la inundación presenta sobre vehículos en este caso. Se han presentado también los mapas de riesgo asociado al daño directo a vehículos, para los tres periodos de retorno considerados.

Los resultados obtenidos permiten distinguir una zona crítica en el municipio, ubicada al sur del mismo, principalmente concentrado en la avinguda d'Alfons XII y la avinguda del Maresme. Se trata de una zona en la que se concentra alta peligrosidad y riesgo para peatones, así como alta peligrosidad y daños/riesgo. Se trata de una zona de bajas pendientes situada aguas abajo de la cuenca de aportación, situación idónea para la ocurrencia de inundaciones y de los problemas derivados.

La realización de este caso de estudio pretende presentar de manera práctica la aplicación de los criterios de peligrosidad propuestos, así como ofrecer una metodología para la evaluación del riesgo económico sobre vehículos tras una inundación. Los responsables en la toma de decisiones, en base a la descripción espacial de la peligrosidad y el riesgo, pueden proponer medidas de prevención y mitigación que, en definitiva, hagan que la ciudad sea más resiliente ante futuros impactos.

## *Capítulo VII*

# *Conclusiones generales*

### **VII.1. Conclusiones**

El aumento de las zonas urbanas, con su respectiva alta tasa de impermeabilidad y por tanto de escorrentía, así como el cambio climático que conlleva eventos de lluvia cada vez más severos, hacen que la exposición a peligrosidades debidas a inundaciones se vea incrementada.

Las inundaciones en zonas urbanas pueden ser debidas a aguas fluviales, aunque las más comunes se deben al exceso de escorrentía pluvial en las calles. La primera tipología de inundación resulta de que el agua sobrepase o derrumbe las defensas ante inundaciones situadas próximas a los ríos o incluso posibles roturas de presas. El segundo tipo de inundación resulta de inadecuados sistemas de drenaje urbano con respecto a eventos de lluvia en zona urbana, debido a poca eficiencia de las rejillas de los imbornales, colmatación de las rejillas o falta de capacidad de la red de alcantarillado.

Este trabajo se ha centrado en aspectos relacionados con inundaciones en zonas urbanas debido a un exceso de escorrentía pluvial. El concepto de drenaje dual conduce a la consideración de la circulación del agua en las redes de alcantarillado, pero también de aquella que circula por nuestras calles, la cual si no excede ciertos límites de seguridad podría ser considerada como “aceptable”. Uno de los desafíos de la gestión del riesgo de inundaciones en general, y en zonas urbanas en particular, es cuantificar la resiliencia ante inundaciones, lo cual enlaza naturalmente con las consecuencias de inundación y por lo tanto la evaluación del impacto.

Se ha analizado en profundidad, en el capítulo introductorio de este trabajo, la distinción entre riesgo y peligrosidad, así como la definición del concepto de vulnerabilidad que es opuesto al de resiliencia. Cuando se produce una inundación urbana derivada de un evento de precipitación, la peligrosidad afecta de distinta forma, dependiendo de en qué o en quién se ponga el centro de atención. Los peatones deben ser, por supuesto, el centro de atención principal cuando se evalúan las peligrosidades de las inundaciones en zonas urbanas. Sin embargo, también los vehículos, cada vez más presentes en nuestras ciudades, son merecedores de ser considerados, no solo por los daños económicos que se pueden ocasionar sobre ellos mismos u otras infraestructuras urbanas, sino también porque, en caso de perder la estabilidad y ser arrastrado, pueden ocasionar fatalidades sobre los propios peatones.

Hay un consenso general, de acuerdo con el estado de la cuestión estudiado, en las variables que definen la peligrosidad (calado y velocidad) para personas expuestas a inundaciones. Se presentaron en el capítulo del estado de la cuestión formulaciones límites o umbrales, función de las variables hidráulicas calado y velocidad, que delimitan la zona de estabilidad para personas expuestas a corrientes de agua.

Para el estudio de la **estabilidad de peatones** expuestos a inundaciones urbanas ocasionadas por exceso de escorrentía, se ha llevado a cabo un completo estudio experimental utilizando un modelo físico de laboratorio a escala real simulando las características de una calle convencional. Mediante este modelo se han realizado experimentos, reproduciendo las condiciones de flujo más habituales (bajos calados y altas velocidades) cuando ocurre una inundación en una calle de una ciudad. Un total de 26 sujetos han sido considerados, los cuales realizaban los ensayos con diferente calzado, manos libres u ocupadas y buenas o malas condiciones de visibilidad, pretendiendo reproducir el mayor número de combinaciones posible que represente situaciones reales para los peatones que se ven sorprendidos por tales inundaciones.

El umbral delimitado por todos los puntos de inestabilidad obtenidos se ha definido por el producto  $(v \cdot y) = 0.22 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , considerando los calados máximos en la sección de estudio, muy por debajo de los criterios convencionales de  $(v \cdot y) = 0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . La representación de todos los puntos de inestabilidad junto con los propuestos por otros autores y directrices indica que tales criterios no son adecuados cuando se trata de evaluar la estabilidad de peatones expuestos a las típicas inundaciones pluviales urbanas. Algunos aspectos como el primer paso desde la acera en seco a la calzada inundada y la evaluación de la respuesta emocional de los sujetos ensayados han sido considerados en el análisis de peligrosidad.

Por lo tanto, de la investigación llevada a cabo para el estudio de la estabilidad de peatones, se propone un umbral mucho más restrictivo que debería ser tenido en cuenta en un futuro por los responsables en la toma de decisiones sobre la gestión del riesgo de inundaciones en zonas urbanas. Esta nueva función límite además es una herramienta muy útil para el diseño del sistema de captación y de drenaje urbano, regulado por las administraciones municipales, con la que se limitaría la cantidad de escorrentía de circulación por nuestras calles para asegurar la seguridad de los peatones.

El análisis de la peligrosidad para los vehículos expuestos a inundaciones se basa en el estudio de su estabilidad, de forma que si ésta no se ve comprometida no existirá peligrosidad o se establecerá como peligrosidad baja. La rigurosa revisión del estado de la cuestión llevada a cabo referente a los estudios experimentales sobre la **estabilidad de vehículos** expuestos a inundaciones nos indica que en ninguno de los estudios realizados se ensayaron más de dos o tres modelos de vehículos a escala reducida. Con tales limitaciones no es posible desarrollar una metodología general aplicable para cualquier vehículo real.

El criterio australiano propuesto en la Guía AR&R ha sido el más idóneo hasta el momento para garantizar la estabilidad de los vehículos, agrupados en tres tipologías: vehículos pequeños, vehículos grandes y vehículos todoterreno. Dicho criterio ha sido actualizado y validado de acuerdo con resultados de estudios posteriores. Sin embargo, el criterio australiano no es suficientemente flexible para considerar cualquier vehículo con diferentes características. En este sentido, existía la necesidad de llevar a cabo una completa y rigurosa campaña experimental

ensayando una gran variedad de vehículos con el objetivo de obtener una metodología general, con la que definir la zona estable en el dominio calado-velocidad para cualquier tipo de vehículo.

La campaña experimental realizada supuso el ensayo de doce modelos de vehículos a escala reducida y, en base al análisis de los resultados, se propone una metodología para obtener el umbral de estabilidad para cualquier vehículo real expuesto a una inundación. Los ensayos fueron realizados con tres escalas diferentes (1:14, 1:18 y 1:24), en los que se incluían además el análisis de flotación y del coeficiente de rozamiento, los cuales hacen que el presente estudio sea el más completo hasta el momento. Esta metodología permite definir una zona estable en el dominio calado-velocidad con la suficiente precisión para cualquier vehículo real.

Se ha observado que los parámetros más determinantes para la estabilidad de un vehículo expuesto a una inundación son: el área en planta (PA), su peso ( $M_c$ ), la altura libre entre el suelo y el chasis (GC) y el coeficiente de rozamiento entre el suelo y los neumáticos ( $\mu$ ). Agrupando estas variables físicas, las cuales son fácilmente accesibles en las fichas técnicas para cualquier vehículo, se propone el coeficiente de estabilidad modificado ( $SC_{mod}$ ) aplicable para cualquier vehículo.

Es posible obtener una relación lineal entre el coeficiente de estabilidad ( $SC_{mod}$ ) y la constante de ajuste ( $a_0$ ) de la función  $(v \cdot y) = a_0$  de cada vehículo ensayado. De esta manera se calcula el coeficiente de estabilidad modificado para un vehículo cualquiera y entrando en la función  $(v \cdot y) = f(SC_{mod})$  se obtiene el umbral de estabilidad de un vehículo. Dada la incertidumbre del coeficiente de rozamiento ( $\mu$ ), se propone la obtención de dos límites: mínimo y máximo, utilizando los valores de  $\mu=0.25$  y  $\mu=0.75$  respectivamente, como valores extremos en el rango de coeficientes de rozamiento entre neumáticos y carreteras mojadas. Estos dos umbrales definirán una zona de incertidumbre entre ellos y se asegura la estabilidad para condiciones hidrodinámicas (calado y velocidad) por debajo del umbral mínimo.

Con esta metodología se proporciona otra herramienta, además de la definición del umbral de estabilidad para peatones, que puede ser utilizada por los responsables en la toma de decisiones en el campo de la gestión del riesgo de inundaciones en zonas urbanas, definiendo un coche de diseño y obteniendo su correspondiente umbral de estabilidad.

Además, en esta investigación se han desarrollado **modelos numéricos tridimensionales** con los que complementar los estudios experimentales llevados a cabo para el análisis de la estabilidad de peatones y de vehículos. Se trata de campos en los que estas técnicas numéricas prácticamente no han sido utilizadas hasta el momento, según la revisión del estado de la cuestión llevada a cabo. Puesto que estos modelos numéricos están basados en modelos físicos con los que se ha ensayado en laboratorio, se han calibrado a partir de los resultados experimentales, ofreciendo así la garantía de presentar resultados numéricos fiables.

Para el primero de los desarrollos correspondiente al **análisis numérico de la estabilidad de peatones**, se ha modelado la plataforma que fue construida para realizar los ensayos de estabilidad. La modelación numérica llevada a cabo trata de la incorporación de la silueta de una persona en posición de cruce en la plataforma de ensayos, donde se llevó a cabo la campaña experimental. El caso escogido para la simulación numérica supuso una inestabilidad en los ensayos experimentales, para una persona de género femenino, de 1.67 m de altura y 65 kg de peso, en buenas condiciones de visibilidad, manos desocupadas y llevando chanclas. Las

condiciones hidráulicas que generaron esta inestabilidad fueron una velocidad media ( $v$ ) de 2.5 m/s y un calado ( $y$ ) de 12.9 cm junto al bordillo más alto.

El proceso de calibración del modelo se ha llevado a cabo a partir de la definición del mallado (8.7 mm en la zona de detalle), el modelo de turbulencia ( $k - \omega$ ) y el ajuste del valor de la rugosidad ( $K=0.2$  mm). Una vez elegido el modelo de turbulencia y realizado un mallado apropiado en la zona de interés, se ha modificado el valor de la rugosidad hasta que cinco perfiles de velocidades situados equiespaciados en la sección de estudio numéricos y experimentales se ajustaban adecuadamente. Además, se ha comprobado el ajuste del calado en las posiciones de los cinco perfiles de velocidad entre el valor experimental y numérico.

La presión aplicada sobre los tobillos del peatón, integrando sobre la superficie aplicada, supone una fuerza de arrastre sobre los tobillos de la persona, que es oscilante en el tiempo y de un valor medio aproximado de 113 N. Un análisis más detallado sobre la forma de caminar de una persona (sin verse sometida a la fuerza de arrastre del agua) indica que las reacciones de fuerza horizontal y vertical y su ratio ( $F_H/F_V$ ) están sujetas a grandes variaciones durante las diferentes posturas. Según estudios previos, se acepta como razonable que los deslizamientos serán prácticamente inevitables cuando se dé un coeficiente de rozamiento de 0.15 o inferior y se producirá o no deslizamiento, dependiendo de la habilidad de la persona, cuando el valor del coeficiente de rozamiento se encuentre entre 0.15 y 0.41.

Dada la fuerza de  $F_D = 113$  N ejercida sobre la silueta del peatón en la simulación llevada a cabo, es posible a partir del criterio de estabilidad por deslizamiento que contempla el peso de la persona ( $P$ ), la fuerza actuante ( $F_D$ ) y el coeficiente de rozamiento ( $\mu$ ), determinar el coeficiente de rozamiento que ha ocasionado la inestabilidad por deslizamiento de una persona de peso  $P$  siendo expuesta a un flujo que le genera una fuerza de arrastre  $F_D$ . En este caso simulado la inestabilidad se produjo sobre un peatón de 65 kg de masa, lo cual supone un coeficiente de rozamiento de  $\mu=0.18$ , situado en el rango de 0.15-0.41 para el cual se asume una inestabilidad en función de la habilidad de la persona. En este caso el coeficiente de rozamiento se encuentra en la parte baja del rango.

De esta manera, gracias a la obtención de la fuerza ejercida por el flujo de agua sobre la silueta de una persona mediante una herramienta de cálculo tridimensional y para un caso experimental en el que se produjo una inestabilidad, se puede estimar el valor del coeficiente de rozamiento para el que se produjo dicha inestabilidad. Si bien los coeficientes de rozamiento entre el calzado y el hormigón obtenidos experimentalmente son correctos y útiles para poder ser comparados entre ellos, la realidad es que dicho coeficiente varía dependiendo de la posición de la persona cuando camina, produciéndose la inestabilidad para un valor significativamente inferior al obtenido experimentalmente. Otros factores como las maniobras bruscas, ansiedad o miedo también afectan a las posibles inestabilidades, pudiéndose generar situaciones de inestabilidad para coeficientes de rozamiento superiores a los supuestamente límites.

Para el segundo modelo, correspondiente al **análisis numérico de la estabilidad de los vehículos**, se ha reproducido el modelo físico de pendiente local situado en el canal del laboratorio. El hecho de realizar un modelo numérico calibrado con los resultados obtenidos experimentalmente, permitiría en este caso la modelación de cualquier vehículo y determinar su punto de inestabilidad ante flujos de agua. Al tratarse de objetos sólidos rígidos, no entran en juego conceptos como la maniobrabilidad de las personas que introducen impredecibilidad en los

resultados y por tanto se considera adecuada la modelación numérica permitiendo el movimiento del vehículo. Se pueden obtener además las fuerzas actuantes sobre el vehículo, tanto la de arrastre como la de flotación, de manera que el fenómeno puede ser comprendido con mayor detalle.

Se llevaron a cabo 3 fases de simulaciones para un único vehículo Mercedes Clase C (e: 1/18). La primera responde a la simulación del vehículo únicamente sometido a la fuerza de flotación, de manera que se valida que el calado de flotación numérico corresponde al experimental.

En la segunda fase se comprobó que el vehículo respondía numéricamente de la misma manera que lo hacía en laboratorio. Además, ese comportamiento confirmaba que el valor del coeficiente de rozamiento determinado en laboratorio era adecuado, pues el valor de la fuerza de rozamiento es razonable en cuanto a la estabilidad e inestabilidad del vehículo al compararla con la fuerza de arrastre del agua en cada caso.

Como última fase, se analizan diferentes situaciones que no fueron ensayadas en laboratorio. En primer lugar, se evaluó el comportamiento del vehículo ante seis diferentes condiciones de flujo (calados y velocidades), comprobándose así la adecuación de la curva de estabilidad propuesta en base a los resultados experimentales. Se comprobó numéricamente, comparando los resultados de simulaciones a escala prototipo (1:1) y modelo (1:18), que los efectos de escala no alteran las ratios de las fuerzas aplicadas sobre el vehículo prototipo y que, por tanto, los ensayos realizados en laboratorio son perfectamente escalables a prototipo. Por último, se demuestra que la Fuerza de Ascensión es tan influyente como la propia Fuerza de Flotación para velocidades de 0.8 m/s en modelo, correspondientes a 3.4 m/s en prototipo. Para velocidades inferiores a 1 m/s en prototipo ( $v_m = 0.24 \text{ m/s}$ ), la influencia de la Fuerza de Ascensión podría ser despreciable, con una aportación entorno al 2% del total.

Dadas las simulaciones llevadas a cabo, se confirma la viabilidad del desarrollo de curvas de estabilidad para cualquier vehículo a partir de simulaciones numéricas 3D como las llevadas a cabo para el modelo Mercedes Clase C.

Una vez realizados los estudios experimentales y numéricos sobre estabilidad para peatones y vehículos se deben proponer y representar criterios de peligrosidad y riesgo. Para comunicar los resultados del análisis de riesgo y sensibilizar a las personas sobre éste, la descripción espacial del riesgo juega un papel muy importante. Por último, en esta tesis se ha llevado a cabo la aplicación práctica de las herramientas desarrolladas, en un caso a escala local para el municipio de Badalona. Se han desarrollado mapas de peligrosidad resultado de aplicar los rangos de peligrosidad (baja, media y alta) para peatones y vehículos en base a las funciones de estabilidad desarrolladas previamente. Se han considerado diferentes periodos de retorno que tienen como respuesta diferentes intensidades de inundaciones y, por tanto, diferentes impactos y distribución de la peligrosidad en la zona de estudio.

Además del análisis de la peligrosidad para peatones y vehículos, otros aspectos en la evaluación del riesgo son fundamentales, como la estimación de daños producidos en una ciudad a causa de una inundación. En la literatura, el estudio de los daños producidos en zonas urbanas ha derivado en clasificaciones como daño directo o indirecto y tangible o intangible, aunque cuando se trata de daños directos el mayor centro de atención ha sido para las propiedades. Existen diferentes enfoques y propuestas para la evaluación de daños a edificios, los cuales se basan fundamentalmente en la construcción de curvas de daños para diferentes tipologías de estructuras,

en ocasiones considerando sus contenidos y en otras considerándolos por separado. Los vehículos hasta el momento no han sido ampliamente tratados en la evaluación de daños y no existe en la literatura consideraciones como las propuestas para edificios, aunque se presupone que aspectos como la edad del vehículo o el tiempo de alerta podrían hacer variar sensiblemente el daño ocasionado sobre éstos.

En esta tesis se ha realizado un estudio del riesgo para los vehículos, asociado al impacto económico, que tiene una inundación desde el punto de vista de daños directos sobre ellos. Para ello se ha partido de las curvas de daños a vehículos desarrolladas por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE). La revisión del estado de la cuestión, en lo que se refiere al desarrollo de curvas de daños para vehículos, indica que dicho campo de investigación se encuentra aún en fase de desarrollo. Prácticamente no se han encontrado curvas de daños para vehículos y en algunos de los trabajos al respecto, no se presenta una explicación justificada de su desarrollo. Las curvas del USACE son las más completas y justificadas hasta el momento.

Se presenta una metodología para la aplicación de tales curvas, considerando diferentes densidades vehiculares según la ubicación y características del suelo en todo el municipio de Badalona. El análisis de presencia de vehículos para un día laborable ha dado lugar a la obtención de ocho patrones que responden a diferentes ocupaciones vehiculares. Tales patrones han sido repartidos apropiadamente por todo el municipio de Badalona y se han aplicado las curvas de daños del USACE para las cinco tipologías de vehículos propuestas. De forma análoga a como se procede con la estimación de daños a edificios, se ha determinado el Daño Anual Esperado (DAE) que ofrece una idea del riesgo que la inundación presenta sobre vehículos en este caso. Se han desarrollado también los mapas de riesgo asociado al daño directo a vehículos, para los diferentes periodos de retorno considerados.

Con esta última aplicación al caso de estudio se presenta una forma de proceder, utilizando las herramientas desarrolladas en esta investigación. Se trata de una metodología con la que obtener mapas de peligrosidad y riesgo en una zona urbana para que los responsables en la toma de decisiones, en base a la descripción espacial de la peligrosidad y el riesgo, puedan proponer medidas de prevención y mitigación que, en definitiva, hagan que la ciudad sea más resiliente ante futuros impactos.

## VII.2. Futuras investigaciones

Se presentan en este apartado las ideas sobre futuros desarrollos, que han surgido durante y a posteriori de las investigaciones llevadas a cabo sobre estabilidad de peatones, estabilidad de vehículos y evaluación de daños directos a vehículos. Se trata de aspectos que por limitación de tiempo o de recursos no han podido desarrollarse para esta tesis, pero que merecen ser investigados en aras a un mayor conocimiento de estos campos. Se presentan tales ideas a continuación agrupadas según los tres principales campos de investigación tratados.

### Estabilidad de peatones

La campaña experimental realizada para el estudio de la estabilidad de peatones expuestos a inundaciones pluviales se basa en la experiencia adquirida en la campaña previa realizada por Russo (2009). Se trata por tanto de una campaña que ya presenta mejoras con respecto a la preliminar y con la que se ofrecen por tanto resultados contrastados y muy completos.

Sin embargo, en esta tesis se han introducido técnicas numéricas tridimensionales en el análisis de la estabilidad de peatones y merece la pena profundizar más en futuras investigaciones. Se propone en este sentido la realización de ensayos con sujetos en la misma plataforma, incorporando sensores de presión en los tobillos de cada sujeto ensayado. El estudio de la fuerza ejercida por el flujo de agua a lo largo de la trayectoria de un peatón puede aportar mucha información sobre este tema. Los resultados experimentales recogidos deben servir como datos para la calibración de modelos tridimensionales, en los que se considere esta vez el movimiento del peatón por el flujo de agua. Queda por tanto mucho trabajo por hacer en la aplicación de simulaciones numéricas en la estabilidad de peatones.

Esta nueva idea de investigación surgió durante conversaciones con los investigadores del Centre for Water System de la Universidad de Exeter en el Reino Unido, durante la estancia realizada en 2015.

### Estabilidad de vehículos

El estudio sobre la estabilidad de vehículo aún presenta mucho recorrido pues se trata de un campo que está en pleno desarrollo. Aún existen muchas incertidumbres sobre aspectos que no se han contemplado en esta investigación o sobre otros que aún habiéndose considerado requieren ser tratados con mayor profundidad. Se presentan las siguientes ideas para futuros desarrollos:

- Contemplar la posibilidad de una Coeficiente de Estabilidad Modificado ( $SC_{mod}$ ) variable en función del tiempo de inundación. El tiempo de inundación influye en gran medida en la infiltración de agua dentro del coche, de forma que considerar un peso del vehículo variable permitiría mejorar la hipótesis de que el vehículo es estanco. Esta hipótesis es válida en mayor medida cuando se trata de una inundación repentina (flash flood), pues no hay tiempo suficiente para que el agua se infiltre en el vehículo.
- El coeficiente de rozamiento entre el neumático y el terreno es fundamental para la deficiencia del umbral de estabilidad de un vehículo. Merece, por tanto, un estudio en profundidad, evaluando por ejemplo la variación de éste con la variación del calado alrededor del vehículo.
- En el fenómeno de inestabilidad de un vehículo existe una velocidad límite máxima, tal que para valores inferiores se produce la pérdida de la estabilidad meramente por flotación. En la propuesta de esta investigación, dicha velocidad se obtiene al cruzar la expresión analítica del calado de flotación con la función umbral  $(v \cdot y) = a_0$  obtenida mediante la metodología presentada. Se debería profundizar sobre el estudio de esa velocidad máxima. En los últimos estudios llevados a cabo por Kramer *et al.* (2016) se hace mención a que parece que la inestabilidad debida únicamente al efecto de la flotación se produce para números de Froude inferiores a 0.5, pero no se analiza en profundidad la velocidad límite máxima. En la Guía AR&R hacen mención a ella y la definen como tal, pero tampoco evalúan en detalle cual es su valor para cada vehículo. Obteniendo ese dato se podría dividir la zona de inestabilidad en dos: la debida a flotación y la debida al efecto combinado de flotación y arrastre.
- En esta investigación, y en las revisadas encontradas en la literatura, se analiza la estabilidad de vehículos aislados. Se debe evaluar también el comportamiento de los vehículos cuando son varios los que se ven expuestos a la vez a una inundación. Se trata



del caso más común y para el que el uso de herramientas tridimensionales podría ser adecuado.

- Otra de las hipótesis asumidas en esta y en muchas de las investigaciones, es la consideración de que el centro geométrico y el centro de masas del vehículo se encuentran en el mismo lugar. Se considera por tanto en la mayoría de los casos densidad uniforme en todo el cuerpo. Aunque en algunos casos se menciona e incluso se ajusta el peso desplazando el centro de masas hacia la parte delantera del vehículo, donde se encuentra el motor, no existen estudios que presenten diferencias entre ambas situaciones. Se trataría de evaluar si el inicio de movimiento se produce antes o después dependiendo de la ubicación del centro de masas y analizar de qué manera se produce la inestabilidad en ambos casos.
- Las técnicas numéricas son especialmente útiles en el análisis de la estabilidad de vehículos. En esta investigación se han evaluado las fuerzas hidrodinámicas que generan la inestabilidad sobre un vehículo a escala reducida que previamente fue ensayado en laboratorio. Se deben llevar a cabo más simulaciones con diferentes modelos de vehículos, verificando en todo caso que los resultados responden adecuadamente a la metodología propuesta. Vehículos a escala de prototipo (1:1) también deben ser simulados, asegurando que también en simulaciones numéricas se cumple la semejanza de Froude. Otras aplicaciones como considerar diferentes grados de infiltración en el vehículo y comprobar cómo varía el punto de inestabilidad, pueden ser muy interesantes y aportar mucha información al respecto.
- Por último, se deberían llevar a cabo ensayos experimentales con vehículos a escala de prototipo (1:1) que permitieran obtener resultados de inestabilidad para vehículos reales, con los que contrastar la metodología aquí propuesta. Se trata de un objetivo ambicioso en cuanto que la inversión económica (ensayar vehículos reales), así como las instalaciones de laboratorio necesarias (gran capacidad de bombeo y canal de grandes dimensiones) son difícilmente asumibles.

#### Estimación de daños a vehículos

La estimación de daños a vehículos es el campo, de los tratados aquí, con menos trayectoria investigadora. Existen por lo tanto multitud de aspectos y técnicas a ser estudiados, entre los cuales se proponen algunos:

- La metodología propuesta y aplicada en el caso de estudio de Badalona debería ser utilizada en más casos de estudio para contrastar su aplicabilidad.
- Para la delimitación de vehículos en la zona de estudio se escogieron ocho zonas suficientemente representativas, de forma que la tarea de identificar visualmente cada uno de los vehículos presentes en la fotografía aérea no fuera una tarea inabordable. Se propone, en este sentido, el desarrollo o aplicación de técnicas de fotogrametría, que permitan delimitar los vehículos presentes en la zona de interés. Esto permitiría evaluar el daño a vehículos sin necesidad de aplicar patrones de ocupación vehicular, puesto que se podría tener el número de vehículos y ubicación exacta de cada uno de ellos en un instante de tiempo. La disponibilidad frecuente de imágenes satelitales permitiría, además, llevar a

cabo este proceso en diferentes instantes de tiempo y analizar las variaciones en cuanto a ocupación vehicular para diferentes momentos.

- En esta investigación se ha estudiado el impacto de daños directos a vehículos cuando se produce una inundación en una zona urbana. Para dicho estudio se han aplicado curvas de daños a vehículos desarrolladas por el Cuerpo de Ingenieros del Ejercito de los Estados Unidos de América (USACE), las cuales han sido elaboradas con mucho detalle. Se propone la elaboración de curvas de daños propias, que respondan con mayor exactitud a los vehículos que habitualmente se encuentran en ciudades españolas.
- En la evaluación de daños el único factor de vulnerabilidad que se suele tener en cuenta es el calado de agua, mediante el uso de curvas de daños, ya sea a edificios o a vehículos, como es el caso en cuestión. Otras variables como la velocidad, la duración de la inundación y la carga contaminante o de sedimentos transportada por el agua pueden tener un impacto importante en los daños producidos por la inundación. Merece la pena, por lo tanto, investigar sobre los efectos reales de otros factores distintos al calado sobre los vehículos.
- El daño a vehículos considerado aquí ha sido el directo, aunque la interrupción del tráfico es un daño indirecto que puede ocasionar grandes pérdidas económicas. Por tanto, se debe estudiar también el impacto en cuanto a daños indirectos cuando los vehículos ven interrumpidos sus trayectos a causa de una inundación. Los daños indirectos normalmente no suelen contemplarse en los análisis de vulnerabilidad y daños ante inundaciones. En ocasiones el principal motivo es la falta de datos empíricos.
- Cuando un vehículo pierde la estabilidad, los daños ocasionados serán los derivados de colisiones con otros vehículos u otros obstáculos en medio urbano. Se debe estudiar, por tanto, cómo relacionar la curva de daños con el umbral de estabilidad, de manera que la estimación de daños no sea la misma que cuando el vehículo se encuentra quieto en una posición.



## *Referencias*

- Abt, S. R., Wittler R.J., Taylor A., y Love D.J. (1989). Human stability in a high flood hazard zone. *AWRA Water Resources Bulletin*, 25(4), 881–890.
- Agricultural and Resource Management Council of Australia and New Zealand (ARMC) (2000). *Floodplain Management in Australia. Best Practice Principles and Guidelines*. SCARM Report 73, CSIRO Publishing. 120p.
- Ahmed, S., Ramm, G., and Fäitin, G. (1984). Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. *SAE Technical Paper 840300*. 34p.
- Albano, R., Sole, A., Mirauda, D., y Adamowski, J. (2016). Modelling large floating bodies in urban area flash-floods via a Smoothed Particle Hydrodynamics model. *Journal of Hydrology*. (Aceptado).
- Amicarelli, A., Albano, R., Mirauda, D., Agate, G., Sole, A., y Guandalini, R. (2015). A Smoothed Particle Hydrodynamics model for 3D solid body transport in free surface flows. *Computers & Fluids*, 116, 205–228.
- Arrighi, C., Alcèrrec-Huerta, J. C., Oumeraci, H., y Castelli, F. (2015). “Dynamics of vehicle debris during a flood: incipient motion conditions and numerical experiments” en 36th IAHR World Congress. La Haya, Países Bajos. 4p.
- Arrighi, C., Alcèrrec-Huerta, J. C., Oumeraci, H., y Castelli, F. (2015). Drag and lift contribution to the incipient motion of partly submerged flooded vehicles. *Journal of Fluids and Structures*, 57, 170–184.
- Arrighi, C., Oumeraci, H., y Castelli, F. (2016). Hydrodynamics of pedestrians’ instability in floodwaters. *Hydrology and Earth System Sciences*. Discussion paper. 29p.
- Australian Rainfall & Runoff (AR&R) [en línea]: <http://www.arr.org.au/>.
- Austroroads (2008). *Guide to Road Design, Part 5: Drainage Design*. AustRoads Inc. Australia. 210p.
- Bankoff, G., Frerks, G., Hilhorst, D. (2004). *Mapping vulnerability: disasters, development, and people*. Earthscan. Reino Unido.
- Belleudy, P. (2004). *Risques Hydro-météorologiques, crues et inondations/risque, aléa et vulnérabilité/DDS-TUE364/4*. Grenoble, Francia.
- Bonham, A. J., Hattersley, R. T. (1967). *Low Level Causeways. WRL Report No. 100*. University of New South Wales. Sídney, Australia. 30p.
- Bosser, J. (1990). *Vademécum de mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Escola Tècnica Superior d’Enginyers Industrials de Barcelona. Departament de Mecànica de Fluids. 88p.

- Boussinesq, J. (1877). *Essai sur la théorie des eaux courantes*. Impr. nationale. París, Francia. 774p.
- Buckingham, E. (1914). On Physically Similar Systems; Illustrations of the Use of Dimensional Equations. *Physical Review*, 4(4), 345–376.
- Buscariolo, F. F., Volpe, L. J. Della (2014). “Water ingestion and pressure analysis of automotive vehicles using multiphase CFD” en XXII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva (SIMEA). Brasil. 8p.
- Cardona, O. D. (2010). Application and Robustness of the Holistic Approach for the Disaster Risk Assessment of Urban Centers. Presentación para el Banco Mundial.
- Centre for Research on the Epidemiology of disasters (CRED) (2013). EM-DAT. The International disaster database.
- Chang, W.-R., Matz, S. (2001). The slip resistance of common footwear materials measured with two slipmeters. *Applied Ergonomics*, 32(6), 549–558.
- Chow, V. T. (1964). *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill. Nueva York, EEUU.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill Interamericana. Traducido de Open-Channel Hydraulics. Santafé de Bogotá, Colombia. 667p.
- City of Austin Dept. of Public Works (1977). Drainage Criteria Manual, First Edition. EEUU.
- Clark County Regional Flood Control District (CCRFCDD) (1999). Hydrological criteria and drainage design manual. EEUU.
- Clavegueram de Barcelona S.A. (CLABSA) (2006). PICBA06, Plan integral de Alcantarillado de Barcelona.
- Concha, R., Gómez, M. (2009). “Una aproximación a la modelización del Drenaje Dual Urbano mediante EPA SWMM 5.0” en Jornadas de Ingeniería del Agua 2009 (JIA 2009). Barcelona, España. 10p.
- Coriolis, G. (1836). Sur l'établissement de la formule qui donne la figure des remous, et sur la correction qu'on doit y introduire por tenir compte des différences de vitesse dans les divers points d'une même section d'un courant. *Mémoire N° 268, Annales des ponts et chaussées*, Vol. 1, Ser. 1, 314–335.
- Cox, R. J., Shand, T. D., Blacka, M. J. (2010). *Australian Rainfall and Runoff (AR&R). Revision Project 10: Appropriate Safety Criteria For People*. New South Wales (NSW), Australia.
- Department of Infrastructure Planning and Natural Resources. New South Wales Government (2005). Floodplain Development Manual: the management of flood liable land. 31p.
- Department of Public Works (1986). Floodplain Development Manual. Sídney, Australia.
- Djordjevic, S., Prodnovic, D., Maksimovic, C. (1999). An approach to simulation of dual drainage. *Water Science and Technology*, 39(9), 95–103.
- Elsner, A., Mai, S., Meyer, V., Zimmermann, C. (2003). Integration of the flood risk in coastal hinterland management. Proc. of the Int. Conf. CoastGis, GIS for coastal Strategies. Genova, Italy.
- Emergency Management Australia (1997). Four-Wheel-Drive Vehicle Operation. Manual 8. Part IV Skills for Emergency Services Personnel. Canberra, Australia. 76p.
- Emergency Management Australia and Queensland Government. Department of Emergency Services (2002). *Disaster loss assessment Guidelines (Guide 11). Part III-Emergency Management*

- Practice. Volume 3-Guidelines.* Queensland, Australia.
- Engineers Australia [en línea]: <http://www.engineersaustralia.org.au/>.
- European Commission (2010). *Commission Staff Working Paper. Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management.* Bruselas, Belgica.
- Falconer, R. A., Lin, B., Xia, J. (2012). *2D Hydrodynamic Modelling: Mobile Beds, Vehicle Stability and Severn Estuary Barrage.* Informe para el Flood Risk Management Research Consortium (FRMRC). Reino Unido.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (1979). *The floodway: a guide for community permit officials.* EEUU.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). Department of Homeland Security. Mitigation Division (2015). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Flood Model. Hazus-HM MR5 Technical Manual.* EEUU. 499p.
- Fleming, G. (2002) Learning to live with rivers—the ICE’s report to government. *Proceedings of the ICE - Civil Engineering*, 150(5), 15–21.
- Fleming, G., Frost, L., Huntington, S., Knight, D., Law, F., Rickard, C., Macdougall, K. (2001). *Final report of the Institution of Civil Engineers’ presidential commission to review the technical aspects of flood risk management in England and Wales,* Londres, Institution of Civil Engineers.
- Flood Risk Management Research Consortium (FRMRC) [en línea]: <http://web.sbe.hw.ac.uk/frmrc/index.htm>.
- Flow Science, I. (2014). *Flow-3D User Manual.* Release 11.0.3. 965p.
- Fong, D. T.-P., Hong, Y., Li, J.-X. (2009). Human walks carefully when the ground dynamic coefficient of friction drops below 0.41. *Safety Science*, 47(10), 1429–1433.
- Foster, D. N., Cox, R. (1973). *Stability of Children on Roads Used as Floodways, Technical Report No. 73/13,* Manly Vale, NSW, Australia.
- Francés, F., García-Bartual, R., Ortiz, E., Salazar, S., Miralles, J. L., Blöschl, G., Komma, J., Haberer, C., Bronstert, A., Blume, T. (2008). *Efficiency of non-structural flood mitigation measures: “room for the river” and “retaining water in the landscape,”.* CRUE Research Report No I-6. Londres, Reino Unido.
- Gerard, M. (2006). *Tire-road friction estimation using slip-based observers.* Department of Automatic Control. Lund Institute of Technology. Tesis de Master. Lund, Suecia. 68p.
- Gieck, K. (1981). *Manual de Fórmulas Técnicas.* Rep. y Servicios de Ingeniería S.A. México, D. F.
- Gómez, M. (2001). *Definición de Criterios de Riesgo para el Flujo en Calles. Análisis del espaciamiento para rejillas e imbornales utilizados en la Ciudad de Barcelona. Informe realizado para Clavegueram de Barcelona (CLABSA).* Barcelona, España.
- Gómez, M., Martínez, E. (2014) “1D , 2D and 3D Modeling of a PAC-UPC Laboratory Canal Bend” en *SimHydro 2014: Modelling of rapid transitory flows.* Publications S.H.F. Sophia Antipolis, Francia. 12p.
- Gordon A.D., Stone P.B. (1973). *Car Stability on Road Causeways. WRL Technical Report No. 73/12.* University of New South Wales. Sídney, Australia.
- Government of Queensland (2014). *How do we manage flood risks?* [en línea]: <http://www.chiefscientist.qld.gov.au/publications/understanding-floods/managing-flood-risks>.

- Greco, V. (2011). Studio dei profili di velocità di una corrente durante allagamenti urbani e analisi della pericolosità in un tratto di strada. Tesis de Máster. Universidad de Calabria. Italia. 224p.
- Grigg, N. S., Helweg, O. J. (1975). State-of-the-art of Estimating Flood Damage in Urban Areas. *Journal of the American Water Resources Association*, 11(2), 379–390.
- Hammond, M., Chen, A., Butler, D., Djordjević, S. (2014). Flood Damage Model Guidelines. update. WP3 Impact Assessment. Proyecto europeo CORFU. University of Exeter, Reino Unido.
- Hammond, M. J., Chen, A. S., Djordjević, S., Butler, D., Mark, O. (2015). Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review. *Urban Water Journal*, 12(1), 14–29.
- Haslam, R., Stubbs, D. (2006). *Understanding and preventing falls*. CRC. London, Nueva York.
- Heller, V. (2011). Scale effects in physical hydraulic engineering models. *Journal of Hydraulic Research*, 49(3), 293–306.
- Hirt, C., Nichols, B. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201–225.
- Institution of Engineers. Australia (1987). *Australian Rainfall and Runoff, Vol. 1&2*. Australia.
- International Organization for Standardization (ISO). [en línea]: <http://www.iso.org/iso/home.html>.
- Ishigaki, T., Asai, Y., Nakahata, Y., Shimada, H., Baba, Y., Toda, K. (2008). “Assessment of safety on evacuation route during underground flooding” en 16th APD-IAHR. Nanjing, China. 141–146.
- Ishigaki, T., Asai, Y., Nakahata, Y., Shimada, H., Baba, Y., Toda, K. (2009). “Evacuation of aged persons from inundated underground space” en 8th International Conference on Urban Drainage Modelling. Tokyo, Japón.
- Ishigaki, T., Baba, Y., Toda, K., Inoue, K. (2005). “Experimental study on evacuation from underground space in urban flood” en 31st IAHR Congress. Seoul, Corea del Sur.
- Ishigaki, T., Onishi, Y., Asai, Y., Toda, K., Shimada, H. (2008). “Evacuation criteria during urban flooding in underground space” en 11th International Conference on Urban Drainage. Edimburgo, Escocia, Reino Unido. 7p.
- Jongman, B., Kreibich, H., Apel, H., Barredo, J. I., Bates, P. D., Feyen, L., Gericke, A., Neal, J., Aerts, J. C. J. H., Ward, P. J. (2012). Comparative flood damage model assessment: towards a European approach. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(12), 3733–3752.
- Jonkman, S.N., Penning-Rowsell, E. (2008). Human Instability in Flood Flows. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 44(4), 1–11.
- Karvonen, R. A., Hepojoki, H. K., Huhta, H. K., Louhio, A. (2000). *The Use Of Physical Models In Dam-Break Flood Analysis*. Informe final del proyecto RESCDAM. Helsinki, Finlandia.
- Keller R.J., Mitsch B. (1993). *Safety Aspects of the Design of Roadways as Floodways, Research Report No. 69*. Urban Water Research Association of Australia. 41p.
- Kelman, I. (2002). Physical Flood Vulnerability of Residential Properties in Coastal Eastern England. Tesis Doctoral. University of Cambridge. Reino Unido. 324p.
- Kramer, M., Terheiden, K., y Wieprecht, S. (2016). Safety criteria for the trafficability of inundated roads in urban floodings. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 17, 77–84.
- Kulin, G. and Compton, P. R. (1975). *A guide to methods and standards for the measurement of water flow*. U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards. EEUU.

- Kurtus, R. (2005) Coefficient of Friction Values for Clean Surfaces. [en línea]: [www.school-for-champions.com/science/friction\\_coefficient.htm](http://www.school-for-champions.com/science/friction_coefficient.htm)
- Landefeld, J. S., Seskin, E. P. (1982). The economic value of life: linking theory to practice. *American Journal of Public Health*, 72(6), 555–566.
- Lencastre, A. (1998). *Manual de Ingeniería Hidráulica*. Universidad Pública de Navarra. España.
- Lind, N., Hartford, D., Assaf, H. (2004). Hydrodynamics model of Human Stability in a Flood. *Journal of the American Water Resources Association*, 40(1), 89–96.
- Luino, F., Cirio, C. G., Biddoccu, M., Agangi, A., Giulietto, W., Godone, F., Nigrelli, G. (2009). Application of a model to the evaluation of flood damage. *GeoInformatica*, 13(3), 339–353.
- Manning, D. P., Jones, C., Bruce, M. (1990). Proof of shoe slip-resistance by a walking traction test. *Journal of Occupational Accidents*, 12(4), 255–270.
- McBean, E. A., Gorrie, J., Fortin, M., Ding, J., Monlton, R. (1988). Adjustment Factors for Flood Damage Curves. Technical Paper. ASCE. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(6). 635-646.
- Melbourne Water (1996). *Melbourne Water Land Development Manual, Appendix A: Floodway Safety Criteria*. Melbourne, Australia.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., Thielen, A. (2010). Review article “Assessment of economic flood damage.” *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(8), 1697–1724.
- Merz, B., Kreibich, H., Thielen, A., Schmidtke, R. (2004). Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings. *Natural Hazards and Earth System Science*, 4(1), 153–163.
- Merz, B., Thielen, A., and Gocht, M. (2007). Flood risk mapping at the local scale: concepts and challenges. *Flood risk management in Europe*. Section III, 231-251.
- Messner, F., Meyer, V. (2006). Flood damage, vulnerability and risk perception—challenges for flood damage research. *Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*. Part 4, 149-167.
- Meyer, V., Haase, D., Scheuer, S. (2009). Flood Risk Assessment in European River Basins—Concept, Methods, and Challenges Exemplified at the Mulde River. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 5(1), 17.
- Meyer, V., Priest, S., Kuhlicke, C. (2011). Economic evaluation of structural and non-structural flood risk management measures: examples from the Mulde River. *Natural Hazards*, 62(2), 301–324.
- Ministerio de la Presidencia (2010). Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación. España. 14p.
- Ministerio de Medio Ambiente (1996). *Guía Técnica para la Clasificación de Presas en Función del Riesgo Potencial*. España. 64p.
- Moore, K., Power, R. (2002). Safe Buffer Distances for Offstream Earth Dams. *Australian Journal of Water Resources*, 6(1), 1-15.
- Nakagawa, H., Nezu, I. (1993). *Turbulence in Open Channel Flows*. Taylor & Francis. CRC Press. Oxford, Reino Unido. 293p.
- Nanía, L. S. (1999). Metodología numérico experimental para el análisis del riesgo asociado a la escorrentía pluvial en una red de calles. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España.



- Nanía, L. S., León, A. S., García, M. H. (2015). Hydrologic-Hydraulic Model for Simulating Dual Drainage and Flooding in Urban Areas: Application to a Catchment in the Metropolitan Area of Chicago. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(5), 04014071, 1-13.
- Nasello, C., Tucciarelli, T. (2005). Dual Multilevel Urban Drainage Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(9), 748–754.
- Nikuradse, J. (1950). Laws of Flow in Rough Pipes. National Advisory Committee For Aeronautics. Technical Memorandum 1292. Translation of “Strömungsgesetze in rauhen Röhren.” VDI-Forschungsheft 361. Beilage zu “Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens” Ausgabe B Band 4, J. 64p.
- Oshikawa H., Oshima T., Komatsu T. (2011). Study on the Risk for Vehicular Traffic in a Flood Situation (in Japanese). *Advances in River Engineering*. JSCE, 17, 461–466.
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea DIRECTIVA 2007/60/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de octubre de 2007 relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. 8p.
- El Parlamento Europeo y El Consejo de la Unión (2000). DIRECTIVA 2000/60/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. 73p.
- Penning-Rowse, E., Johnson, C., Tunstall, S., Tapsell, S., Morris, J., Chatterton, J., Green, C. (2005). *The benefits of flood and coastal risk management: A Handbook of Assessment Techniques*. Cromwell Press, ed. Londres, Flood Hazard Research Centre, Middlesex University Press.
- Perkins, P. (1978) *Walkway Surfaces: Measurement of Slip Resistance*. Editores: C. Anderson y J. Senne. ASTM International. West Conshohocken, EEUU.
- Perkins, P. J., Wilson, M. P. (1983). Slip resistance testing of shoes — new developments. *Ergonomics*, 26(1), 73–82.
- Price, R. K., Vojinovic, Z. (2008). Urban flood disaster management. *Urban Water Journal*, 5(3), 259–276.
- Ramsbottom, D., Floyd, P., Penning-Rowse, E. (2006). *Flood Risks to People; Phase 2: Project Record. FD 2321/PR*. Reino Unido.
- Ravazzani G., Mancini M., Meroni C. (2009). Design hyetograph and routing scheme for flood mapping in a dense urban area. *Urban Water Journal*, 6(3), 221–231.
- Regione Liguria. Autorità di Bacino Regionale. Ambito di Bacino No. 7 (1993). Piano di bacino stralcio per la difesa idraulica e idrogeologica. Italia.
- Reiter, P. (2000). *International methods of Risk Analysis, Damage evaluation and social impact studies concerning Dam-Break accidents*. EU-Project RESCDAM. Seinäjoki, Finlandia.
- Rodríguez, R., Navarro, X., Casas, M. C., Ribalaygua, J., Russo, B., Pouget, L., Redaño, A. (2014). Influence of climate change on IDF curves for the metropolitan area of Barcelona (Spain). *International Journal of Climatology*, 34(3), 643–654.
- Rooseboom A., Basson M. S., Loots C. H., Wigget J. H., Bosman J. (1986). *Manual on Road Drainage*. 2nd Edition. National Transport Commission. República de Sudafrica.
- Russo, B. (2009). Design of surface drainage systems according to hazard criteria related to flooding of urban areas. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España.
- Russo, B., Martínez G., E., Gómez V., M., Bruñén A., E. (2014). “Evaluation of the Adequacy of the

- Hazard Criteria Proposed in the Spanish ‘Guidelines for Dam Classification According to Their Potential Risk of Failure’” en 13th International Conference on Urban Drainage. Sarawak, Malasia. 8p.
- Russo, B., Sunyer, D., Velasco, M., Kersting, T. (2013). *Report on the Urban risk management plan for Barcelona. Demonstration 1.3.1 Report. Parte del proyecto europeo CORFU*. 35p.
- Russo, B., Velasco, M., Suñer, D. (2013). “Flood hazard assessment considering climate change impacts-Application to Barcelona case study using a 1D/2D detailed coupled model” en International Conference on Flood Resilience: Experiences in Asia and Europe. Exeter, Reino Unido. 10p.
- Sadik, N. (1999) *Estado de la población mundial, 1999*. Fondo de Población de las Naciones Unidas (FNUAP). [en línea]:  
[http://www.unfpa.org/webdav/site/global/shared/documents/publications/1999/swp\\_1999\\_esp.pdf](http://www.unfpa.org/webdav/site/global/shared/documents/publications/1999/swp_1999_esp.pdf)
- Sarewitz, D., Pielke, R., Keykhan, M. (2003). Vulnerability and Risk: Some Thoughts from a Political and Policy Perspective. *Risk Analysis*, 23(4), 805–810.
- Scawthorn, C., Blais, N., Seligson, H., Tate, E., Mifflin, E., Thomas, W., Murphy, J., Jones, C. (2006). HAZUS-MH Flood Loss Estimation Methodology. I: Overview and Flood Hazard Characterization. *Natural Hazards Review*, 7(2), 60–71.
- Scawthorn, C., Flores, P., Blais, N., Seligson, H., Tate, E., Chang, S., Mifflin, E., Thomas, W., Murphy, J., Jones, C., and Lawrence, M. (2006). HAZUS-MH Flood Loss Estimation Methodology. II. Damage and Loss Assessment. *Natural Hazards Review*, 7(2), 72–81.
- Schlichting, H. (1979). *Boundary-Layer Theory*. McGraw-Hill, Inc. Braunschweig, Alemania.
- Shand, T. D., Cox, R. J., Blacka, M. J., Smith, G. P. (2011). *Australian Rainfall and Runoff (AR&R). Revision Project 10: Appropriate Safety Criteria for Vehicles (Report Number: P10/S2/020)*. Sídney, Australia.
- Shu, C., Xia, J., Falconer, R. A., Lin, B. (2011). Incipient velocity for partially submerged vehicles in floodwaters. *Journal of Hydraulic Research*, 49(6), 709–717.
- Sotelo, G. (1995). *Hidráulica general*. Limusa. México.
- Strandberg, L. (1983). On accident analysis and slip-resistance measurement. *Ergonomics*, 26(1), 11–32.
- Strandberg, L., Lanshammar, H. (1981). The dynamics of slipping accidents. *Journal of Occupational Accidents*, 3(3), 153–162.
- Streeter, V. L., Wylie, E. B. (1979). *Mecánica de los fluidos*. McGraw-Hill. México, D. F.
- Stronge, W. J. (2004). *Impact Mechanics*. Cambridge University Press, Reino Unido. 280p
- Stronge, W. J. (1990) Rigid Body Collisions with Friction. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 431(1881), 169–181.
- Subramanya, K. (2009). *Flow in Open Channels*. Tata McGraw-Hill Education. Nueva Delhi, India.
- Surendran, S., Gibas, G., Wade, S., Udale-Clarke, H. (2008). Supplementary note on flood hazard ratings and thresholds for development planning and control purpose. Environment Agency y HR Wallingford. Reino Unido. 5p.
- Takahashi S., Endoh K., Muro Z-I. (1992). Experimental Study on People’s Safety against Overtopping Waves on Breakwaters (in Japanese). *Report on the Port and Harbour Institute*, 34(4), 4–31.

- Takahasi K., Takahashi Y. (1987). *Moterized Society and Flood Disaster -Nagasaki flood appeals-* (in Japanese). Kyushu University Press. Japón.
- Témez, J. R. (1992). “Control del desarrollo urbano en las zonas inundables” en *Monografías del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos* nº 10. Madrid, España. 105–115.
- Teo, F. Y. (2010). *Study of the hydrodynamic processes of rivers and floodplains with obstructions*. Tesis Doctoral. University of Cardiff. Reino Unido.
- Teo, F. Y., Falconer, R. A., Lin, B., Xia, J. (2012). *Investigations Of Hazard Risks Relating To Vehicles Moving In Flood*. *Water Resources Management*, 1(1), 52–66.
- Teo, F. Y., Liew, Y. S., Falconer, R. A., Lin, B. (2013a). “Estimation of flood hazard risk relating to vehicles” en *35th IAHR World Congress*. Chengdu, China. 8p.
- Teo, F. Y., Liew, Y. S., Falconer, R. A., Lin, B. (2013b). “Flood Hazard Assessment of Vehicle Blockages at Bridges” en *IAHR World Congress*. Chengdu, China. 8p.
- Teo, F. Y., Xia, J., Falconer, R. A., and Lin, B. (2012). *Experimental studies on the interaction between vehicles and floodplain flows*. *International Journal of River Basin Management*, 10(2), 149–160.
- The United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR) (2009). *UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*. 30p.
- The World Bank. Urban Development & Local Government Unit. Finance; Economics and Urban Department (2011). *Urban risk assessments. An approach for understanding disaster and climate risk in cities*. 186p.
- Thywissen, K. (2006) *Components of Risk. A Comparative Glossary*. Publications Series of UNU-EHS. No. 2/2006. United Nations University-Institute of Environment and Human Security. 52p.
- Toda, K., Ishigaki, T., Ozaki, T. (2013) “Experiments study on floating car in flooding” en *International Conference on Flood Resilience: Experiences in Asia and Europe*. Exeter, Reino Unido. 6p.
- U.S. Army Corps of Engineers (2009). *Economic Guidance Memorandum, 09-04, Generic Depth-Damage Relationships for Vehicles*. EEUU. 9p.
- U.S. Department of the Interior, B. of R. (USBR) (1988). *Downstream Hazard Classification Guidelines*. ACER Technical Memorandum No. 11. EEUU. 56p.
- Velasco, M., Cabello, À., Russo, B. (2016). *Flood damage assessment in urban areas. Application to the Raval district of Barcelona using synthetic depth damage curves*. *Urban Water Journal*, 13(4), 426-440.
- Velasco, M., Russo, B., Kersting, T., Cabello, À. (2013). “Flood vulnerability assessment considering climate changes impacts. Application to Barcelona case study using relative depth damage curves” en *Internacional Conference on Flood Resilience: Experiences in Asia and Europe*. Exeter, Reino Unido. 11p.
- Wahl, T. L. (2000). “Analyzing ADV Data Using WinADV” en *2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management*. Minneapolis, Minnesota, EEUU. 10p.
- White, G. F. (1945). *Human Adjustment to Floods: A Geographical Approach to the Flood Problem in the United States*, University of Chicago.
- Wilson, M. P. and Perkins, P. J. (1985). *Evaluation of a slip-resistance test for shoes*. *Ergonomics*, 28(7), 1081–1085.

- Wisner, P. (1985). *Evaluation of inlet control in dual drainage systems*. Novatech Engineering Consultants Ltd. Ottawa, Canadá.
- Woods, K.B., Berry, D.S., Goetz, W.H. (1960). *Highway Engineering Handbook*. McGraw-Hill Book Company Inc. 43p.
- Wright-Mc Laughlin Engineers (1969). Urban drainage and Flood control district. Urban Drainage and Flood Control District. Denver, Colorado, EEUU. 861p.
- Xia, J., Falconer, R. A., Wang, Y., y Xiao, X. (2014). New criterion for the stability of a human body in floodwaters. *Journal of Hydraulic Research*, 52(1), 93–104.
- Xia, J., Falconer, R. A., Xiao, X., Wang, Y. (2013). Criterion of vehicle stability in floodwaters based on theoretical and experimental studies. *Natural Hazards*, 70(2), 1619–1630.
- Xia, J., Teo, F. Y., Lin, B., Falconer, R. A. (2011). Formula of incipient velocity for flooded vehicles. *Natural Hazards*, 58(1), 1–14.
- Yandell, W. O. (1973). *Report on the Coefficient of Road-tyre Friction under Stationary Flooded Conditions of Roads in Canberra*. Highway Engineering Note No. 40. Australia. 7p.
- Yee M. (2003). Human Stability in Floodway. Tesis Doctoral. University of New South Wales. Sidney, Australia.



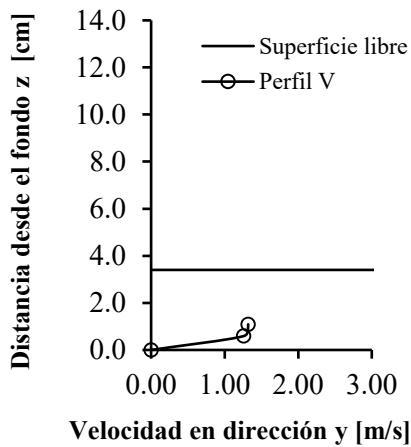
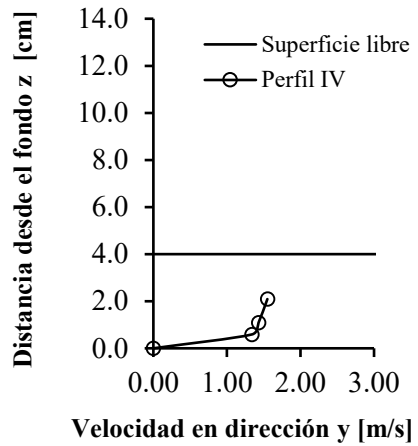
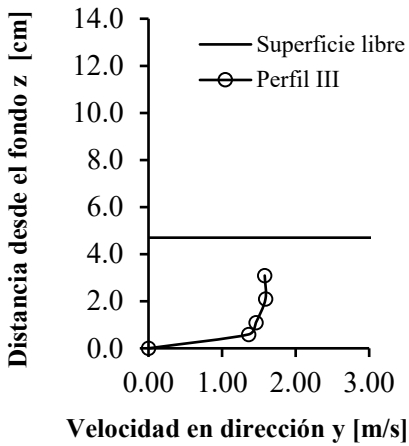
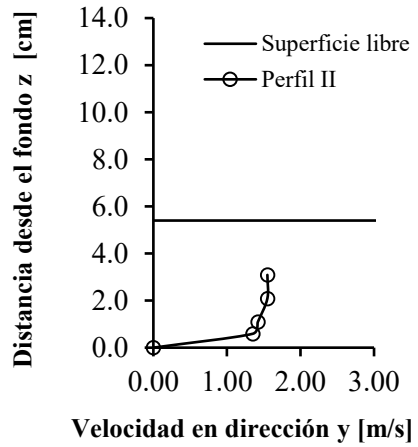
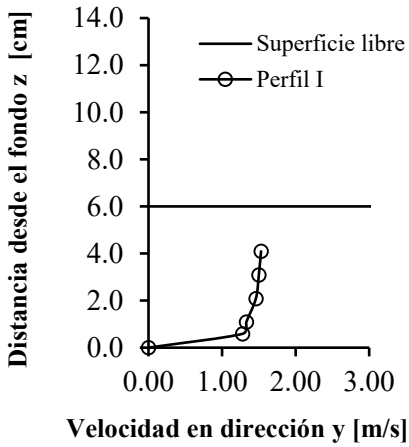
---

**Anejo A.**  
**Integración de perfiles de velocidad**

---



**Pendiente: 2% Caudal: 105.49 l/s Perfiles de Velocidad**





## Pendiente: 2% Caudal: 105.49 l/s Determinación del Caudal

Q [l/s]= 105.49		Velocidad $V_{i,j}$ [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.20	6.00	5.40	4.70	4.00	3.40	3.20
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	1.28	1.35	1.36	1.34	1.26	0.00
0.50	1.09	0.00	1.33	1.42	1.46	1.43	1.32	0.00
1.00	2.09	0.00	1.46	1.55	1.59	1.55	1.32	0.00
1.00	3.09	0.00	1.50	1.55	1.58	1.55		
1.00	4.09	0.00	1.53	1.55	1.58			
		0.00	1.53					

Q [l/s]= 105.49		Área $A_{i,j}$ [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.20	6.00	5.40	4.70	4.00	3.40	3.20
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	56.24	0.37
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	49.35		
1.00	4.09	0.20	27.30	63.35	38.85			
		0.32	38.49					
$A_j$ [cm <sup>2</sup> ]		1.22	160.80	185.15	160.65	136.15	96.64	0.67
$\sum A_{v \neq 0}$ [cm <sup>2</sup> ]		707.47						
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]		33.806						
$\sum A_j$ [cm <sup>2</sup> ]		741.275						

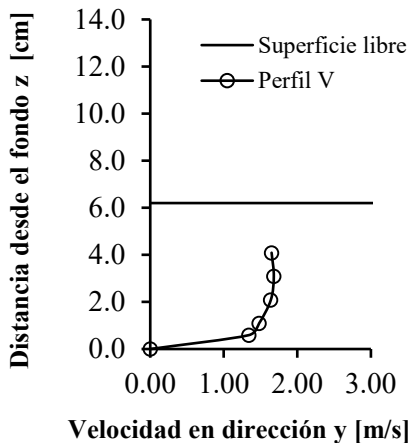
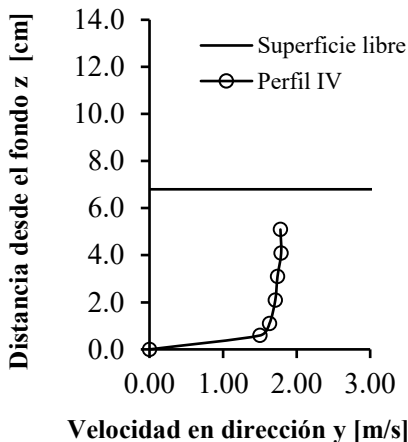
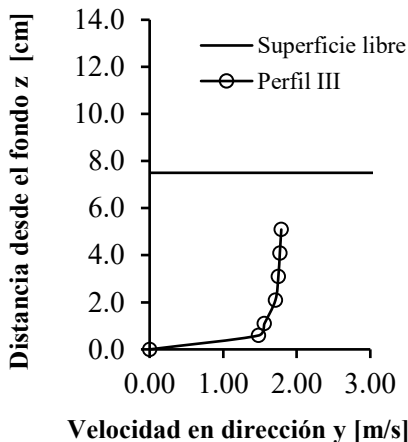
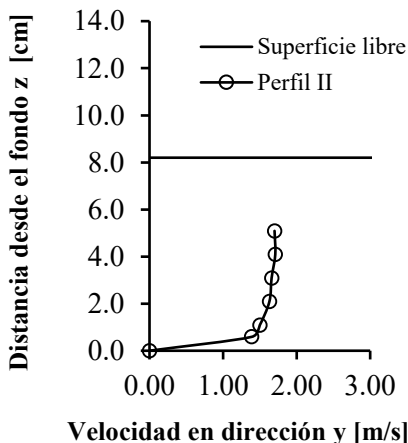
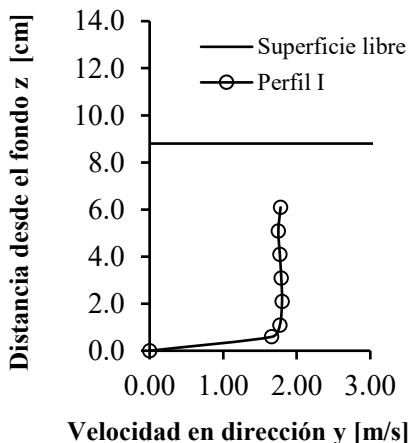
Q [l/s]= 105.49		Caudal $Q_{i,j}$ [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.20	6.00	5.40	4.70	4.00	3.40	3.20
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	2,725.63	3,685.50	3,712.80	3,658.20	2,683.04	0.00
0.50	1.09	0.00	1,815.45	2,485.00	2,555.00	2,502.50	1,801.80	0.00
1.00	2.09	0.00	3,985.80	5,425.00	5,565.00	5,425.00	7,423.42	0.00
1.00	3.09	0.00	4,095.00	5,425.00	5,530.00	7,649.25		
1.00	4.09	0.00	4,176.90	9,819.25	6,138.30			
		0.00	5,889.43					
$Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]		0.00	22,688.21	26,839.75	23,501.10	19,234.95	11,908.26	0.00
$\sum Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]		104,172.27						
$Q_j$ [l/s]		0.00	22.69	26.84	23.50	19.23	11.91	0.00
$\sum Q_j$ [l/s]		104.17						

**Pendiente: 2% Caudal: 105.49 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$**

Q [l/s]= 105.49		$V^3_{i,j} * A_{i,j} [m^5/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.20	6.00	5.40	4.70	4.00	3.40	3.20
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0045	0.0067	0.0069	0.0066	0.0043	0.00
0.50	1.09	0.00	0.0032	0.0050	0.0054	0.0051	0.0031	0.00
1.00	2.09	0.00	0.0085	0.0130	0.0141	0.0130	0.0129	0.00
1.00	3.09	0.00	0.0092	0.0130	0.0138	0.0184		0.00
1.00	4.09	0.00	0.0098	0.0236	0.0153			
		0.00	0.0138					
		$\sum(V^3_{i,1} * A_{i,1})$	$\sum(V^3_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^3_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^3_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^3_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^3_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^3_{i,7} * A_{i,7})$
$V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		0.000	0.049	0.061	0.056	0.043	0.020	0.000
$\sum V^3_j * A_j [m^5/s^3]$								0.229
$\alpha [-]$								1.114

Q [l/s]= 105.49		$V^2_{i,j} * A_{i,j} [m^4/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.20	6.00	5.40	4.70	4.00	3.40	3.20
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0035	0.0050	0.0050	0.0049	0.0034	0.00
0.50	1.09	0.00	0.0024	0.0035	0.0037	0.0036	0.0024	0.00
1.00	2.09	0.00	0.0058	0.0084	0.0088	0.0084	0.0098	0.00
1.00	3.09	0.00	0.0061	0.0084	0.0087	0.0119		
1.00	4.09	0.00	0.0064	0.0152	0.0097			
		0.00	0.0090					
		$\sum(V^2_{i,1} * A_{i,1})$	$\sum(V^2_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^2_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^2_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^2_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^2_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^2_{i,7} * A_{i,7})$
$V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.000	0.033	0.041	0.036	0.029	0.016	0.000
$\sum V^2_j * A_j [m^4/s^3]$								0.154
$\beta [-]$								1.053

### Pendiente: 2% Caudal: 191.34 l/s Perfiles de Velocidad



**Pendiente: 2% Caudal: 191.34 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 191.34		Velocidad $V_{ij}$ [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		9.00	8.80	8.20	7.50	6.80	6.20	6.00
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	1.66	1.39	1.48	1.50	1.34	0.00
0.50	1.09	0.00	1.77	1.50	1.56	1.63	1.48	0.00
1.00	2.09	0.00	1.80	1.63	1.71	1.71	1.64	0.00
1.00	3.09	0.00	1.79	1.66	1.75	1.74	1.68	0.00
1.00	4.09	0.00	1.77	1.71	1.77	1.79	1.65	0.00
1.00	5.09	0.00	1.75	1.70	1.79	1.78	1.65	0.00
1.00	6.09	0.00	1.78	1.70	1.79	1.78		
		0.00	1.78					

Q [l/s]= 191.34		Área $A_{ij}$ [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		9.00	8.80	8.20	7.50	6.80	6.20	6.00
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	5.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	43.95	0.28
1.00	6.09	0.20	27.30	91.35	66.85	42.35		
		0.48	60.33					
$\sum A_{i,1}$		1.78	237.24	283.15	258.65	234.15	166.26	1.18
$\sum A_{v \neq 0}$ [cm <sup>2</sup> ]					1147.52			
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]					34.876			
$\sum A_j$ [cm <sup>2</sup> ]					1182.4			

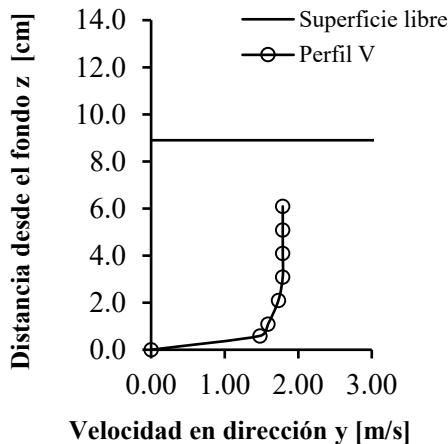
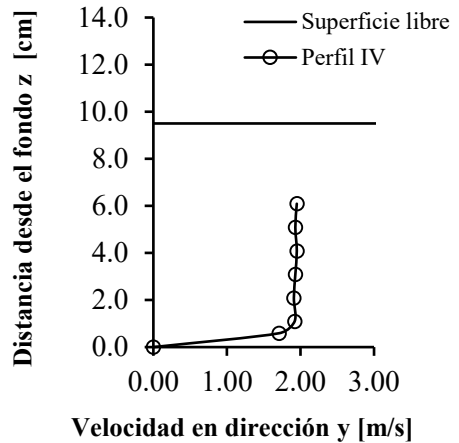
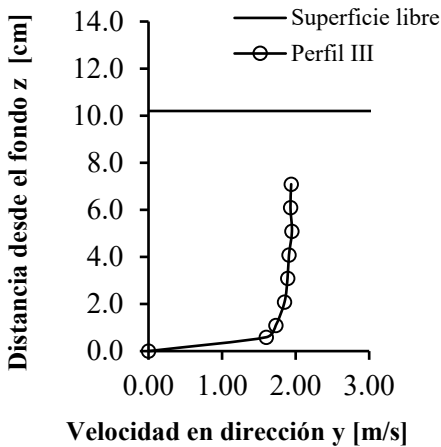
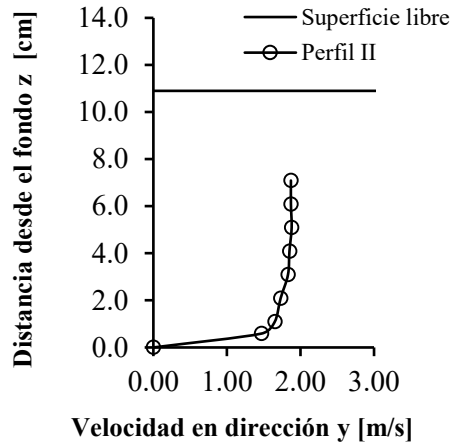
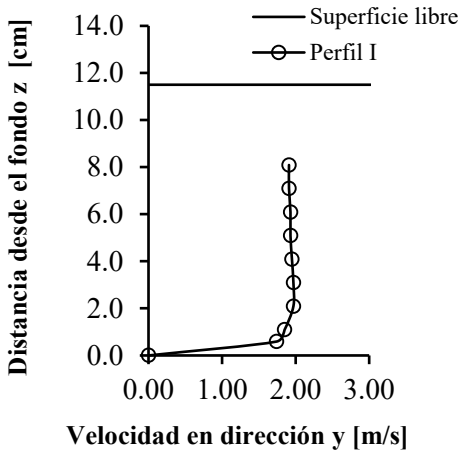
Q [l/s]= 191.34		Caudal $Q_{ij}$ [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		9.00	8.80	8.20	7.50	6.80	6.20	6.00
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	3,534.80	3,794.70	4,040.40	4,095.00	2,853.40	0.00
0.50	1.09	0.00	2,416.05	2,625.00	2,730.00	2,852.50	2,020.20	0.00
1.00	2.09	0.00	4,914.00	5,705.00	5,985.00	5,985.00	4,477.20	0.00
1.00	3.09	0.00	4,886.70	5,810.00	6,125.00	6,090.00	4,586.40	0.00
1.00	4.09	0.00	4,832.10	5,985.00	6,195.00	6,265.00	4,504.50	0.00
1.00	5.09	0.00	4,777.50	5,950.00	6,265.00	6,230.00	7,252.25	0.00
1.00	6.09	0.00	4,859.40	15,529.50	11,966.15	7,538.30		
		0.00	10,739.27					
$\sum Q_{i,1}$		0.00	40,959.83	45,399.20	43,306.55	39,055.80	25,693.94	0.00
$\sum Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]					194,415.32			
$\sum Q_{i,1}$		0.00	40.96	45.40	43.31	39.06	25.69	0.00
$\sum Q_j$ [l/s]					194.42			

**Pendiente: 2% Caudal: 191.34 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$**

Q [l/s]= 191.34		$V^3_{i,j} * A_{i,j} [m^5/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		9.00	8.80	8.20	7.50	6.80	6.20	6.00
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0097	0.0073	0.0089	0.0092	0.0051	0.00
0.50	1.09	0.00	0.0076	0.0059	0.0066	0.0076	0.0044	0.00
1.00	2.09	0.00	0.0159	0.0152	0.0175	0.0175	0.0120	0.00
1.00	3.09	0.00	0.0157	0.0160	0.0188	0.0184	0.0129	0.00
1.00	4.09	0.00	0.0151	0.0175	0.0194	0.0201	0.01	0.00
1.00	5.09	0.00	0.0146	0.02	0.02	0.02	0.0197	0.00
1.00	6.09	0.00	0.02	0.0449	0.0383	0.0239		0.00
		0.00	0.0340					
		$\sum(V^3_{i,j} * A_{i,j})$	$\sum(V^3_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^3_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^3_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^3_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^3_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^3_{i,7} * A_{i,7})$
$V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		0.000	0.128	0.124	0.130	0.116	0.067	0.000
$\sum V^3_j * A_j [m^5/s^3]$								0.565
$\alpha [-]$								1.074

Q [l/s]= 191.34		$V^2_{i,j} * A_{i,j} [m^4/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		9.00	8.80	8.20	7.50	6.80	6.20	6.00
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0059	0.0053	0.0060	0.0061	0.0038	0.00
0.50	1.09	0.00	0.0043	0.0039	0.0043	0.0046	0.0030	0.00
1.00	2.09	0.00	0.0088	0.0093	0.0102	0.0102	0.0073	0.00
1.00	3.09	0.00	0.0087	0.0096	0.0107	0.0106	0.0077	0.00
1.00	4.09	0.00	0.0086	0.0102	0.0110	0.0112	0.01	0.00
1.00	5.09	0.00	0.0084	0.01	0.01	0.01	0.0120	0.00
1.00	6.09	0.00	0.01	0.0264	0.0214	0.0134		0.00
		0.00	0.0191					
		$\sum(V^2_{i,j} * A_{i,j})$	$\sum(V^2_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^2_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^2_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^2_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^2_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^2_{i,7} * A_{i,7})$
$V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.000	0.072	0.075	0.075	0.067	0.041	0.000
$\sum V^2_j * A_j [m^4/s^3]$								0.331
$\beta [-]$								1.035

**Pendiente: 2% Caudal: 292.50 l/s Perfiles de Velocidad**



**Pendiente: 2% Caudal: 292.50 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 292.50		Velocidad $V_{ij}$ [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		11.70	11.50	10.90	10.20	9.50	8.90	8.70
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	1.74	1.47	1.60	1.71	1.48	0.00
0.50	1.09	0.00	1.85	1.65	1.73	1.92	1.59	0.00
1.00	2.09	0.00	1.97	1.73	1.85	1.91	1.73	0.00
1.00	3.09	0.00	1.97	1.83	1.89	1.93	1.79	0.00
1.00	4.09	0.00	1.95	1.85	1.91	1.95	1.79	0.00
1.00	5.09	0.00	1.93	1.88	1.95	1.93	1.79	0.00
1.00	6.09	0.00	1.93	1.87	1.93	1.95	1.79	0.00
1.00	7.09	0.00	1.91	1.87	1.94	1.95	1.79	0.00
1.00	8.09	0.00	1.91	1.87	1.94			
		0.00	1.91	1.87	1.94			

Q [l/s]= 292.50		Área $A_{ij}$ [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		11.70	11.50	10.90	10.20	9.50	8.90	8.70
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	5.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	6.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	7.09	0.20	27.30	35.00	35.00	101.85	63.06	0.42
1.00	8.09	0.20	27.30	35.00	35.00			
		0.62	79.44	80.85	56.35			

$\sum A_{i,1}$	$\sum A_{i,2}$	$\sum A_{i,3}$	$\sum A_{i,4}$	$\sum A_{i,5}$	$\sum A_{i,6}$	$\sum A_{i,7}$
2.32	310.95	377.65	353.15	328.65	239.97	1.72
$\sum A_{v \neq 0}$ [cm <sup>2</sup> ]	1578.44					
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]	35.956					
$\sum A_j$ [cm <sup>2</sup> ]	1614.4					

Q [l/s]= 292.50		Caudal $Q_{ij}$ [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		11.70	11.50	10.90	10.20	9.50	8.90	8.70
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	3,705.16	4,013.10	4,368.00	4,668.30	3,151.51	0.00
0.50	1.09	0.00	2,525.25	2,887.50	3,027.50	3,360.00	2,170.35	0.00
1.00	2.09	0.00	5,378.10	6,055.00	6,475.00	6,685.00	4,722.90	0.00
1.00	3.09	0.00	5,378.10	6,405.00	6,615.00	6,755.00	4,886.70	0.00
1.00	4.09	0.00	5,323.50	6,475.00	6,685.00	6,825.00	4,886.70	0.00
1.00	5.09	0.00	5,268.90	6,580.00	6,825.00	6,755.00	4,886.70	0.00
1.00	6.09	0.00	5,268.90	6,545.00	6,755.00	6,825.00	4,886.70	0.00
1.00	7.09	0.00	5,214.30	6,545.00	6,790.00	19,860.75	11,288.28	0.00
1.00	8.09	0.00	5,214.30	6,545.00	6,790.00			
		0.00	15,173.61	15,118.95	10,931.90			

$\sum Q_{i,1}$	$\sum Q_{i,2}$	$\sum Q_{i,3}$	$\sum Q_{i,4}$	$\sum Q_{i,5}$	$\sum Q_{i,6}$	$\sum Q_{i,7}$
0.00	58,450.12	67,169.55	65,262.40	61,734.05	40,879.84	0.00
$\sum Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]	293,495.96					
$\sum Q_{i,1}$	$\sum Q_{i,2}$	$\sum Q_{i,3}$	$\sum Q_{i,4}$	$\sum Q_{i,5}$	$\sum Q_{i,6}$	$\sum Q_{i,7}$
0.00	58.45	67.17	65.26	61.73	40.88	0.00
$\sum Q_j$ [l/s]	293.50					

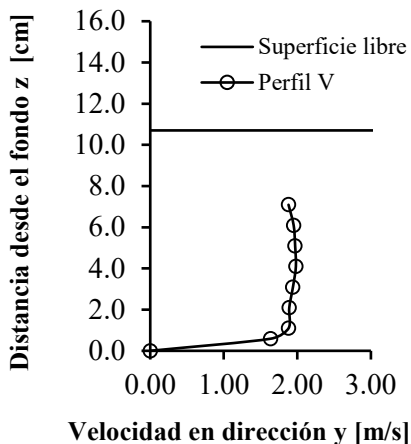
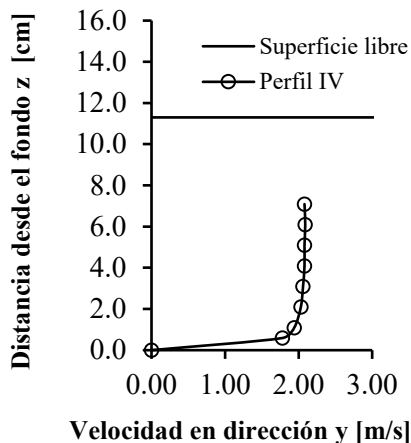
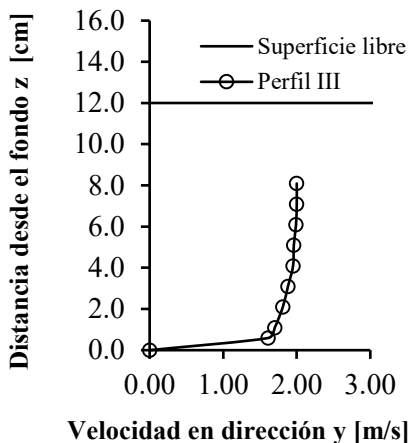
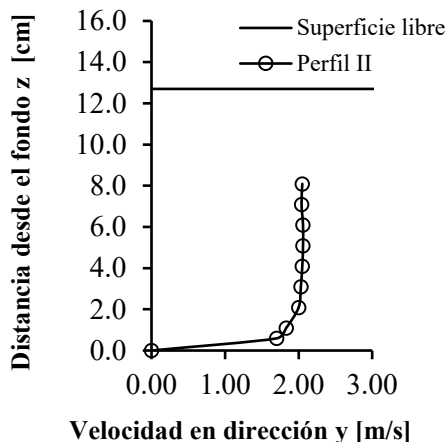
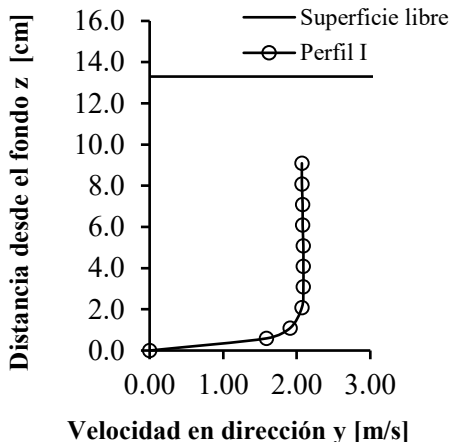
**Pendiente: 2% Caudal: 292.50 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$**

Q [l/s]= 292.50		$V^3_{ij} * A_{ij} [m^5/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		11.70	11.50	10.90	10.20	9.50	8.90	8.70
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0112	0.0087	0.0112	0.0137	0.0069	0.00
0.50	1.09	0.00	0.0086	0.0079	0.0091	0.0124	0.0055	0.00
1.00	2.09	0.00	0.0209	0.0181	0.0222	0.0244	0.0141	0.00
1.00	3.09	0.00	0.0209	0.0214	0.0236	0.0252	0.0157	0.00
1.00	4.09	0.00	0.0202	0.0222	0.0244	0.0260	0.0157	0.00
1.00	5.09	0.00	0.0196	0.0233	0.0260	0.0252	0.0157	0.00
1.00	6.09	0.00	0.0196	0.0229	0.0252	0.0260	0.0157	0.00
1.00	7.09	0.00	0.0190	0.0229	0.0256	0.0755	0.0362	0.00
1.00	8.09	0.00	0.0190	0.0229	0.0256			0.00
		0.00	0.0554	0.0529	0.0411			
$\sum(V^3_{i,1} * A_{i,1})$		0.000	0.214	0.223	0.234	0.228	0.125	0.000
$\sum V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		1.025						
$\alpha [-]$		1.057						

Q [l/s]= 292.50		$V^2_{ij} * A_{ij} [m^4/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		11.70	11.50	10.90	10.20	9.50	8.90	8.70
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0064	0.0059	0.0070	0.0080	0.0047	0.00
0.50	1.09	0.00	0.0047	0.0048	0.0052	0.0065	0.0035	0.00
1.00	2.09	0.00	0.0106	0.0105	0.0120	0.0128	0.0082	0.00
1.00	3.09	0.00	0.0106	0.0117	0.0125	0.0130	0.0087	0.00
1.00	4.09	0.00	0.0104	0.0120	0.0128	0.0133	0.0087	0.00
1.00	5.09	0.00	0.0102	0.0124	0.0133	0.0130	0.0087	0.00
1.00	6.09	0.00	0.0102	0.0122	0.0130	0.0133	0.0087	0.00
1.00	7.09	0.00	0.0100	0.0122	0.0132	0.0387	0.0202	0.00
1.00	8.09	0.00	0.0100	0.0122	0.0132			0.00
		0.00	0.0290	0.0283	0.0212			
$\sum(V^2_{i,1} * A_{i,1})$		0.000	0.112	0.122	0.123	0.119	0.071	0.000
$\sum V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.548						
$\beta [-]$		1.026						



### Pendiente: 2% Caudal: 370.68 l/s Perfiles de Velocidad



**Pendiente: 2% Caudal: 370.68 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 370.68		Velocidad V <sub>ij</sub> [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		13.50	13.30	12.70	12.00	11.30	10.70	10.50
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Δz [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	1.59	1.70	1.61	1.78	1.64	0.00
0.50	1.09	0.00	1.91	1.83	1.70	1.94	1.88	0.00
1.00	2.09	0.00	2.07	2.00	1.81	2.03	1.89	0.00
1.00	3.09	0.00	2.09	2.03	1.88	2.06	1.94	0.00
1.00	4.09	0.00	2.09	2.05	1.95	2.08	1.98	0.00
1.00	5.09	0.00	2.09	2.06	1.96	2.08	1.97	0.00
1.00	6.09	0.00	2.08	2.06	1.99	2.09	1.95	0.00
1.00	7.09	0.00	2.08	2.04	2.00	2.08	1.88	0.00
1.00	8.09	0.00	2.07	2.05	2.00	2.08	1.88	0.00
1.00	9.09	0.00	2.07	2.05	2.00			
		0.00	2.07					

Q [l/s]= 370.68		Área A <sub>ij</sub> [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		13.50	13.30	12.70	12.00	11.30	10.70	10.50
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Δz [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	5.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	6.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	7.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	8.09	0.20	27.30	35.00	35.00	129.85	84.90	0.58
1.00	9.09	0.20	27.30	143.85	119.35			
		0.78	101.28					

ΣA <sub>i,1</sub>	ΣA <sub>i,2</sub>	ΣA <sub>i,3</sub>	ΣA <sub>i,4</sub>	ΣA <sub>i,5</sub>	ΣA <sub>i,6</sub>	ΣA <sub>i,7</sub>
2.68	360.09	440.65	416.15	391.65	289.11	2.08
ΣA <sub>v=0</sub> [cm <sup>2</sup> ]	1865.72					
ΣA <sub>v=0</sub> [cm <sup>2</sup> ]	36.676					
ΣA <sub>j</sub> [cm <sup>2</sup> ]	1902.4					

Q [l/s]= 370.68		Caudal Q <sub>ij</sub> [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		13.50	13.30	12.70	12.00	11.30	10.70	10.50
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Δz [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	3,385.75	4,641.00	4,395.30	4,859.40	3,492.22	0.00
0.50	1.09	0.00	2,607.15	3,202.50	2,975.00	3,395.00	2,566.20	0.00
1.00	2.09	0.00	5,651.10	7,000.00	6,335.00	7,105.00	5,159.70	0.00
1.00	3.09	0.00	5,705.70	7,105.00	6,580.00	7,210.00	5,296.20	0.00
1.00	4.09	0.00	5,705.70	7,175.00	6,825.00	7,280.00	5,405.40	0.00
1.00	5.09	0.00	5,705.70	7,210.00	6,860.00	7,280.00	5,378.10	0.00
1.00	6.09	0.00	5,678.40	7,210.00	6,965.00	7,315.00	5,323.50	0.00
1.00	7.09	0.00	5,678.40	7,140.00	7,000.00	7,280.00	5,132.40	0.00
1.00	8.09	0.00	5,651.10	7,175.00	7,000.00	27,008.80	15,961.76	0.00
1.00	9.09	0.00	5,651.10	29,489.25	23,870.00			
		0.00	20,965.58	0.00	0.00			

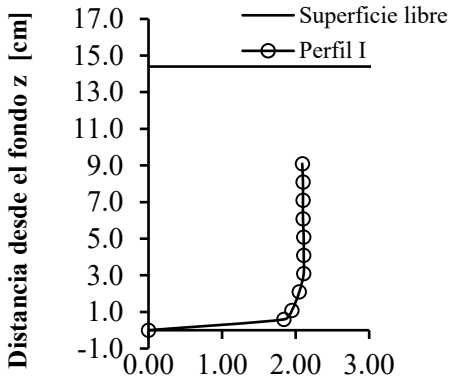
ΣQ <sub>i,1</sub>	ΣQ <sub>i,2</sub>	ΣQ <sub>i,3</sub>	ΣQ <sub>i,4</sub>	ΣQ <sub>i,5</sub>	ΣQ <sub>i,6</sub>	ΣQ <sub>i,7</sub>
0.00	72,385.68	87,347.75	78,805.30	78,733.20	53,715.48	0.00
ΣQ <sub>j</sub> [cm <sup>3</sup> /s]	370,987.41					
ΣQ <sub>i,1</sub>	ΣQ <sub>i,2</sub>	ΣQ <sub>i,3</sub>	ΣQ <sub>i,4</sub>	ΣQ <sub>i,5</sub>	ΣQ <sub>i,6</sub>	ΣQ <sub>i,7</sub>
0.00	72.39	87.35	78.81	78.73	53.72	0.00
ΣQ <sub>j</sub> [l/s]	370.99					

**Pendiente: 2% Caudal: 370.68 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$**

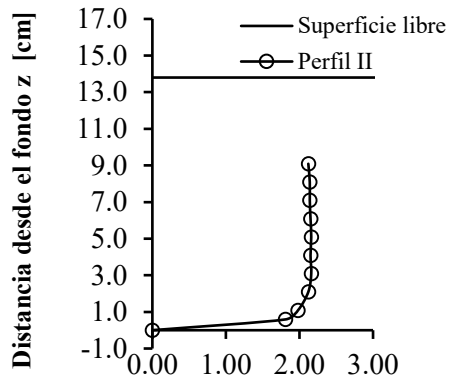
Q [l/s]= 370.68		$V^3_{i,j} * A_{i,j} [m^5/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		13.50	13.30	12.70	12.00	11.30	10.70	10.50
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.009	0.013	0.011	0.015	0.009	0.00
0.50	1.09	0.00	0.010	0.011	0.009	0.013	0.009	0.00
1.00	2.09	0.00	0.024	0.028	0.021	0.029	0.018	0.00
1.00	3.09	0.00	0.025	0.029	0.023	0.031	0.020	0.00
1.00	4.09	0.00	0.025	0.030	0.026	0.031	0.021	0.00
1.00	5.09	0.00	0.025	0.031	0.026	0.031	0.021	0.00
1.00	6.09	0.00	0.025	0.031	0.028	0.032	0.020	0.00
1.00	7.09	0.00	0.025	0.030	0.028	0.031	0.018	0.00
1.00	8.09	0.00	0.024	0.030	0.028	0.117	0.056	0.00
1.00	9.09	0.00	0.024	0.124	0.095			
	0.00		0.090					
		$\sum(V^3_{i,1}*A_{i,1})$	$\sum(V^3_{i,2}*A_{i,2})$	$\sum(V^3_{i,3}*A_{i,3})$	$\sum(V^3_{i,4}*A_{i,4})$	$\sum(V^3_{i,5}*A_{i,5})$	$\sum(V^3_{i,6}*A_{i,6})$	$\sum(V^3_{i,7}*A_{i,7})$
$V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		0.000	0.304	0.357	0.295	0.331	0.194	0.000
$\sum V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		1.481						
$\alpha [-]$		1.050						

Q [l/s]= 370.68		$V^2_{i,j} * A_{i,j} [m^4/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		13.50	13.30	12.70	12.00	11.30	10.70	10.50
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.005	0.008	0.007	0.009	0.006	0.00
0.50	1.09	0.00	0.005	0.006	0.005	0.007	0.005	0.00
1.00	2.09	0.00	0.012	0.014	0.011	0.014	0.010	0.00
1.00	3.09	0.00	0.012	0.014	0.012	0.015	0.010	0.00
1.00	4.09	0.00	0.012	0.015	0.013	0.015	0.011	0.00
1.00	5.09	0.00	0.012	0.015	0.013	0.015	0.011	0.00
1.00	6.09	0.00	0.012	0.015	0.014	0.015	0.010	0.00
1.00	7.09	0.00	0.012	0.015	0.014	0.015	0.010	0.00
1.00	8.09	0.00	0.012	0.015	0.014	0.056	0.030	0.00
1.00	9.09	0.00	0.012	0.060	0.048			
	0.00		0.043					
		$\sum(V^2_{i,1}*A_{i,1})$	$\sum(V^2_{i,2}*A_{i,2})$	$\sum(V^2_{i,3}*A_{i,3})$	$\sum(V^2_{i,4}*A_{i,4})$	$\sum(V^2_{i,5}*A_{i,5})$	$\sum(V^2_{i,6}*A_{i,6})$	$\sum(V^2_{i,7}*A_{i,7})$
$V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.000	0.148	0.176	0.152	0.161	0.102	0.000
$\sum V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.740						
$\beta [-]$		1.023						

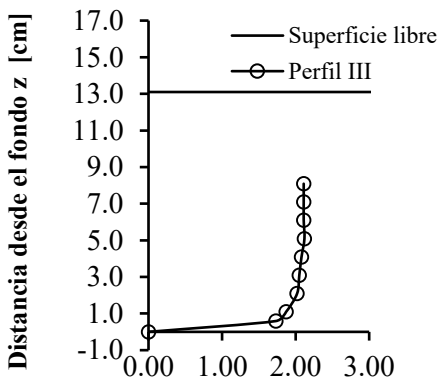
**Pendiente: 2% Caudal: 418.96 l/s Perfiles de Velocidad**



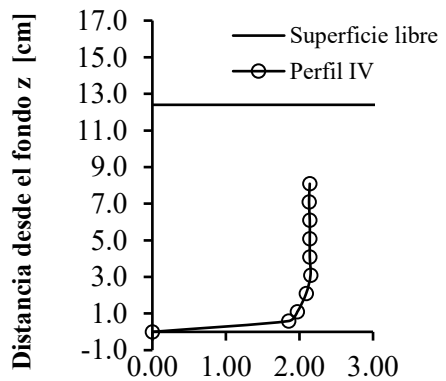
Velocidad en dirección y [m/s]



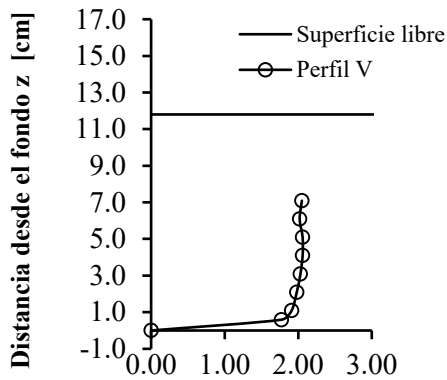
Velocidad en dirección y [m/s]



Velocidad en dirección y [m/s]



Velocidad en dirección y [m/s]



Velocidad en dirección y [m/s]

**Pendiente: 2% Caudal: 418.96 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 418.96		Velocidad $V_{ij}$ [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]	14.60	14.40	13.80	13.10	12.40	11.80	11.60	
$\Delta x$ [cm]	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20	
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	1.84	1.81	1.73	1.85	1.77	0.00
0.50	1.09	0.00	1.95	1.98	1.87	1.97	1.91	0.00
1.00	2.09	0.00	2.05	2.12	2.02	2.09	1.98	0.00
1.00	3.09	0.00	2.11	2.16	2.05	2.15	2.03	0.00
1.00	4.09	0.00	2.11	2.15	2.08	2.14	2.06	0.00
1.00	5.09	0.00	2.11	2.16	2.12	2.14	2.06	0.00
1.00	6.09	0.00	2.10	2.15	2.11	2.14	2.02	0.00
1.00	7.09	0.00	2.10	2.14	2.11	2.13	2.05	0.00
1.00	8.09	0.00	2.10	2.14	2.11	2.14	2.05	0.00
1.00	9.09	0.00	2.09	2.12	2.11	2.14		0.00
		0.00	2.09	2.12				

Q [l/s]= 418.96		Área $A_{i,j}$ [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]	14.60	14.40	13.80	13.10	12.40	11.80	11.60	
$\Delta x$ [cm]	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20	
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	5.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	6.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	7.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	8.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	114.93	0.80
1.00	9.09	0.20	27.30	35.00	157.85	133.35		
		1.00	131.31	147.35				

$\sum A_{i,1}$	$\sum A_{i,2}$	$\sum A_{i,3}$	$\sum A_{i,4}$	$\sum A_{i,5}$	$\sum A_{i,6}$	$\sum A_{i,7}$	
$A_j$ [cm <sup>2</sup> ]	2.90	390.12	479.15	454.65	430.15	319.14	2.30
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]	2041.28						
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]	37.116						
$\sum A_i$ [cm <sup>2</sup> ]	2078.4						

Q [l/s]= 418.96		Caudal $Q_{i,j}$ [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]	14.60	14.40	13.80	13.10	12.40	11.80	11.60	
$\Delta x$ [cm]	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20	
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	3,918.10	4,941.30	4,722.90	5,050.50	3,769.04	0.00
0.50	1.09	0.00	2,661.75	3,465.00	3,272.50	3,447.50	2,607.15	0.00
1.00	2.09	0.00	5,596.50	7,420.00	7,070.00	7,315.00	5,405.40	0.00
1.00	3.09	0.00	5,760.30	7,560.00	7,175.00	7,525.00	5,541.90	0.00
1.00	4.09	0.00	5,760.30	7,525.00	7,280.00	7,490.00	5,623.80	0.00
1.00	5.09	0.00	5,760.30	7,560.00	7,420.00	7,490.00	5,623.80	0.00
1.00	6.09	0.00	5,733.00	7,525.00	7,385.00	7,490.00	5,514.60	0.00
1.00	7.09	0.00	5,733.00	7,490.00	7,385.00	7,455.00	5,596.50	0.00
1.00	8.09	0.00	5,733.00	7,490.00	7,385.00	7,490.00	23,561.27	0.00
1.00	9.09	0.00	5,705.70	7,420.00	33,306.35	28,536.90		
		0.00	27,444.42	31,238.20				

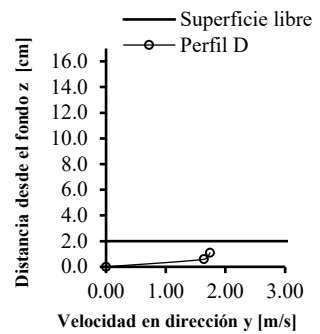
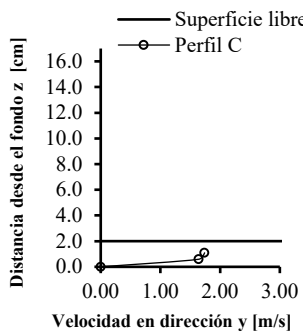
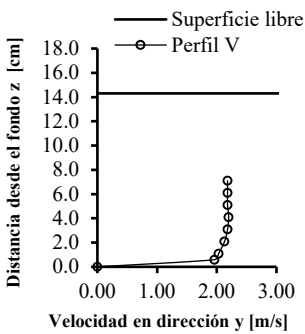
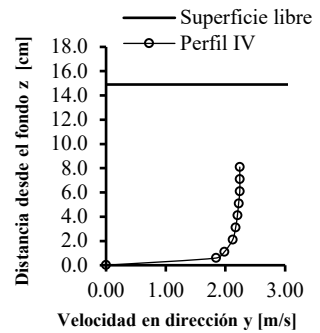
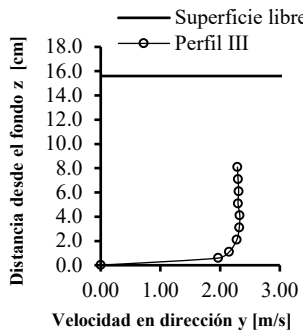
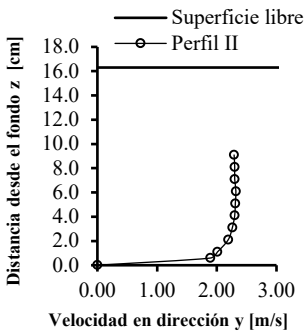
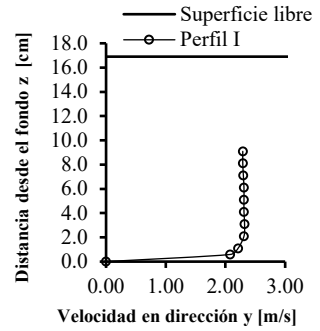
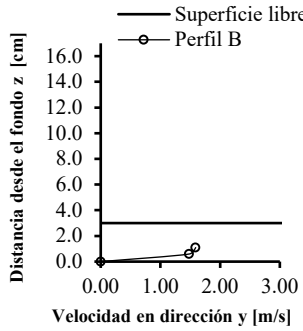
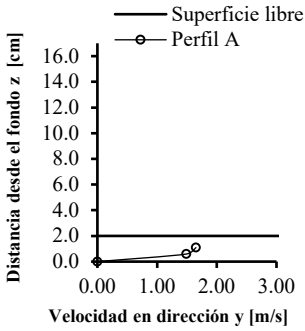
$\sum Q_{i,1}$	$\sum Q_{i,2}$	$\sum Q_{i,3}$	$\sum Q_{i,4}$	$\sum Q_{i,5}$	$\sum Q_{i,6}$	$\sum Q_{i,7}$	
$Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]	0.00	79,806.36	99,634.50	92,401.75	89,289.90	63,243.45	0.00
$\sum Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]	424,375.97						
$\sum Q_i$ [l/s]	0.00	79.81	99.63	92.40	89.29	63.24	0.00
$\sum Q_i$ [l/s]	424.38						

**Pendiente: 2% Caudal: 418.96 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$** 

Q [l/s]= 418.96		$V^3_{i,j} * A_{i,j} [m^5/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		14.60	14.40	13.80	13.10	12.40	11.80	11.60
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.013	0.016	0.014	0.017	0.012	0.00
0.50	1.09	0.00	0.010	0.014	0.011	0.013	0.010	0.00
1.00	2.09	0.00	0.024	0.033	0.029	0.032	0.021	0.00
1.00	3.09	0.00	0.026	0.035	0.030	0.035	0.023	0.00
1.00	4.09	0.00	0.026	0.035	0.031	0.034	0.024	0.00
1.00	5.09	0.00	0.026	0.035	0.033	0.034	0.024	0.00
1.00	6.09	0.00	0.025	0.035	0.033	0.034	0.023	0.00
1.00	7.09	0.00	0.025	0.034	0.033	0.034	0.024	0.00
1.00	8.09	0.00	0.025	0.034	0.033	0.034	0.099	0.00
1.00	9.09	0.00	0.025	0.033	0.148	0.131		0.00
		0.00	0.120	0.140				
		$\sum(V^3_{i,1} * A_{i,1})$	$\sum(V^3_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^3_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^3_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^3_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^3_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^3_{i,7} * A_{i,7})$
$V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		0.000	0.344	0.446	0.396	0.399	0.258	0.000
$\sum V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		1.844						
$\alpha [-]$		1.042						

Q [l/s]= 418.96		$V^2_{i,j} * A_{i,j} [m^4/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		14.60	14.40	13.80	13.10	12.40	11.80	11.60
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.007	0.009	0.008	0.009	0.007	0.00
0.50	1.09	0.00	0.005	0.007	0.006	0.007	0.005	0.00
1.00	2.09	0.00	0.011	0.016	0.014	0.015	0.011	0.00
1.00	3.09	0.00	0.012	0.016	0.015	0.016	0.011	0.00
1.00	4.09	0.00	0.012	0.016	0.015	0.016	0.012	0.00
1.00	5.09	0.00	0.012	0.016	0.016	0.016	0.012	0.00
1.00	6.09	0.00	0.012	0.016	0.016	0.016	0.011	0.00
1.00	7.09	0.00	0.012	0.016	0.016	0.016	0.011	0.00
1.00	8.09	0.00	0.012	0.016	0.016	0.016	0.048	0.00
1.00	9.09	0.00	0.012	0.016	0.070	0.061		0.00
		0.00	0.057	0.066				
		$\sum(V^2_{i,1} * A_{i,1})$	$\sum(V^2_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^2_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^2_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^2_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^2_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^2_{i,7} * A_{i,7})$
$V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.000	0.166	0.211	0.191	0.189	0.128	0.000
$\sum V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.884						
$\beta [-]$		1.020						

**Pendiente: 2% Caudal: 551.95 l/s Perfiles de Velocidad**



**Pendiente: 2% Caudal: 551.95 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 551.95															
Id. Perfil															
Calado [cm]															
Ax [cm]															
Carretera															
Aceras (Izda y Decha)															
Az [cm]	P <sub>h</sub> [cm]	Δz [cm]	P <sub>h</sub> [cm]	Δz [cm]	P <sub>h</sub> [cm]	P <sub>h</sub> [cm]	Velocidad V <sub>h</sub> [m/s]								
							I	II	III	IV	V	C	D		
0.20	0.00		-41.00	-30.75	-10.25	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00	170.25	190.75	201.00
0.78	0.59		0.00	0.00	0.00	0.00	2.08	1.89	1.97	1.84	1.96	0.00			
0.50	1.09		0.00	0.00	0.00	0.00	2.21	2.01	2.15	1.98	2.03	0.00			
1.00	2.09		0.00	0.00	0.00	0.00	2.31	2.19	2.28	2.12	2.13	0.00			
1.00	3.09		0.00	0.00	0.00	0.00	2.32	2.26	2.32	2.17	2.18	0.00			
1.00	4.09		0.00	0.00	0.00	0.00	2.31	2.30	2.33	2.20	2.20	0.00			
1.00	5.09		0.00	0.00	0.00	0.00	2.31	2.31	2.30	2.22	2.18	0.00			
1.00	6.09		0.00	0.00	0.00	0.00	2.31	2.32	2.31	2.24	2.18	0.00			
1.00	7.09		0.00	0.00	0.00	0.00	2.30	2.30	2.30	2.24	2.18	0.00			
1.00	8.09		0.00	0.00	0.00	0.00	2.29	2.30	2.29	2.24	2.18	0.00			
1.00	9.09		0.00	0.00	0.00	0.00	2.29	2.29	2.29	2.24	2.18	0.00			
1.00	10.09		0.00	0.00	0.00	0.00	2.29	2.29	2.29	2.24	2.18	0.00			
1.00	11.09		0.00	0.00	0.00	0.00	2.29	2.29	2.29	2.24	2.18	0.00			
1.00	12.09	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00						0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	13.09	0.78	0.59										1.64	1.64	0.00
1.00	14.09	0.50	1.09										1.74	1.74	0.00
1.00	15.09	1.00	2.09	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		1.74	1.74	0.00
1.00	16.09	1.00	3.09	0.78	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		1.74	1.74	0.00
1.00	17.09	1.00	4.09	0.50	1.09	0.00	1.49	1.48							
1.00	18.09	1.00	5.09	1.00	2.09	0.00	1.65	1.59							
						0.00	1.65	1.59							



Q [l/s]= 551.95										Área A <sub>ij</sub> [cm <sup>2</sup> ]												
Id. Perfil										A	B	-	I	II	III	IV	V	C	D	-		
Calado [cm]										2.00	2.00	2.00	17.10	16.90	16.30	15.60	14.90	14.30	2.00	2.00	-	
Ax [cm]										0.20	20.30	20.70	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	20.70	20.30	0.20	
Carretera																						
Acercas (Izda y Decha)																						
Az [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	0.04	5.46	7.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00	170.25	190.75	201.00		
0.20	0.00									0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16					
0.78	0.59									0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10					
0.50	1.09									0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20					
1.00	2.09									0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20					
1.00	3.09									0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20					
1.00	4.09									0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20					
1.00	5.09									0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20					
1.00	6.09									0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20					
1.00	7.09									0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20					
1.00	8.09									0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20					
1.00	9.09									0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20					
1.00	10.09									0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20					
1.00	11.09									1.50	199.56	234.85										
1.00	12.09			0.20	0.00																	
1.00	13.09			0.50	0.45																	
1.00	14.09			0.50	0.95																	
1.00	15.09			0.50	1.45																	
1.00	16.09			0.50	1.95			0.20	0.00	0.04	4.06	4.14										
1.00	17.09			0.50	2.45			0.50	0.45	0.10	10.15	10.35										
1.00	18.09			0.50	2.95			0.50	0.95	0.10	10.15	10.35										
1.00	18.09			0.50	2.95			0.50	1.45	0.16	16.24	16.56										
										ΣA <sub>i,1</sub>	ΣA <sub>i,2</sub>	ΣA <sub>i,3</sub>	ΣA <sub>i,4</sub>	ΣA <sub>i,5</sub>	ΣA <sub>i,6</sub>	ΣA <sub>i,7</sub>	ΣA <sub>i,8</sub>	ΣA <sub>i,9</sub>	ΣA <sub>i,10</sub>	ΣA <sub>i,11</sub>	ΣA <sub>i,12</sub>	ΣA <sub>i,13</sub>
										0.40	40.60	41.40	3.40	458.37	566.65	542.15	517.65	387.39	2.80	66.24	64.96	0.40
										A <sub>j</sub> [cm <sup>2</sup> ]												
										ΣA <sub>v=0</sub> [cm <sup>2</sup> ]												
										ΣA <sub>v=0</sub> [cm <sup>2</sup> ]												
										ΣA <sub>j</sub> [cm <sup>2</sup> ]												
										2,637.08												
										55.32												
										2,692.40												



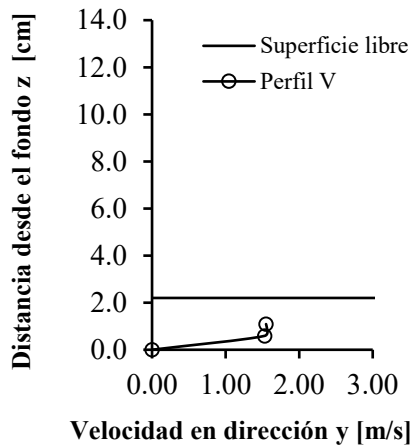
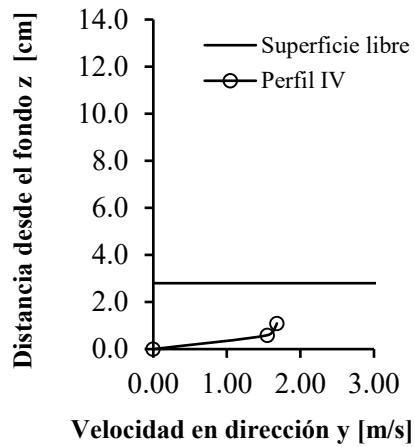
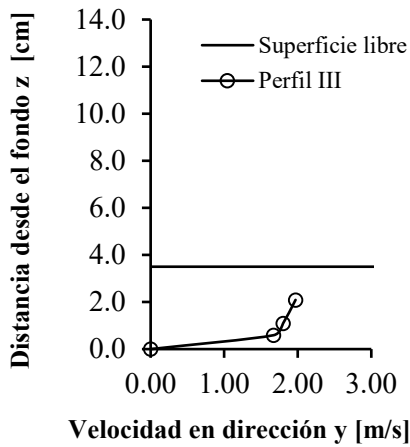
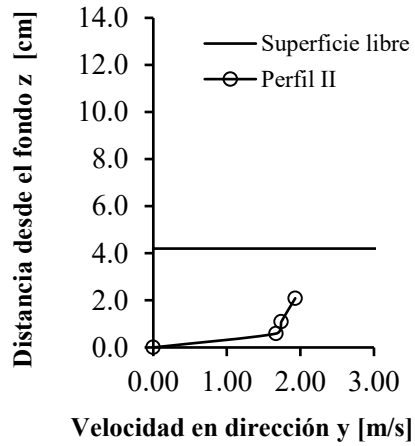
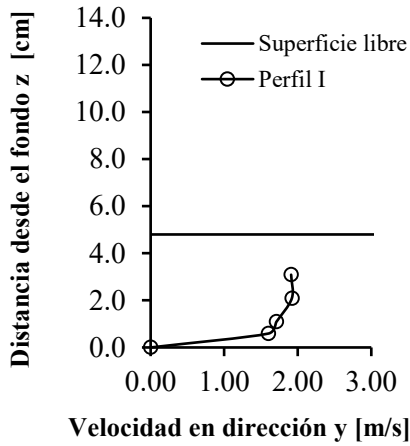
**Pendiente: 2% Caudal: 551.95 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$**

Carretera		V <sup>3</sup> * A <sub>y</sub> [m <sup>3</sup> /s <sup>3</sup> ]												V <sup>3</sup> * A <sub>y</sub> [m <sup>3</sup> /s <sup>3</sup> ]			
Az [cm]	P <sub>y</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>y</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>y</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>y</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>y</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>y</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>y</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>y</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>y</sub> [cm]
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	1.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.50	2.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	3.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	4.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	5.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	6.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	7.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	8.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	9.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	10.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	11.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	12.09	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	13.09	0.50	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	14.09	0.50	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	15.09	0.50	1.45	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	16.09	0.50	1.95	0.50	0.45	0.00	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
1.00	17.09	0.50	2.45	0.50	0.95	0.00	0.005	0.004	0.005	0.004	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
1.00	18.09	0.50	2.95	0.50	1.45	0.00	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
		$\Sigma(V^3 * A_y)$		$\Sigma(V^3 * A_y)$		$\Sigma(V^3 * A_y)$		$\Sigma(V^3 * A_y)$		$\Sigma(V^3 * A_y)$		$\Sigma(V^3 * A_y)$		$\Sigma(V^3 * A_y)$		$\Sigma(V^3 * A_y)$	
		0.000	0.015	0.014	0.000	0.541	0.648	0.633	0.542	0.386	0.000	0.032	0.031	0.000	0.000	0.000	0.000
		$\alpha [ ]$		1.061		1.061		1.061		1.061		1.061		1.061		1.061	

551.5

Q [l/s] = 551.95		V <sub>ij</sub> * A <sub>ij</sub> [m <sup>3</sup> /s <sup>3</sup> ]															
Id. Perfil		A	B	C	D	E	F	G	H	I	II	III	IV	V			
Cálculo [cm]		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	
As [cm]		20.30	20.70	20.70	20.70	20.70	20.70	20.70	20.70	20.70	20.70	20.70	20.70	20.70	20.30	2.00	
Carretera		-41.00	-30.75	-10.25	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00	160.00	170.25	190.75	201.00	201.00	
Az [cm]	P <sub>1</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>2</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>3</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>4</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>5</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>6</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>7</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>8</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>9</sub> [cm]
0.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	6.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	7.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	8.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	9.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	11.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	12.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	13.00	0.50	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	14.00	0.50	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	15.00	0.50	1.45	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	16.00	0.50	1.95	0.50	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	17.00	0.50	2.45	0.50	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	18.00	0.50	2.95	0.50	1.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Σ(V <sup>3</sup> * A <sub>1</sub> )	Σ(V <sup>3</sup> * A <sub>2</sub> )	Σ(V <sup>3</sup> * A <sub>3</sub> )	Σ(V <sup>3</sup> * A <sub>4</sub> )	Σ(V <sup>3</sup> * A <sub>5</sub> )	Σ(V <sup>3</sup> * A <sub>6</sub> )	Σ(V <sup>3</sup> * A <sub>7</sub> )	Σ(V <sup>3</sup> * A <sub>8</sub> )	Σ(V <sup>3</sup> * A <sub>9</sub> )	Σ(V <sup>3</sup> * A <sub>10</sub> )	Σ(V <sup>3</sup> * A <sub>11</sub> )	Σ(V <sup>3</sup> * A <sub>12</sub> )	Σ(V <sup>3</sup> * A <sub>13</sub> )	Σ(V <sup>3</sup> * A <sub>14</sub> )	Σ(V <sup>3</sup> * A <sub>15</sub> )	Σ(V <sup>3</sup> * A <sub>16</sub> )
		0.000	0.009	0.009	0.000	0.257	0.286	0.277	0.246	0.178	0.000	0.000	0.018	0.018	0.000	0.000	0.000
		β [-]															
		1.028															

**Pendiente: 4% Caudal: 106.60 l/s Perfiles de Velocidad**



**Pendiente: 4% Caudal: 106.60 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 106.60		Velocidad $V_{i,j}$ [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		5.10	4.90	4.30	3.60	2.90	2.30	2.10
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	1.60	1.67	1.67	1.55	1.53	0.00
1.00	1.59	0.00	1.71	1.74	1.80	1.68	1.55	0.00
1.00	2.59	0.00	1.92	1.93	1.97	1.68	1.55	0.00
1.00	3.59	0.00	1.91	1.93	1.97			
		0.00	1.91					

Q [l/s]= 106.60		Área $A_{i,j}$ [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		5.10	4.90	4.30	3.60	2.90	2.30	2.10
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
1.00	1.59	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	2.59	0.20	27.30	35.00	35.00	28.35	5.73	0.00
1.00	3.59	0.20	27.30	42.35	17.85			
		0.20	22.11					
		$\sum A_{i,1}$	$\sum A_{i,2}$	$\sum A_{i,3}$	$\sum A_{i,4}$	$\sum A_{i,5}$	$\sum A_{i,6}$	$\sum A_{i,7}$
$A_j$ [cm <sup>2</sup> ]		1.00	130.77	146.65	122.15	97.65	59.79	0.40
$\sum A_{v \neq 0}$ [cm <sup>2</sup> ]					525.08			
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]					33.316			
$\sum A_j$ [cm <sup>2</sup> ]					558.4			

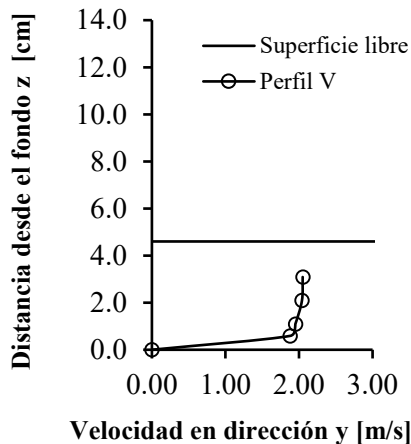
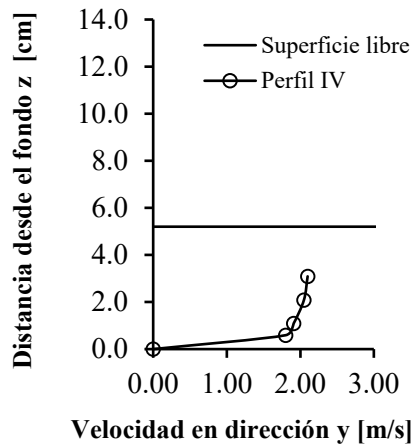
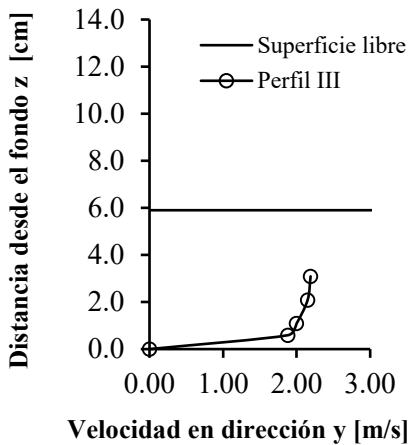
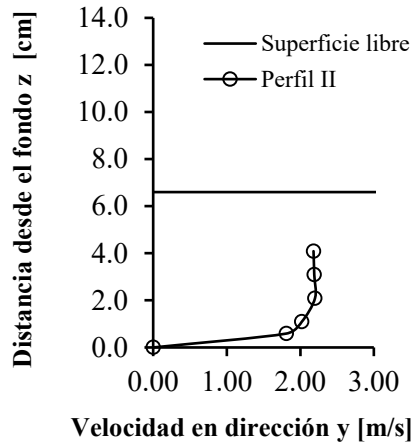
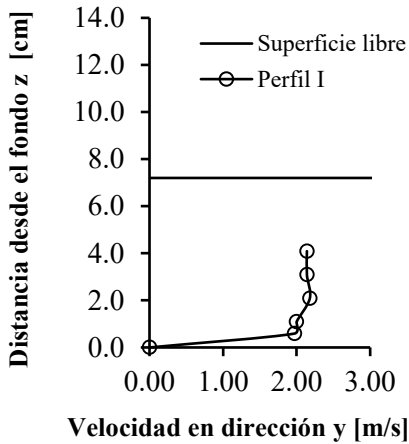
Q [l/s]= 106.60		Caudal $Q_{i,j}$ [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		5.10	4.90	4.30	3.60	2.90	2.30	2.10
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	3,407.04	4,559.10	4,559.10	4,231.50	3,257.98	0.00
1.00	1.59	0.00	4,668.30	6,090.00	6,300.00	5,880.00	4,231.50	0.00
1.00	2.59	0.00	5,241.60	6,755.00	6,895.00	4,762.80	888.62	0.00
1.00	3.59	0.00	5,214.30	8,173.55	3,516.45			
		0.00	4,223.58					
		$\sum Q_{i,1}$	$\sum Q_{i,2}$	$\sum Q_{i,3}$	$\sum Q_{i,4}$	$\sum Q_{i,5}$	$\sum Q_{i,6}$	$\sum Q_{i,7}$
$Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]		0.00	22,754.82	25,577.65	21,270.55	14,874.30	8,378.10	0.00
$\sum Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]					92,855.42			
		$\sum Q_{i,1}$	$\sum Q_{i,2}$	$\sum Q_{i,3}$	$\sum Q_{i,4}$	$\sum Q_{i,5}$	$\sum Q_{i,6}$	$\sum Q_{i,7}$
$Q_j$ [l/s]		0.00	22.75	25.58	21.27	14.87	8.38	0.00
$\sum Q_j$ [l/s]					92.86			

**Pendiente: 4% Caudal: 106.60 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$**

Q [l/s]= 106.60		V <sup>3</sup> <sub>ij</sub> * A <sub>ij</sub> [m <sup>5</sup> /s <sup>3</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.20	6.00	5.40	4.70	4.00	3.40	3.20
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0087	0.0127	0.0127	0.0102	0.0076	0.00
1.00	1.59	0.00	0.0137	0.0184	0.0204	0.0166	0.0102	0.00
1.00	2.59	0.00	0.0193	0.0252	0.0268	0.0134	0.0021	0.00
1.00	3.59	0.00	0.0190	0.0304	0.0136			
		0.00	0.0154					
		$\Sigma(V^3_{i,1} * A_{i,1})$	$\Sigma(V^3_{i,2} * A_{i,2})$	$\Sigma(V^3_{i,3} * A_{i,3})$	$\Sigma(V^3_{i,4} * A_{i,4})$	$\Sigma(V^3_{i,5} * A_{i,5})$	$\Sigma(V^3_{i,6} * A_{i,6})$	$\Sigma(V^3_{i,7} * A_{i,7})$
V <sup>3</sup> <sub>j</sub> * A <sub>j</sub> [m <sup>5</sup> /s <sup>3</sup> ]		0.000	0.076	0.087	0.074	0.040	0.020	0.000
$\Sigma V^3_j * A_j$ [m <sup>5</sup> /s <sup>3</sup> ]		0.297						
$\alpha$ [-]		1.155						

Q [l/s]= 106.60		V <sup>2</sup> <sub>ij</sub> * A <sub>ij</sub> [m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.20	6.00	5.40	4.70	4.00	3.40	3.20
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0055	0.0076	0.0076	0.0066	0.0050	0.00
1.00	1.59	0.00	0.0080	0.0106	0.0113	0.0099	0.0066	0.00
1.00	2.59	0.00	0.0101	0.0130	0.0136	0.0080	0.0014	0.00
1.00	3.59	0.00	0.0100	0.0158	0.0069			
		0.00	0.0081					
		$\Sigma(V^2_{i,1} * A_{i,1})$	$\Sigma(V^2_{i,2} * A_{i,2})$	$\Sigma(V^2_{i,3} * A_{i,3})$	$\Sigma(V^2_{i,4} * A_{i,4})$	$\Sigma(V^2_{i,5} * A_{i,5})$	$\Sigma(V^2_{i,6} * A_{i,6})$	$\Sigma(V^2_{i,7} * A_{i,7})$
V <sup>2</sup> <sub>j</sub> * A <sub>j</sub> [m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> ]		0.000	0.042	0.047	0.039	0.024	0.013	0.000
$\Sigma V^2_j * A_j$ [m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> ]		0.165						
$\beta$ [-]		1.071						

**Pendiente: 4% Caudal: 195.39 l/s Perfiles de Velocidad**





**Pendiente: 4% Caudal: 195.39 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 195.39		Velocidad $V_{i,j}$ [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		7.40	7.20	6.60	5.90	5.20	4.60	4.40
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	1.97	1.81	1.88	1.80	1.88	0.00
0.50	1.09	0.00	2.00	2.02	2.00	1.91	1.95	0.00
1.00	2.09	0.00	2.18	2.20	2.15	2.05	2.04	0.00
1.00	3.09	0.00	2.14	2.19	2.19	2.10	2.05	
1.00	4.09	0.00	2.14	2.18	2.19	2.10	2.05	
		0.00	2.14	2.18				

Q [l/s]= 195.39		Área $A_{i,j}$ [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		7.40	7.20	6.60	5.90	5.20	4.60	4.40
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.61
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	80.85	56.35	27.57	
		0.56	71.25	70.35				
		$\sum A_{i,1}$	$\sum A_{i,2}$	$\sum A_{i,3}$	$\sum A_{i,4}$	$\sum A_{i,5}$	$\sum A_{i,6}$	$\sum A_{i,7}$
$A_j$ [cm <sup>2</sup> ]		1.46	193.56	227.15	202.65	178.15	122.58	0.91
$\sum A_{v \neq 0}$ [cm <sup>2</sup> ]					892.16			
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]					34.286			
$\sum A_j$ [cm <sup>2</sup> ]					926.45			

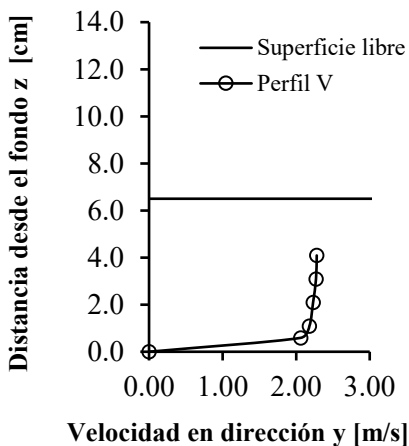
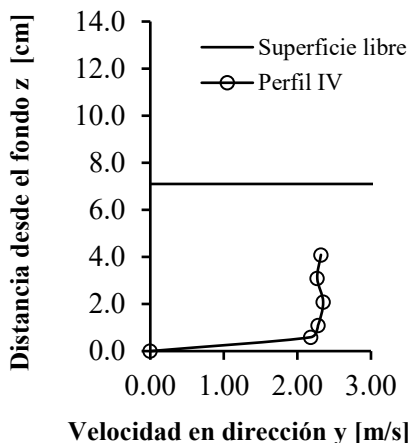
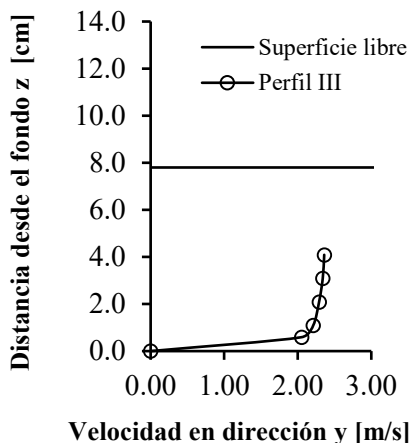
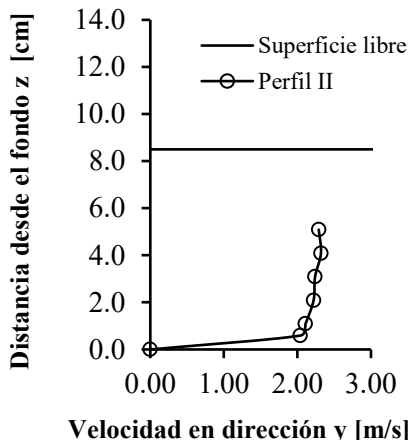
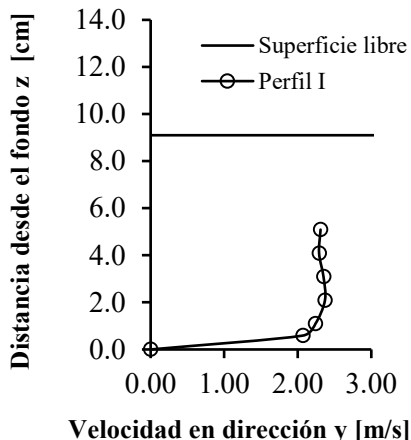
Q [l/s]= 195.39		Caudal $Q_{i,j}$ [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		7.40	7.20	6.60	5.90	5.20	4.60	4.40
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	4,194.92	4,941.30	5,132.40	4,914.00	4,003.27	0.00
0.50	1.09	0.00	2,730.00	3,535.00	3,500.00	3,342.50	2,661.75	0.00
1.00	2.09	0.00	5,951.40	7,700.00	7,525.00	7,175.00	5,569.20	0.00
1.00	3.09	0.00	5,842.20	7,665.00	7,665.00	7,350.00	5,596.50	
1.00	4.09	0.00	5,842.20	7,630.00	17,706.15	11,833.50	5,652.47	
		0.00	15,248.14	15,336.30				
		$\sum Q_{i,1}$	$\sum Q_{i,2}$	$\sum Q_{i,3}$	$\sum Q_{i,4}$	$\sum Q_{i,5}$	$\sum Q_{i,6}$	$\sum Q_{i,7}$
$Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]		0.00	39,808.86	46,807.60	41,528.55	34,615.00	23,483.19	0.00
$\sum Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]					186,243.20			
		$\sum Q_{i,1}$	$\sum Q_{i,2}$	$\sum Q_{i,3}$	$\sum Q_{i,4}$	$\sum Q_{i,5}$	$\sum Q_{i,6}$	$\sum Q_{i,7}$
$Q_j$ [l/s]		0.00	39.81	46.81	41.53	34.62	23.48	0.00
$\sum Q_j$ [l/s]					186.24			

**Pendiente: 4% Caudal: 195.39 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$**

Q [l/s]= 195.39		V <sup>3</sup> <sub>i,j</sub> * A <sub>i,j</sub> [m <sup>5</sup> /s <sup>3</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.20	6.00	5.40	4.70	4.00	3.40	3.20
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Δz [cm]	P <sub>i,j</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.016	0.016	0.018	0.016	0.014	0.00
0.50	1.09	0.00	0.011	0.014	0.014	0.012	0.010	0.00
1.00	2.09	0.00	0.028	0.037	0.035	0.030	0.023	0.00
1.00	3.09	0.00	0.027	0.037	0.037	0.032	0.024	
1.00	4.09	0.00	0.027	0.036	0.085	0.052		
		0.00	0.070	0.073				
Σ(V <sup>3</sup> <sub>i,1</sub> *A <sub>i,1</sub> )		0.000	0.179	0.214	0.189	0.143	0.071	0.000
ΣV <sup>3</sup> <sub>j</sub> *A <sub>j</sub> [m <sup>5</sup> /s <sup>3</sup> ]		0.795						
α [-]		1.056						

Q [l/s]= 195.39		V <sup>2</sup> <sub>i,j</sub> * A <sub>i,j</sub> [m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.20	6.00	5.40	4.70	4.00	3.40	3.20
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Δz [cm]	P <sub>i,j</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.008	0.009	0.010	0.009	0.008	0.00
0.50	1.09	0.00	0.005	0.007	0.007	0.006	0.005	0.00
1.00	2.09	0.00	0.013	0.017	0.016	0.015	0.011	0.00
1.00	3.09	0.00	0.013	0.017	0.017	0.015	0.011	
1.00	4.09	0.00	0.013	0.017	0.039	0.025		
		0.00	0.033	0.033				
Σ(V <sup>2</sup> <sub>i,1</sub> *A <sub>i,1</sub> )		0.000	0.084	0.100	0.088	0.070	0.036	0.000
ΣV <sup>2</sup> <sub>j</sub> *A <sub>j</sub> [m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> ]		0.378						
β [-]		1.011						

### Pendiente: 4% Caudal: 297.49 l/s Perfiles de Velocidad



**Pendiente: 4% Caudal: 297.49 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 297.49		Velocidad V <sub>i,j</sub> [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		8.50	8.30	7.70	7.00	6.30	5.70	5.50
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Δz [cm]	P <sub>i,j</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	2.07	2.04	2.05	2.18	2.06	0.00
0.50	1.09	0.00	2.24	2.11	2.21	2.28	2.18	0.00
1.00	2.09	0.00	2.37	2.22	2.29	2.35	2.23	0.00
1.00	3.09	0.00	2.35	2.24	2.34	2.27	2.27	0.00
1.00	4.09	0.00	2.29	2.32	2.36	2.32	2.28	0.00
1.00	5.09	0.00	2.31	2.29	2.36	2.32	2.28	0.00
		0.00	2.31	2.29				

Q [l/s]= 297.49		Área A <sub>i,j</sub> [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		8.50	8.30	7.70	7.00	6.30	5.70	5.50
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Δz [cm]	P <sub>i,j</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	35.00	94.85	57.60	0.20
1.00	5.09	0.20	27.30	108.85	84.35	59.85	30.30	0.18
		0.58	73.98	73.85				

ΣA <sub>i,1</sub>	ΣA <sub>i,2</sub>	ΣA <sub>i,3</sub>	ΣA <sub>i,4</sub>	ΣA <sub>i,5</sub>	ΣA <sub>i,6</sub>	ΣA <sub>i,7</sub>	
A <sub>j</sub> [cm <sup>2</sup> ]	1.68	223.59	339.50	241.15	276.50	182.91	1.08
ΣA <sub>v&gt;0</sub> [cm <sup>2</sup> ]	1231.73						
ΣA <sub>v=0</sub> [cm <sup>2</sup> ]	34.676						
ΣA <sub>j</sub> [cm <sup>2</sup> ]	1266.403						

Q [l/s]= 297.49		Caudal Q <sub>i,j</sub> [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		8.50	8.30	7.70	7.00	6.30	5.70	5.50
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Δz [cm]	P <sub>i,j</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	4,407.86	5,569.20	5,596.50	5,951.40	4,386.56	0.00
0.50	1.09	0.00	3,057.60	3,692.50	3,867.50	3,990.00	2,975.70	0.00
1.00	2.09	0.00	6,470.10	7,770.00	8,015.00	8,225.00	6,087.90	0.00
1.00	3.09	0.00	6,415.50	7,840.00	8,190.00	7,945.00	6,197.10	0.00
1.00	4.09	0.00	6,251.70	8,120.00	8,260.00	22,005.20	13,133.48	0.00
1.00	5.09	0.00	6,306.30	24,926.65	19,906.60	13,885.20	6,909.08	0.00
		0.00	17,090.07	16,911.65				

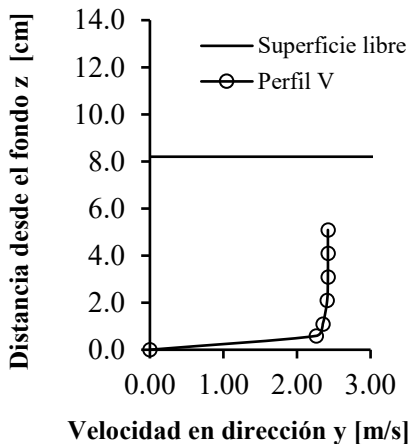
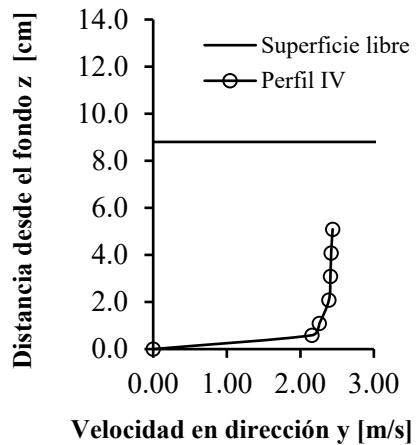
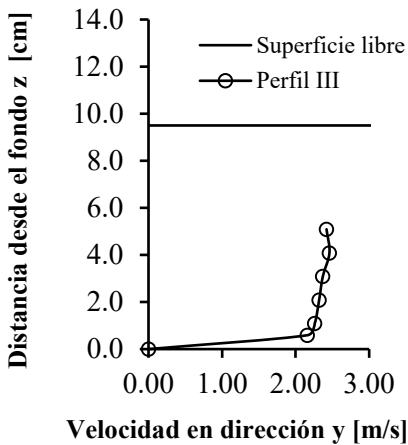
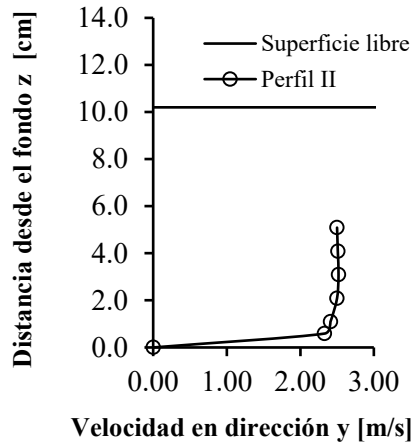
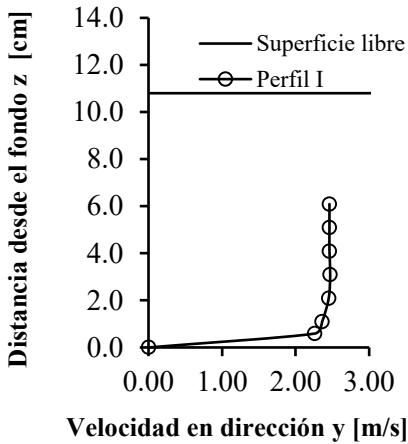
ΣQ <sub>i,1</sub>	ΣQ <sub>i,2</sub>	ΣQ <sub>i,3</sub>	ΣQ <sub>i,4</sub>	ΣQ <sub>i,5</sub>	ΣQ <sub>i,6</sub>	ΣQ <sub>i,7</sub>	
Q <sub>j</sub> [cm <sup>3</sup> /s]	0.00	49,999.13	74,830.00	53,835.60	62,001.80	39,689.83	0.00
ΣQ <sub>j</sub> [cm <sup>3</sup> /s]	280,356.36						
ΣQ <sub>i,1</sub>	ΣQ <sub>i,2</sub>	ΣQ <sub>i,3</sub>	ΣQ <sub>i,4</sub>	ΣQ <sub>i,5</sub>	ΣQ <sub>i,6</sub>	ΣQ <sub>i,7</sub>	
Q <sub>j</sub> [l/s]	0.00	50.00	74.83	53.84	62.00	39.69	0.00
ΣQ <sub>j</sub> [l/s]	280.36						

## Pendiente: 4% Caudal: 297.49 l/s Determinación de $\alpha$ y $\beta$

Q [l/s]= 297.49		$V^3_{i,j} * A_{i,j} [m^5/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		8.50	8.30	7.70	7.00	6.30	5.70	5.50
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.019	0.023	0.024	0.028	0.019	0.00
0.50	1.09	0.00	0.015	0.016	0.019	0.021	0.014	0.00
1.00	2.09	0.00	0.036	0.038	0.042	0.045	0.030	0.00
1.00	3.09	0.00	0.035	0.039	0.045	0.041	0.032	0.00
1.00	4.09	0.00	0.033	0.044	0.046	0.118	0.068	0.00
1.00	5.09	0.00	0.034	0.131	0.111	0.075	0.036	0.00
		0.00	0.091	0.089				
$V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		0.000	0.264	0.380	0.286	0.329	0.199	0.000
$\sum V^3_j * A_j [m^5/s^3]$					1.458			
$\alpha [-]$					1.061			

Q [l/s]= 297.49		$V^2_{i,j} * A_{i,j} [m^4/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		8.5	8.3	7.7	7	6.3	5.7	5.5
$\Delta x$ [cm]		0.2	27.3	35	35	35	27.3	0.2
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.2	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.009	0.011	0.011	0.013	0.009	0.00
0.5	1.09	0.00	0.007	0.008	0.009	0.009	0.006	0.00
1	2.09	0.00	0.015	0.017	0.018	0.019	0.014	0.00
1	3.09	0.00	0.015	0.018	0.019	0.018	0.014	0.00
1	4.09	0.00	0.014	0.019	0.019	0.051	0.030	0.00
1	5.09	0.00	0.015	0.057	0.047	0.032	0.016	0.00
		0.00	0.039	0.039				
$V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.000	0.115	0.169	0.124	0.143	0.089	0.000
$\sum V^2_j * A_j [m^4/s^3]$					0.639			
$\beta [-]$					1.029			

**Pendiente: 4% Caudal: 384.43 l/s Perfiles de Velocidad**



**Pendiente: 4% Caudal: 384.43 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 384.43		Velocidad $V_{ij}$ [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		11.00	10.80	10.20	9.50	8.80	8.20	8.00
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	2.26	2.33	2.16	2.16	2.26	0.00
0.50	1.09	0.00	2.36	2.41	2.26	2.26	2.35	0.00
1.00	2.09	0.00	2.45	2.50	2.32	2.39	2.41	0.00
1.00	3.09	0.00	2.47	2.52	2.37	2.41	2.42	0.00
1.00	4.09	0.00	2.46	2.51	2.46	2.42	2.42	0.00
1.00	5.09	0.00	2.46	2.50	2.42	2.44	2.42	0.00
1.00	6.09	0.00	2.46	2.50	2.42	2.44	2.42	0.00
		0.00	2.46	2.46				

Q [l/s]= 384.43		Área $A_{ij}$ [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		11.00	10.80	10.20	9.50	8.80	8.20	8.00
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	5.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.68
1.00	6.09	0.20	27.30	161.35	136.85	112.35	71.25	0.88
		0.88	114.93					
		$\sum A_{i,1}$	$\sum A_{i,2}$	$\sum A_{i,3}$	$\sum A_{i,4}$	$\sum A_{i,5}$	$\sum A_{i,6}$	$\sum A_{i,7}$
$A_j$ [cm <sup>2</sup> ]		2.18	291.84	353.15	328.65	304.15	220.86	1.58
$\sum A_{v \neq 0}$ [cm <sup>2</sup> ]		1466.72						
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]		35.676						
$\sum A_j$ [cm <sup>2</sup> ]		1502.4						

Q [l/s]= 384.43		Caudal $Q_{ij}$ [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		11.00	10.80	10.20	9.50	8.80	8.20	8.00
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	4,812.44	6,360.90	5,896.80	5,896.80	4,812.44	0.00
0.50	1.09	0.00	3,221.40	4,217.50	3,955.00	3,955.00	3,207.75	0.00
1.00	2.09	0.00	6,688.50	8,750.00	8,120.00	8,365.00	6,579.30	0.00
1.00	3.09	0.00	6,743.10	8,820.00	8,295.00	8,435.00	6,606.60	0.00
1.00	4.09	0.00	6,715.80	8,785.00	8,610.00	8,470.00	6,606.60	0.00
1.00	5.09	0.00	6,715.80	8,750.00	8,470.00	8,540.00	6,606.60	0.00
1.00	6.09	0.00	6,715.80	40,337.50	33,117.70	27,413.40	17,243.23	0.00
		0.00	28,273.52					
		$\sum Q_{i,1}$	$\sum Q_{i,2}$	$\sum Q_{i,3}$	$\sum Q_{i,4}$	$\sum Q_{i,5}$	$\sum Q_{i,6}$	$\sum Q_{i,7}$
$Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]		0.00	69,886.36	86,020.90	76,464.50	71,075.20	51,662.52	0.00
$\sum Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]		355,109.48						
		$\sum Q_{i,1}$	$\sum Q_{i,2}$	$\sum Q_{i,3}$	$\sum Q_{i,4}$	$\sum Q_{i,5}$	$\sum Q_{i,6}$	$\sum Q_{i,7}$
$Q_i$ [l/s]		0.00	69.89	86.02	76.46	71.08	51.66	0.00
$\sum Q_j$ [l/s]		355.11						

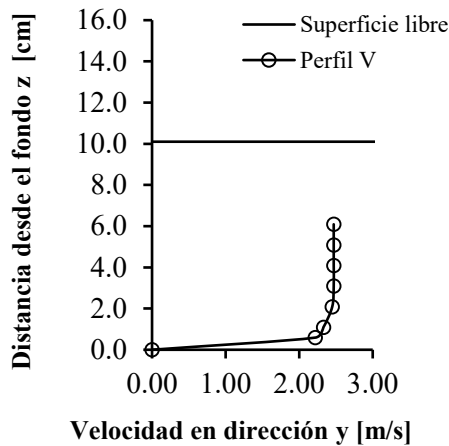
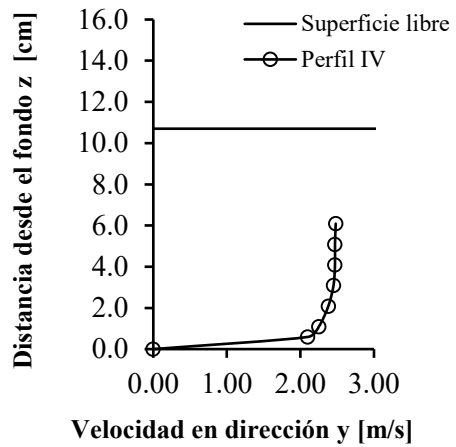
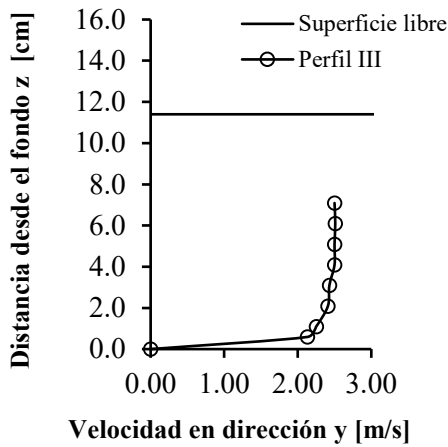
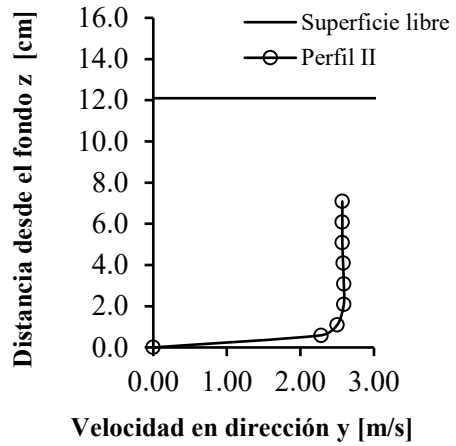
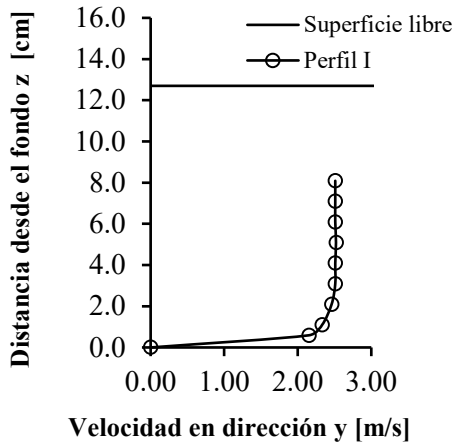
**Pendiente: 4% Caudal: 384.43 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$** 

Q [l/s]= 384.43		$V^3_{i,j} * A_{i,j} [m^5/s^3]$							
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-	
Calado [cm]		11.00	10.80	10.20	9.50	8.80	8.20	8.00	
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20	
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160	
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.78	0.59	0.00	0.0246	0.0345	0.0275	0.0275	0.0246	0.00	
0.50	1.09	0.00	0.0179	0.0245	0.0202	0.0202	0.0177	0.00	
1.00	2.09	0.00	0.0401	0.0547	0.0437	0.0478	0.0382	0.00	
1.00	3.09	0.00	0.0411	0.0560	0.0466	0.0490	0.0387	0.00	
1.00	4.09	0.00	0.0406	0.0553	0.0521	0.0496	0.0387	0.00	
1.00	5.09	0.00	0.0406	0.0547	0.0496	0.0508	0.0387	0.00	
1.00	6.09	0.00	0.0406	0.2521	0.1940	0.1632	0.1010	0.00	
		0.00	0.1711						
		$\sum(V^3_{i,1}*A_{i,1})$	$\sum(V^3_{i,2}*A_{i,2})$	$\sum(V^3_{i,3}*A_{i,3})$	$\sum(V^3_{i,4}*A_{i,4})$	$\sum(V^3_{i,5}*A_{i,5})$	$\sum(V^3_{i,6}*A_{i,6})$	$\sum(V^3_{i,7}*A_{i,7})$	
$V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		0.000	0.417	0.532	0.434	0.408	0.298	0.000	
$\sum V^3_j * A_j [m^5/s^3]$							2.088		
$\alpha [-]$							1.053		

Q [l/s]= 384.43		$V^2_{i,j} * A_{i,j} [m^4/s^3]$							
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-	
Calado [cm]		11.00	10.80	10.20	9.50	8.80	8.20	8.00	
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20	
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160	
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.78	0.59	0.00	0.0109	0.0148	0.0127	0.0127	0.0109	0.00	
0.50	1.09	0.00	0.0076	0.0102	0.0089	0.0089	0.0075	0.00	
1.00	2.09	0.00	0.0164	0.0219	0.0188	0.0200	0.0159	0.00	
1.00	3.09	0.00	0.0167	0.0222	0.0197	0.0203	0.0160	0.00	
1.00	4.09	0.00	0.0165	0.0221	0.0212	0.0205	0.0160	0.00	
1.00	5.09	0.00	0.0165	0.0219	0.0205	0.0208	0.0160	0.00	
1.00	6.09	0.00	0.0165	0.1008	0.0801	0.0669	0.0417	0.00	
		0.00	0.0696						
		$\sum(V^2_{i,1}*A_{i,1})$	$\sum(V^2_{i,2}*A_{i,2})$	$\sum(V^2_{i,3}*A_{i,3})$	$\sum(V^2_{i,4}*A_{i,4})$	$\sum(V^2_{i,5}*A_{i,5})$	$\sum(V^2_{i,6}*A_{i,6})$	$\sum(V^2_{i,7}*A_{i,7})$	
$V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.000	0.171	0.214	0.182	0.170	0.124	0.000	
$\sum V^2_j * A_j [m^4/s^3]$							0.861		
$\beta [-]$							1.025		



**Pendiente: 4% Caudal: 450.75 l/s Perfiles de Velocidad**



**Pendiente: 4% Caudal: 450.75 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 450.75		Velocidad V <sub>ij</sub> [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		12.90	12.70	12.10	11.40	10.70	10.10	9.90
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Δz [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	2.15	2.28	2.13	2.10	2.22	0.00
0.50	1.09	0.00	2.33	2.50	2.25	2.25	2.33	0.00
1.00	2.09	0.00	2.46	2.59	2.41	2.38	2.45	0.00
1.00	3.09	0.00	2.51	2.59	2.43	2.45	2.47	0.00
1.00	4.09	0.00	2.51	2.58	2.50	2.47	2.47	0.00
1.00	5.09	0.00	2.52	2.57	2.50	2.47	2.47	0.00
1.00	6.09	0.00	2.51	2.57	2.51	2.48	2.47	0.00
1.00	7.09	0.00	2.51	2.57	2.50	2.48	2.47	0.00
1.00	8.09	0.00	2.51	2.57	2.50			
		0.00	2.51					

Q [l/s]= 450.75		Área A <sub>ij</sub> [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		12.90	12.70	12.10	11.40	10.70	10.10	9.90
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Δz [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	5.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	6.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	7.09	0.20	27.30	35.00	35.00	143.85	95.82	0.66
1.00	8.09	0.20	27.30	157.85	133.35			
		0.86	112.20					
		ΣA <sub>i,1</sub>	ΣA <sub>i,2</sub>	ΣA <sub>i,3</sub>	ΣA <sub>i,4</sub>	ΣA <sub>i,5</sub>	ΣA <sub>i,6</sub>	ΣA <sub>i,7</sub>
A <sub>j</sub> [cm <sup>2</sup> ]		2.56	343.71	419.65	395.15	370.65	272.73	1.96
ΣA <sub>v=0</sub> [cm <sup>2</sup> ]					1769.96			
ΣA <sub>v=0</sub> [cm <sup>2</sup> ]					36.436			
ΣA <sub>j</sub> [cm <sup>2</sup> ]					1806.4			

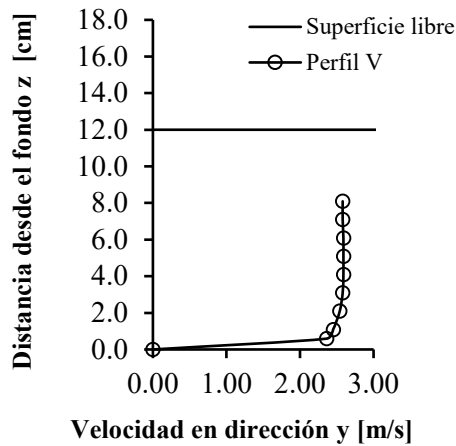
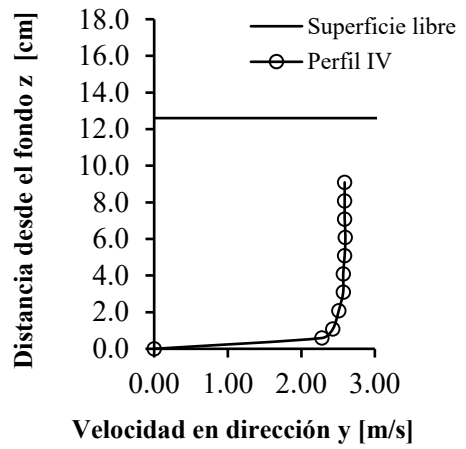
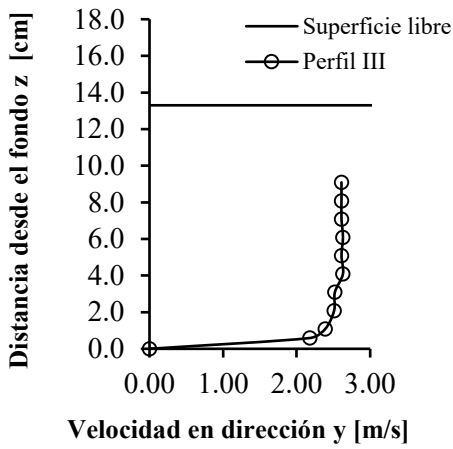
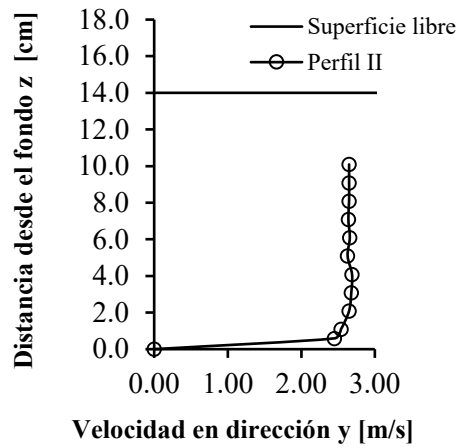
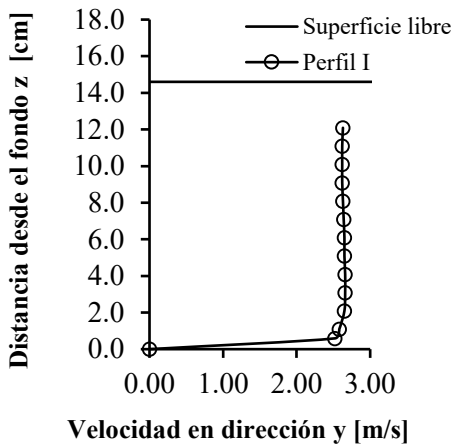
Q [l/s]= 450.75		Caudal Q <sub>ij</sub> [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		12.90	12.70	12.10	11.40	10.70	10.10	9.90
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Δz [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	4,578.21	6,224.40	5,814.90	5,733.00	4,727.27	0.00
0.50	1.09	0.00	3,180.45	4,375.00	3,937.50	3,937.50	3,180.45	0.00
1.00	2.09	0.00	6,715.80	9,065.00	8,435.00	8,330.00	6,688.50	0.00
1.00	3.09	0.00	6,852.30	9,065.00	8,505.00	8,575.00	6,743.10	0.00
1.00	4.09	0.00	6,852.30	9,030.00	8,750.00	8,645.00	6,743.10	0.00
1.00	5.09	0.00	6,879.60	8,995.00	8,750.00	8,645.00	6,743.10	0.00
1.00	6.09	0.00	6,852.30	8,995.00	8,785.00	8,680.00	6,743.10	0.00
1.00	7.09	0.00	6,852.30	8,995.00	8,750.00	35,674.80	23,668.28	0.00
1.00	8.09	0.00	6,852.30	40,567.45	33,337.50			
		0.00	28,162.95					
		ΣQ <sub>i,1</sub>	ΣQ <sub>i,2</sub>	ΣQ <sub>i,3</sub>	ΣQ <sub>i,4</sub>	ΣQ <sub>i,5</sub>	ΣQ <sub>i,6</sub>	ΣQ <sub>i,7</sub>
Q <sub>i</sub> [cm <sup>3</sup> /s]		0.00	83,778.51	105,311.85	95,064.90	88,220.30	65,236.90	0.00
ΣQ <sub>i</sub> [cm <sup>3</sup> /s]					437,612.46			
		ΣQ <sub>i,1</sub>	ΣQ <sub>i,2</sub>	ΣQ <sub>i,3</sub>	ΣQ <sub>i,4</sub>	ΣQ <sub>i,5</sub>	ΣQ <sub>i,6</sub>	ΣQ <sub>i,7</sub>
Q <sub>j</sub> [l/s]		0.00	83.78	105.31	95.06	88.22	65.24	0.00
ΣQ <sub>j</sub> [l/s]					437.61			

**Pendiente: 4% Caudal: 450.75 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$**

Q [l/s]= 450.75		$V^3_{i,j} * A_{i,j} [m^5/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		12.90	12.70	12.10	11.40	10.70	10.10	9.90
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.021	0.032	0.026	0.025	0.023	0.00
0.50	1.09	0.00	0.017	0.027	0.020	0.020	0.017	0.00
1.00	2.09	0.00	0.041	0.061	0.049	0.047	0.040	0.00
1.00	3.09	0.00	0.043	0.061	0.050	0.051	0.041	0.00
1.00	4.09	0.00	0.043	0.060	0.055	0.053	0.041	0.00
1.00	5.09	0.00	0.044	0.059	0.055	0.053	0.041	0.00
1.00	6.09	0.00	0.043	0.059	0.055	0.053	0.041	0.00
1.00	7.09	0.00	0.043	0.059	0.055	0.219	0.144	0.00
1.00	8.09	0.00	0.043	0.268	0.208			0.00
		0.00	0.177					
		$\Sigma(V^3_{i,1} * A_{i,1})$	$\Sigma(V^3_{i,2} * A_{i,2})$	$\Sigma(V^3_{i,3} * A_{i,3})$	$\Sigma(V^3_{i,4} * A_{i,4})$	$\Sigma(V^3_{i,5} * A_{i,5})$	$\Sigma(V^3_{i,6} * A_{i,6})$	$\Sigma(V^3_{i,7} * A_{i,7})$
$V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		0.000	0.516	0.688	0.573	0.522	0.390	0.000
$\Sigma V^3_j * A_j [m^5/s^3]$								2.689
$\alpha [-]$								1.047

Q [l/s]= 450.75		$V^2_{i,j} * A_{i,j} [m^4/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		12.90	12.70	12.10	11.40	10.70	10.10	9.90
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.010	0.014	0.012	0.012	0.010	0.00
0.50	1.09	0.00	0.007	0.011	0.009	0.009	0.007	0.00
1.00	2.09	0.00	0.017	0.023	0.020	0.020	0.016	0.00
1.00	3.09	0.00	0.017	0.023	0.021	0.021	0.017	0.00
1.00	4.09	0.00	0.017	0.023	0.022	0.021	0.017	0.00
1.00	5.09	0.00	0.017	0.023	0.022	0.021	0.017	0.00
1.00	6.09	0.00	0.017	0.023	0.022	0.022	0.017	0.00
1.00	7.09	0.00	0.017	0.023	0.022	0.088	0.058	0.00
1.00	8.09	0.00	0.017	0.104	0.083			0.00
		0.00	0.071					
		$\Sigma(V^2_{i,1} * A_{i,1})$	$\Sigma(V^2_{i,2} * A_{i,2})$	$\Sigma(V^2_{i,3} * A_{i,3})$	$\Sigma(V^2_{i,4} * A_{i,4})$	$\Sigma(V^2_{i,5} * A_{i,5})$	$\Sigma(V^2_{i,6} * A_{i,6})$	$\Sigma(V^2_{i,7} * A_{i,7})$
$V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.000	0.208	0.269	0.233	0.214	0.159	0.000
$\Sigma V^2_j * A_j [m^4/s^3]$								1.084
$\beta [-]$								1.022

**Pendiente: 4% Caudal: 550.55 l/s Perfiles de Velocidad**



**Pendiente: 4% Caudal: 550.55 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 550.55		Velocidad $V_{ij}$ [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		14.80	14.60	14.00	13.30	12.60	12.00	11.80
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	2.52	2.45	2.18	2.28	2.36	0.00
0.50	1.09	0.00	2.58	2.54	2.39	2.43	2.45	0.00
1.00	2.09	0.00	2.65	2.65	2.51	2.51	2.54	0.00
1.00	3.09	0.00	2.66	2.68	2.52	2.57	2.58	0.00
1.00	4.09	0.00	2.66	2.69	2.63	2.57	2.59	0.00
1.00	5.09	0.00	2.65	2.63	2.61	2.59	2.59	0.00
1.00	6.09	0.00	2.65	2.66	2.63	2.60	2.59	0.00
1.00	7.09	0.00	2.64	2.64	2.61	2.59	2.58	0.00
1.00	8.09	0.00	2.63	2.65	2.61	2.59	2.58	0.00
1.00	9.09	0.00	2.62	2.65	2.61	2.59	2.58	0.00
		0.00	2.62					

Q [l/s]= 550.55		Área $A_{ij}$ [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		14.80	14.60	14.00	13.30	12.60	12.00	11.80
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	5.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	6.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	7.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	8.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	120.39	0.84
1.00	9.09	0.20	27.30	189.35	164.85	140.35		
		1.04	136.77					
$\sum A_{i,1}$		2.94	395.58	486.15	461.65	437.15	324.60	2.34
$A_j$ [cm <sup>2</sup> ]								
$\sum A_{v \neq 0}$ [cm <sup>2</sup> ]					2,073.2			
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]					37.196			
$\sum A_j$ [cm <sup>2</sup> ]					2,110.4			

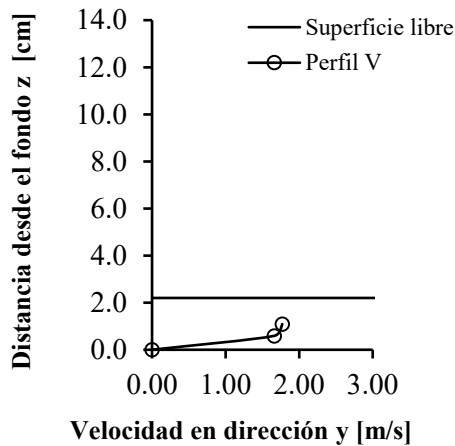
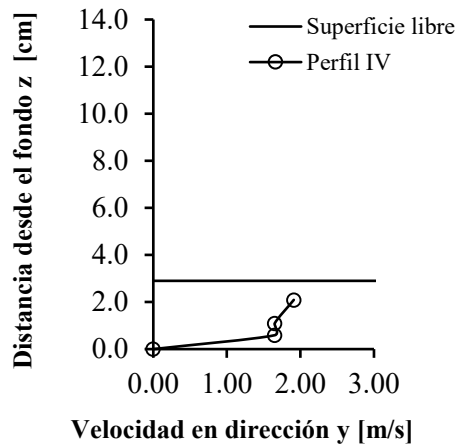
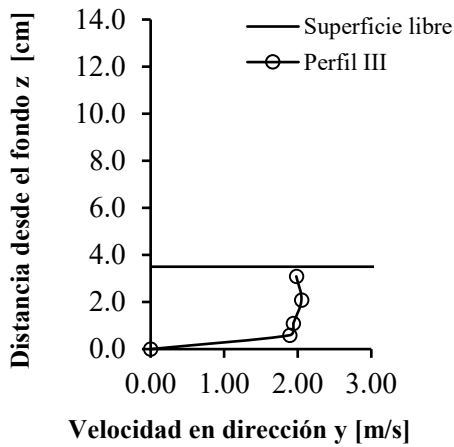
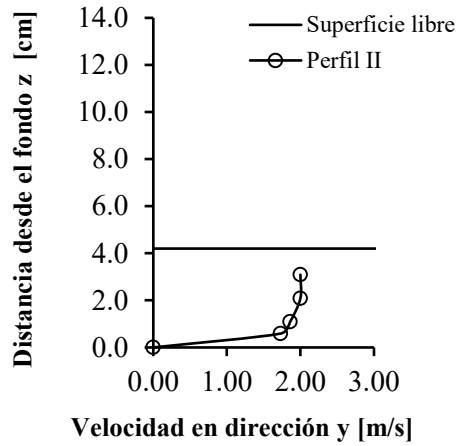
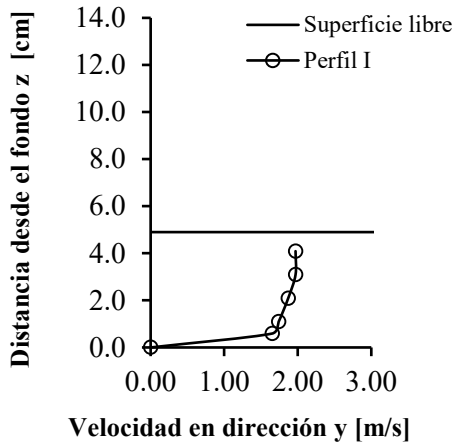
Q [l/s]= 550.55		Caudal $Q_{ij}$ [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		14.80	14.60	14.00	13.30	12.60	12.00	11.80
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	5,366.09	6,688.50	5,951.40	6,224.40	5,025.38	0.00
0.50	1.09	0.00	3,521.70	4,445.00	4,182.50	4,252.50	3,344.25	0.00
1.00	2.09	0.00	7,234.50	9,275.00	8,785.00	8,785.00	6,934.20	0.00
1.00	3.09	0.00	7,261.80	9,380.00	8,820.00	8,995.00	7,043.40	0.00
1.00	4.09	0.00	7,261.80	9,415.00	9,205.00	8,995.00	7,070.70	0.00
1.00	5.09	0.00	7,234.50	9,205.00	9,135.00	9,065.00	7,070.70	0.00
1.00	6.09	0.00	7,234.50	9,310.00	9,205.00	9,100.00	7,070.70	0.00
1.00	7.09	0.00	7,207.20	9,240.00	9,135.00	9,065.00	7,043.40	0.00
1.00	8.09	0.00	7,179.90	9,275.00	9,135.00	9,065.00	31,061.39	0.00
1.00	9.09	0.00	7,152.60	50,177.75	43,025.85	36,350.65		
		0.00	35,834.53					
$\sum Q_{i,1}$		0.00	102,489.11	126,411.25	116,579.75	109,897.55	81,664.13	0.00
$Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]					537,041.79			
$\sum Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]								
$\sum Q_{i,1}$		0.00	102.49	126.41	116.58	109.90	81.66	0.00
$Q_j$ [l/s]					537.04			
$\sum Q_j$ [l/s]								

**Pendiente: 4% Caudal: 550.55 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$** 

Q [l/s]= 550.55		$V^3_{ij} * A_{ij} [m^5/s^3]$							
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-	
Calado [cm]		14.80	14.60	14.00	13.30	12.60	12.00	11.80	
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20	
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160	
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.78	0.59	0.00	0.034	0.040	0.028	0.032	0.028	0.00	
0.50	1.09	0.00	0.023	0.029	0.024	0.025	0.020	0.00	
1.00	2.09	0.00	0.051	0.065	0.055	0.055	0.045	0.00	
1.00	3.09	0.00	0.051	0.067	0.056	0.059	0.047	0.00	
1.00	4.09	0.00	0.051	0.068	0.064	0.059	0.047	0.00	
1.00	5.09	0.00	0.051	0.064	0.062	0.061	0.047	0.00	
1.00	6.09	0.00	0.051	0.066	0.064	0.062	0.047	0.00	
1.00	7.09	0.00	0.050	0.064	0.062	0.061	0.047	0.00	
1.00	8.09	0.00	0.050	0.065	0.062	0.061	0.207	0.00	
1.00	9.09	0.00	0.049	0.352	0.293	0.244		0.00	
		0.00	0.246						
		$\sum(V^3_{i,1} * A_{i,1})$	$\sum(V^3_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^3_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^3_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^3_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^3_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^3_{i,7} * A_{i,7})$	
$V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		0.000	0.708	0.881	0.771	0.719	0.536	0.000	
$\sum V^3_j * A_j [m^5/s^3]$								3.614	
$\alpha [-]$								1.039	

Q [l/s]= 550.55		$V^2_{ij} * A_{ij} [m^4/s^3]$							
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-	
Calado [cm]		14.80	14.60	14.00	13.30	12.60	12.00	11.80	
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20	
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160	
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.78	0.59	0.00	0.014	0.016	0.013	0.014	0.012	0.00	
0.50	1.09	0.00	0.009	0.011	0.010	0.010	0.008	0.00	
1.00	2.09	0.00	0.019	0.025	0.022	0.022	0.018	0.00	
1.00	3.09	0.00	0.019	0.025	0.022	0.023	0.018	0.00	
1.00	4.09	0.00	0.019	0.025	0.024	0.023	0.018	0.00	
1.00	5.09	0.00	0.019	0.024	0.024	0.023	0.018	0.00	
1.00	6.09	0.00	0.019	0.025	0.024	0.024	0.018	0.00	
1.00	7.09	0.00	0.019	0.024	0.024	0.023	0.018	0.00	
1.00	8.09	0.00	0.019	0.025	0.024	0.023	0.080	0.00	
1.00	9.09	0.00	0.019	0.133	0.112	0.094		0.00	
		0.00	0.094						
		$\sum(V^2_{i,1} * A_{i,1})$	$\sum(V^2_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^2_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^2_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^2_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^2_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^2_{i,7} * A_{i,7})$	
$V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.000	0.269	0.334	0.299	0.281	0.209	0.000	
$\sum V^2_j * A_j [m^4/s^3]$								1.393	
$\beta [-]$								1.019	

**Pendiente: 6% Caudal: 102.17 l/s Perfiles de Velocidad**



**Pendiente: 6% Caudal: 102.17 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 102.17		Velocidad $V_{i,j}$ [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		5.10	4.90	4.20	3.50	2.90	2.20	2.00
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	1.65	1.73	1.89	1.65	1.66	0.00
0.50	1.09	0.00	1.74	1.86	1.94	1.65	1.77	0.00
1.00	2.09	0.00	1.87	2.00	2.05	1.91	1.77	0.00
1.00	3.09	0.00	1.97	2.00	2.05	1.91		
1.00	4.09	0.00	1.97	2.00				
		0.00	1.97					

Q [l/s]= 102.17		Área $A_{i,j}$ [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		5.10	4.90	4.20	3.50	2.90	2.20	2.00
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	23.48	0.13
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	31.85	10.85		
1.00	4.09	0.20	27.30	21.35				
		0.10	8.46					

$A_j$ [cm <sup>2</sup> ]	$\sum A_{i,1}$	$\sum A_{i,2}$	$\sum A_{i,3}$	$\sum A_{i,4}$	$\sum A_{i,5}$	$\sum A_{i,6}$	$\sum A_{i,7}$
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]	1.00	130.77	143.15	118.65	97.65	63.88	0.43
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]	522.18						
$\sum A_j$ [cm <sup>2</sup> ]	33.346						
$\sum A_j$ [cm <sup>2</sup> ]	555.525						

Q [l/s]= 102.17		Caudal $Q_{i,j}$ [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		5.10	4.90	4.20	3.50	2.90	2.20	2.00
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	3,513.51	4,722.90	5,159.70	4,504.50	3,534.80	0.00
0.50	1.09	0.00	2,375.10	3,255.00	3,395.00	2,887.50	2,416.05	0.00
1.00	2.09	0.00	5,105.10	7,000.00	7,175.00	6,685.00	4,155.61	0.00
1.00	3.09	0.00	5,378.10	7,000.00	6,529.25	2,072.35		
1.00	4.09	0.00	5,378.10	4,270.00				
		0.00	1,667.21					

$Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]	$\sum Q_{i,1}$	$\sum Q_{i,2}$	$\sum Q_{i,3}$	$\sum Q_{i,4}$	$\sum Q_{i,5}$	$\sum Q_{i,6}$	$\sum Q_{i,7}$
$\sum Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]	0.00	23,417.12	26,247.90	22,258.95	16,149.35	10,106.46	0.00
	98,179.78						
$Q_j$ [l/s]	$\sum Q_{i,1}$	$\sum Q_{i,2}$	$\sum Q_{i,3}$	$\sum Q_{i,4}$	$\sum Q_{i,5}$	$\sum Q_{i,6}$	$\sum Q_{i,7}$
$\sum Q_j$ [l/s]	0.00	23.42	26.25	22.26	16.15	10.11	0.00
	98.18						

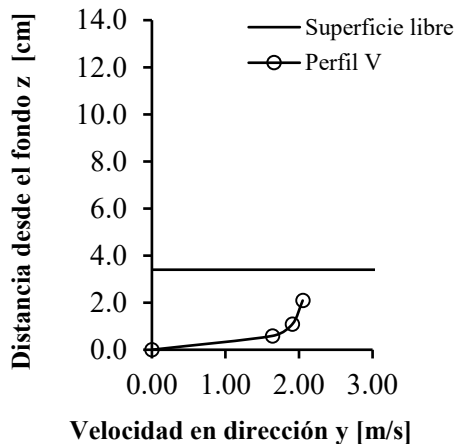
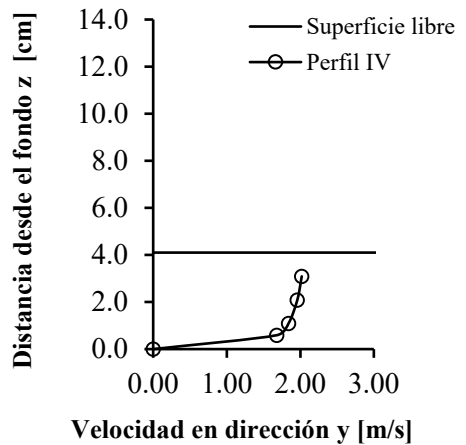
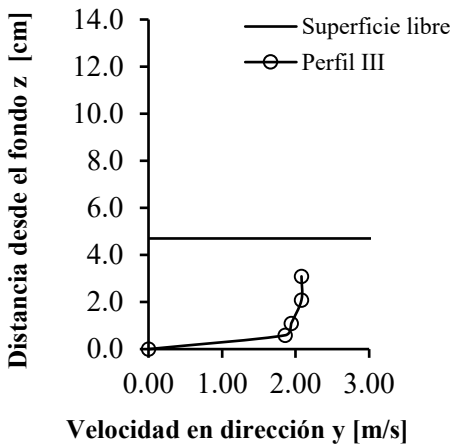
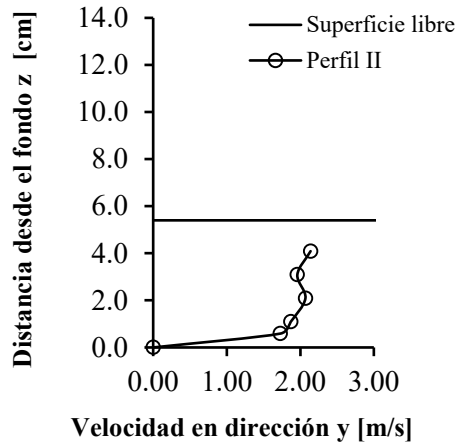
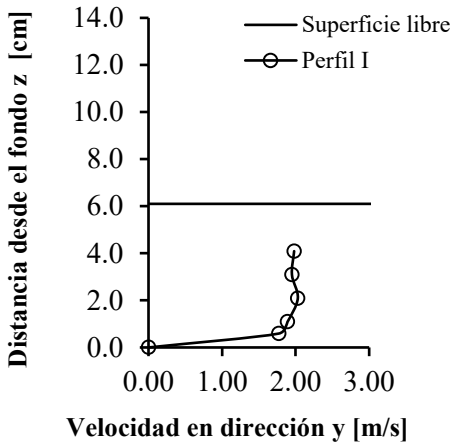


**Pendiente: 6% Caudal: 102.17 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$**

Q [l/s]= 102.17		$V^3_{i,j} * A_{i,j} [m^5/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.20	6.00	5.40	4.70	4.00	3.40	3.20
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.010	0.014	0.018	0.012	0.010	0.00
0.50	1.09	0.00	0.007	0.011	0.013	0.008	0.008	0.00
1.00	2.09	0.00	0.018	0.028	0.030	0.024	0.013	0.00
1.00	3.09	0.00	0.021	0.028	0.027	0.008		
1.00	4.09	0.00	0.021	0.017				
		0.00	0.006					
		$\Sigma(V^3_{i,1} * A_{i,1})$	$\Sigma(V^3_{i,2} * A_{i,2})$	$\Sigma(V^3_{i,3} * A_{i,3})$	$\Sigma(V^3_{i,4} * A_{i,4})$	$\Sigma(V^3_{i,5} * A_{i,5})$	$\Sigma(V^3_{i,6} * A_{i,6})$	$\Sigma(V^3_{i,7} * A_{i,7})$
$V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		0.000	0.083	0.098	0.089	0.052	0.030	0.000
$\Sigma V^3_j * A_j [m^5/s^3]$								0.353
$\alpha [-]$								1.149

Q [l/s]= 102.17		$V^2_{i,j} * A_{i,j} [m^4/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.20	6.00	5.40	4.70	4.00	3.40	3.20
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.006	0.008	0.010	0.007	0.006	0.00
0.50	1.09	0.00	0.004	0.006	0.007	0.005	0.004	0.00
1.00	2.09	0.00	0.010	0.014	0.015	0.013	0.007	0.00
1.00	3.09	0.00	0.011	0.014	0.013	0.004		
1.00	4.09	0.00	0.011	0.009				
		0.00	0.003					
		$\Sigma(V^2_{i,1} * A_{i,1})$	$\Sigma(V^2_{i,2} * A_{i,2})$	$\Sigma(V^2_{i,3} * A_{i,3})$	$\Sigma(V^2_{i,4} * A_{i,4})$	$\Sigma(V^2_{i,5} * A_{i,5})$	$\Sigma(V^2_{i,6} * A_{i,6})$	$\Sigma(V^2_{i,7} * A_{i,7})$
$V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.000	0.044	0.051	0.044	0.029	0.017	0.000
$\Sigma V^2_j * A_j [m^4/s^3]$								0.186
$\beta [-]$								1.069

**Pendiente: 6% Caudal: 154.08 l/s Perfiles de Velocidad**



**Pendiente: 6% Caudal: 154.08 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 154.08		Velocidad V <sub>ij</sub> [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.30	6.10	5.40	4.70	4.10	3.40	3.20
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Δz [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	1.77	1.73	1.86	1.68	1.64	0.00
0.50	1.09	0.00	1.89	1.87	1.94	1.84	1.91	0.00
1.00	2.09	0.00	2.03	2.07	2.08	1.96	2.05	0.00
1.00	3.09	0.00	1.95	1.96	2.08	2.02	2.05	0.00
1.00	4.09	0.00	1.98	2.14	2.08	2.02		
		0.00	1.98	2.14				

Q [l/s]= 154.08		Área A <sub>ij</sub> [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.30	6.10	5.40	4.70	4.10	3.40	3.20
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Δz [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	22.11	0.12
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	38.85	17.85		
		0.34	41.22	28.35				
		ΣA <sub>i,1</sub>	ΣA <sub>i,2</sub>	ΣA <sub>i,3</sub>	ΣA <sub>i,4</sub>	ΣA <sub>i,5</sub>	ΣA <sub>i,6</sub>	ΣA <sub>i,7</sub>
A <sub>j</sub> [cm <sup>2</sup> ]		1.24	163.53	185.15	160.65	139.65	89.82	0.62
ΣA <sub>v=0</sub> [cm <sup>2</sup> ]					706.87			
ΣA <sub>v=0</sub> [cm <sup>2</sup> ]					33.776			
ΣA <sub>j</sub> [cm <sup>2</sup> ]					740.65			

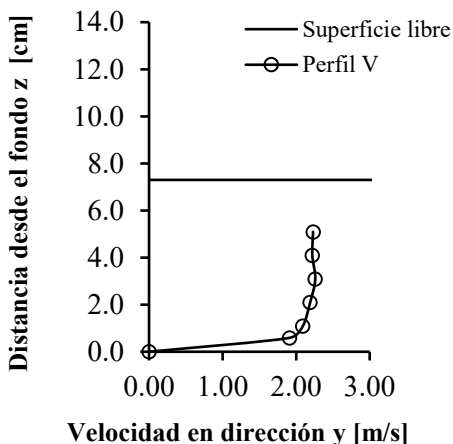
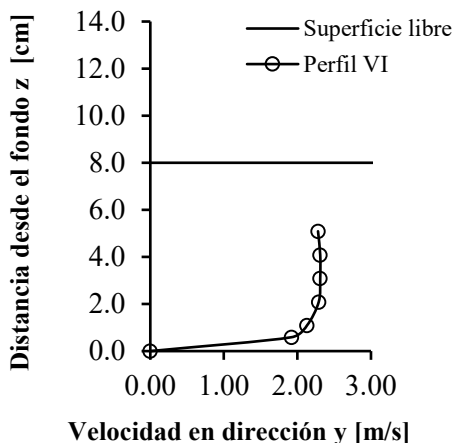
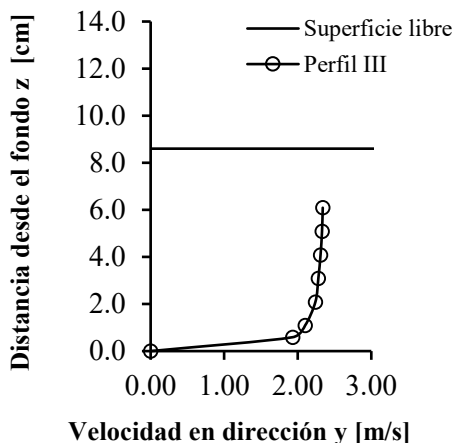
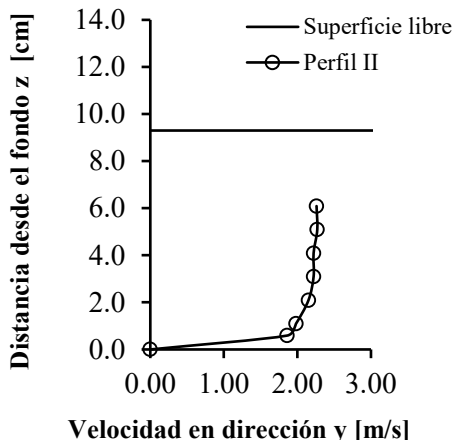
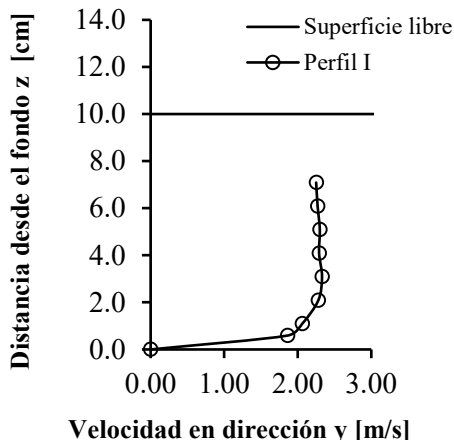
Q [l/s]= 154.08		Caudal Q <sub>ij</sub> [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.30	6.10	5.40	4.70	4.10	3.40	3.20
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Δz [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	3,769.04	4,722.90	5,077.80	4,586.40	3,492.22	0.00
0.50	1.09	0.00	2,579.85	3,272.50	3,395.00	3,220.00	2,607.15	0.00
1.00	2.09	0.00	5,541.90	7,245.00	7,280.00	6,860.00	5,596.50	0.00
1.00	3.09	0.00	5,323.50	6,860.00	7,280.00	7,070.00	4,533.17	0.00
1.00	4.09	0.00	5,405.40	7,490.00	8,080.80	3,605.70		
		0.00	8,162.15	6,066.90				
		ΣQ <sub>i,1</sub>	ΣQ <sub>i,2</sub>	ΣQ <sub>i,3</sub>	ΣQ <sub>i,4</sub>	ΣQ <sub>i,5</sub>	ΣQ <sub>i,6</sub>	ΣQ <sub>i,7</sub>
Q <sub>j</sub> [cm <sup>3</sup> /s]		0.00	30,781.84	35,657.30	31,113.60	25,342.10	16,229.03	0.00
ΣQ <sub>j</sub> [cm <sup>3</sup> /s]					139,123.87			
		ΣQ <sub>i,1</sub>	ΣQ <sub>i,2</sub>	ΣQ <sub>i,3</sub>	ΣQ <sub>i,4</sub>	ΣQ <sub>i,5</sub>	ΣQ <sub>i,6</sub>	ΣQ <sub>i,7</sub>
Q <sub>j</sub> [l/s]		0.00	30.78	35.66	31.11	25.34	16.23	0.00
ΣQ <sub>j</sub> [l/s]					139.12			

**Pendiente: 6% Caudal: 154.08 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$** 

Q [l/s]= 154.08		$V^3_{i,j} * A_{i,j} [m^5/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.30	6.10	5.40	4.70	4.10	3.40	3.20
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0118	0.0141	0.0176	0.0129	0.0094	0.00
0.50	1.09	0.00	0.0092	0.0114	0.0128	0.0109	0.0095	0.00
1.00	2.09	0.00	0.0228	0.0310	0.0315	0.0264	0.0235	0.00
1.00	3.09	0.00	0.0202	0.0264	0.0315	0.0288	0.0191	0.00
1.00	4.09	0.00	0.0212	0.0343	0.0350	0.0147		
		0.00	0.0320	0.0278				
		$\sum(V^3_{i,1} * A_{i,1})$	$\sum(V^3_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^3_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^3_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^3_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^3_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^3_{i,7} * A_{i,7})$
$V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		0.000	0.117	0.145	0.128	0.094	0.061	0.000
$\sum V^3_j * A_j [m^5/s^3]$					0.546			
$\alpha [-]$					1.112			

Q [l/s]= 154.08		$V^2_{i,j} * A_{i,j} [m^4/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.30	6.10	5.40	4.70	4.10	3.40	3.20
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0067	0.0082	0.0094	0.0077	0.0057	0.00
0.50	1.09	0.00	0.0049	0.0061	0.0066	0.0059	0.0050	0.00
1.00	2.09	0.00	0.0113	0.0150	0.0151	0.0134	0.0115	0.00
1.00	3.09	0.00	0.0104	0.0134	0.0151	0.0143	0.0093	0.00
1.00	4.09	0.00	0.0107	0.0160	0.0168	0.0073		
		0.00	0.0162	0.0130				
		$\sum(V^2_{i,1} * A_{i,1})$	$\sum(V^2_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^2_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^2_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^2_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^2_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^2_{i,7} * A_{i,7})$
$V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.000	0.060	0.072	0.063	0.049	0.031	0.000
$\sum V^2_j * A_j [m^4/s^3]$					0.275			
$\beta [-]$					1.052			

**Pendiente: 6% Caudal: 291.88 l/s Perfiles de Velocidad**



**Pendiente: 6% Caudal: 291.88 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 291.88		Velocidad $V_{i,j}$ [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		10.20	10.00	9.30	8.60	8.00	7.30	7.10
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.000	10.000	45.000	80.000	115.000	150.000	160.000
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	1.86	1.86	1.93	1.92	1.91	0.00
0.50	1.09	0.00	2.06	1.98	2.10	2.13	2.09	0.00
1.00	2.09	0.00	2.28	2.15	2.24	2.29	2.19	0.00
1.00	3.09	0.00	2.33	2.22	2.28	2.31	2.26	0.00
1.00	4.09	0.00	2.29	2.22	2.31	2.31	2.22	0.00
1.00	5.09	0.00	2.30	2.27	2.33	2.28	2.23	0.00
1.00	6.09	0.00	2.27	2.26	2.34	2.28	2.23	0.00
1.00	7.09	0.00	2.25	2.26	2.34			0.00
		0.00	2.25					

Q [l/s]= 291.88		Área $A_{i,j}$ [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		10.20	10.00	9.30	8.60	8.00	7.30	7.10
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	5.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	6.09	0.20	27.30	35.00	35.00	84.35	46.68	0.30
1.00	7.09	0.20	27.30	94.85	70.35			
		0.52	65.79					

$\sum A_{i,1}$	$\sum A_{i,2}$	$\sum A_{i,3}$	$\sum A_{i,4}$	$\sum A_{i,5}$	$\sum A_{i,6}$	$\sum A_{i,7}$	
$A_j$ [cm <sup>2</sup> ]	2.02	270.00	321.65	297.15	276.15	196.29	1.40
$\sum A_{v>0}$ [cm <sup>2</sup> ]	1329.31						
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]	35.336						
$\sum A_j$ [cm <sup>2</sup> ]	1364.65						

Q [l/s]= 291.88		Caudal $Q_{i,j}$ [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		10.20	10.00	9.30	8.60	8.00	7.30	7.10
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	3,960.68	5,077.80	5,268.90	5,241.60	4,067.15	0.00
0.50	1.09	0.00	2,811.90	3,465.00	3,675.00	3,727.50	2,852.85	0.00
1.00	2.09	0.00	6,224.40	7,525.00	7,840.00	8,015.00	5,978.70	0.00
1.00	3.09	0.00	6,360.90	7,770.00	7,980.00	8,085.00	6,169.80	0.00
1.00	4.09	0.00	6,251.70	7,770.00	8,085.00	8,085.00	6,060.60	0.00
1.00	5.09	0.00	6,279.00	7,945.00	8,155.00	7,980.00	6,087.90	0.00
1.00	6.09	0.00	6,197.10	7,910.00	8,190.00	19,231.80	10,410.31	0.00
1.00	7.09	0.00	6,142.50	21,436.10	16,461.90			
		0.00	14,803.43					

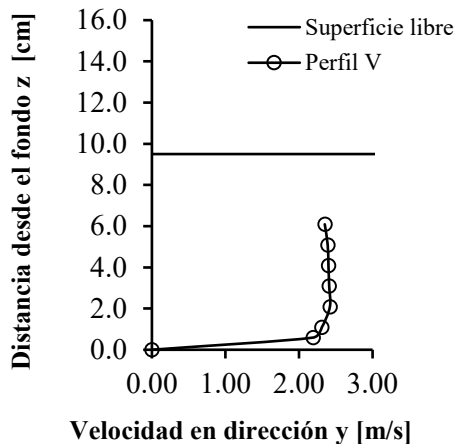
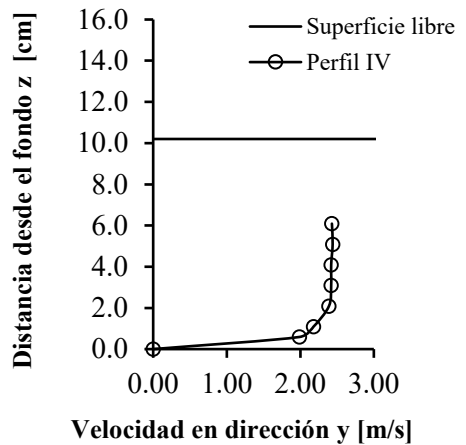
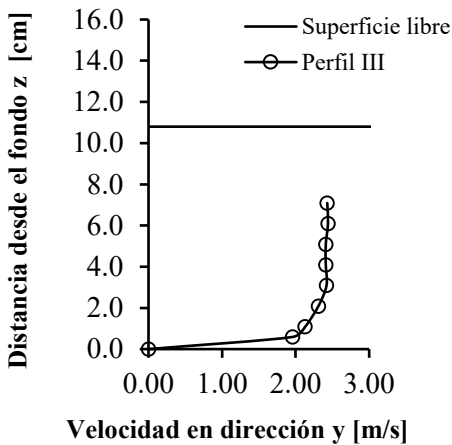
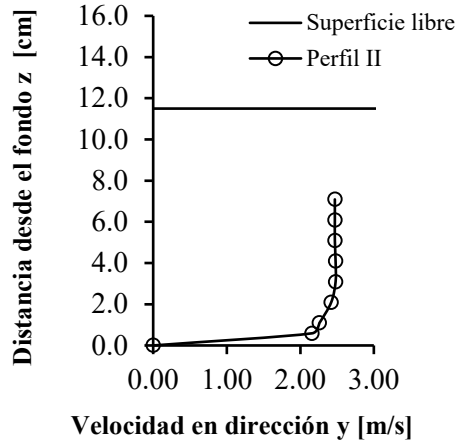
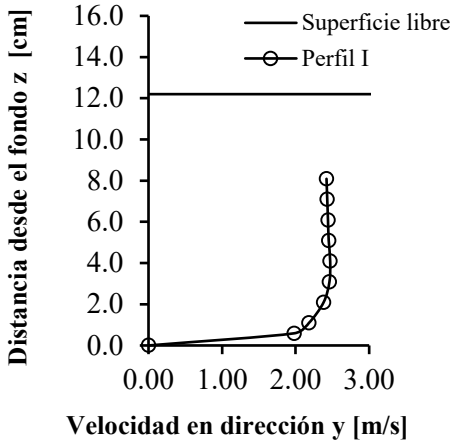
$\sum Q_{i,1}$	$\sum Q_{i,2}$	$\sum Q_{i,3}$	$\sum Q_{i,4}$	$\sum Q_{i,5}$	$\sum Q_{i,6}$	$\sum Q_{i,7}$	
$Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]	0.00	59,031.61	68,898.90	65,655.80	60,365.90	41,627.31	0.00
$\sum Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]	295,579.52						
$\sum Q_{i,1}$	$\sum Q_{i,2}$	$\sum Q_{i,3}$	$\sum Q_{i,4}$	$\sum Q_{i,5}$	$\sum Q_{i,6}$	$\sum Q_{i,7}$	
$Q_j$ [l/s]	0.00	59.03	68.90	65.66	60.37	41.63	0.00
$\sum Q_j$ [l/s]	295.58						

**Pendiente: 6% Caudal: 291.88 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$**

Q [l/s]= 291.88		$V^3_{i,j} * A_{i,j} [m^5/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		10.20	10.00	9.30	8.60	8.00	7.30	7.10
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0137	0.0176	0.0196	0.0193	0.0148	0.00
0.50	1.09	0.00	0.0119	0.0136	0.0162	0.0169	0.0125	0.00
1.00	2.09	0.00	0.0324	0.0348	0.0393	0.0420	0.0287	0.00
1.00	3.09	0.00	0.0345	0.0383	0.0415	0.0431	0.0315	0.00
1.00	5.09	0.00	0.0328	0.0383	0.0431	0.0431	0.0299	0.00
1.00	6.09	0.00	0.0332	0.0409	0.0443	0.0415	0.0303	0.00
1.00	7.09	0.00	0.0319	0.0404	0.0448	0.1000	0.0518	0.00
0.00	0.00	0.00	0.0311	0.1095	0.0901			
		0.00	0.0749					
$\sum(V^3_{i,j} * A_{i,j})$		0.000	0.296	0.333	0.339	0.306	0.199	0.000
$\sum V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		1.474						
$\alpha [-]$		1.063						

Q [l/s]= 291.88		$V^2_{i,j} * A_{i,j} [m^4/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		10.20	10.00	9.30	8.60	8.00	7.30	7.10
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0074	0.0094	0.0102	0.0101	0.0078	0.00
0.50	1.09	0.00	0.0058	0.0069	0.0077	0.0079	0.0060	0.00
1.00	2.09	0.00	0.0142	0.0162	0.0176	0.0184	0.0131	0.00
1.00	3.09	0.00	0.0148	0.0172	0.0182	0.0187	0.0139	0.00
1.00	5.09	0.00	0.0143	0.0172	0.0187	0.0187	0.0135	0.00
1.00	6.09	0.00	0.0144	0.0180	0.0190	0.0182	0.0136	0.00
1.00	7.09	0.00	0.0141	0.0179	0.0192	0.0438	0.0232	0.00
0.00	0.00	0.00	0.0138	0.0484	0.0385			
		0.00	0.0333					
$\sum(V^2_{i,j} * A_{i,j})$		0.000	0.132	0.151	0.149	0.136	0.091	0.000
$\sum V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.659						
$\beta [-]$		1.030						

**Pendiente: 6% Caudal: 396.64 l/s Perfiles de Velocidad**





**Pendiente: 6% Caudal: 396.64 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 396.64		Velocidad $V_{ij}$ [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		12.40	12.20	11.50	10.80	10.20	9.50	9.30
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	1.98	2.16	1.96	1.99	2.19	0.00
0.50	1.09	0.00	2.18	2.26	2.13	2.18	2.31	0.00
1.00	2.09	0.00	2.38	2.42	2.31	2.39	2.42	0.00
1.00	3.09	0.00	2.46	2.48	2.42	2.42	2.41	0.00
1.00	4.09	0.00	2.47	2.48	2.41	2.42	2.40	0.00
1.00	5.09	0.00	2.45	2.47	2.41	2.44	2.39	0.00
1.00	6.09	0.00	2.44	2.47	2.44	2.43	2.35	0.00
1.00	7.09	0.00	2.43	2.47	2.43	2.08	1.88	0.00
1.00	8.09	0.00	2.42	2.05	2.00	2.08	1.88	0.00
1.00	9.09	0.00	2.07	2.05	2.00			
		0.00	2.07					

Q [l/s]= 396.64		Área $A_{ij}$ [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		12.40	12.20	11.50	10.80	10.20	9.50	9.30
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	5.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	6.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	7.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	8.09	0.20	27.30	35.00	35.00	91.35	52.14	0.34
1.00	9.09	0.20	27.30	101.85	77.35			

$\sum A_{i,1}$	2.46	$\sum A_{i,2}$	330.06	$\sum A_{i,3}$	398.65	$\sum A_{i,4}$	374.15	$\sum A_{i,5}$	353.15	$\sum A_{i,6}$	256.35	$\sum A_{i,7}$	1.84
$A_j$ [cm <sup>2</sup> ]													
$\sum A_{v \neq 0}$ [cm <sup>2</sup> ]	1680.43												
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]	36.216												
$\sum A_j$ [cm <sup>2</sup> ]	1716.65												

Q [l/s]= 396.64		Caudal $Q_{ij}$ [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		12.40	12.20	11.50	10.80	10.20	9.50	9.30
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	4,216.21	5,896.80	5,350.80	5,432.70	4,663.39	0.00
0.50	1.09	0.00	2,975.70	3,955.00	3,727.50	3,815.00	3,153.15	0.00
1.00	2.09	0.00	6,497.40	8,470.00	8,085.00	8,365.00	6,606.60	0.00
1.00	3.09	0.00	6,715.80	8,680.00	8,470.00	8,470.00	6,579.30	0.00
1.00	4.09	0.00	6,743.10	8,680.00	8,435.00	8,470.00	6,552.00	0.00
1.00	5.09	0.00	6,688.50	8,645.00	8,435.00	8,540.00	6,524.70	0.00
1.00	6.09	0.00	6,661.20	8,645.00	8,540.00	8,505.00	6,415.50	0.00
1.00	7.09	0.00	6,633.90	8,645.00	8,505.00	7,280.00	5,132.40	0.00
1.00	8.09	0.00	6,606.60	7,175.00	7,000.00	19,000.80	9,802.88	0.00
1.00	9.09	0.00	5,651.10	20,879.25	15,470.00			

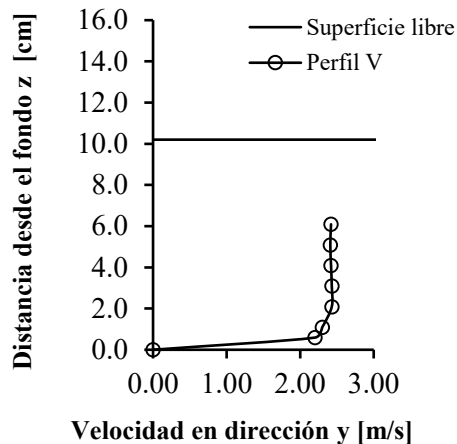
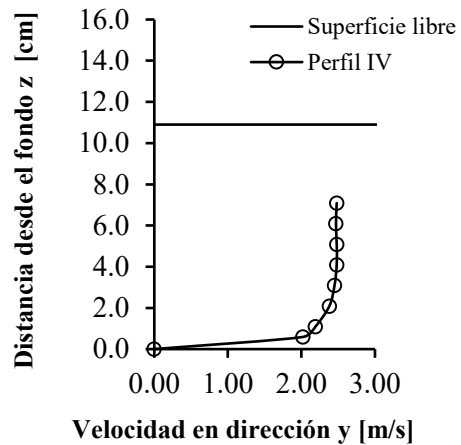
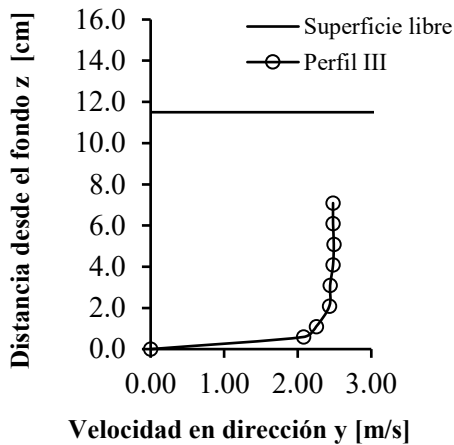
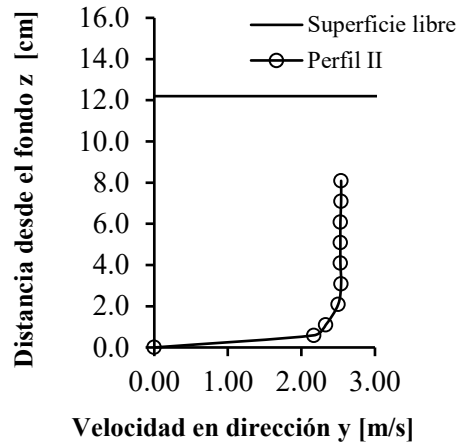
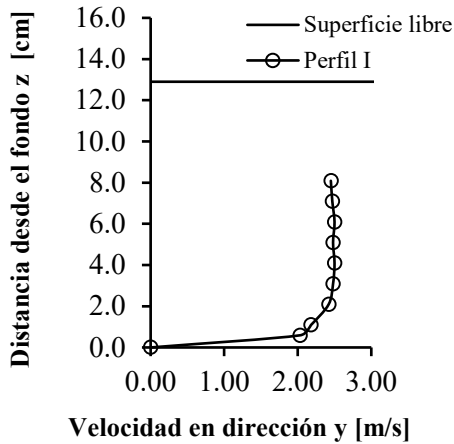
$\sum Q_{i,1}$	0.00	$\sum Q_{i,2}$	74,138.88	$\sum Q_{i,3}$	89,671.05	$\sum Q_{i,4}$	82,018.30	$\sum Q_{i,5}$	77,878.50	$\sum Q_{i,6}$	55,429.92	$\sum Q_{i,7}$	0.00
$Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]													
$\sum Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]	379,136.65												
$\sum Q_{i,1}$	0.00	$\sum Q_{i,2}$	74.14	$\sum Q_{i,3}$	89.67	$\sum Q_{i,4}$	82.02	$\sum Q_{i,5}$	77.88	$\sum Q_{i,6}$	55.43	$\sum Q_{i,7}$	0.00
$Q_j$ [l/s]													
$\sum Q_j$ [l/s]	379.14												

**Pendiente: 6% Caudal: 396.64 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$** 

Q [l/s]= 396.64		$V^3_{i,j} * A_{i,j} [m^5/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		12.40	12.20	11.50	10.80	10.20	9.50	9.30
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.017	0.028	0.021	0.022	0.022	0.00
0.50	1.09	0.00	0.014	0.020	0.017	0.018	0.017	0.00
1.00	2.09	0.00	0.037	0.050	0.043	0.048	0.039	0.00
1.00	3.09	0.00	0.041	0.053	0.050	0.050	0.038	0.00
1.00	4.09	0.00	0.041	0.053	0.049	0.050	0.038	0.00
1.00	5.09	0.00	0.040	0.053	0.049	0.051	0.037	0.00
1.00	6.09	0.00	0.040	0.053	0.051	0.050	0.035	0.00
1.00	7.09	0.00	0.039	0.053	0.050	0.031	0.018	0.00
1.00	8.09	0.00	0.039	0.030	0.028	0.082	0.035	0.00
1.00	9.09	0.00	0.024	0.088	0.062			0.00
		0.00	0.063					
		$\sum(V^3_{i,1} * A_{i,1})$	$\sum(V^3_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^3_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^3_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^3_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^3_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^3_{i,7} * A_{i,7})$
$V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		0.000	0.394	0.480	0.419	0.401	0.279	0.000
$\sum V^3_j * A_j [m^5/s^3]$								1.974
$\alpha [-]$								1.068

Q [l/s]= 396.64		$V^2_{i,j} * A_{i,j} [m^4/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		12.40	12.20	11.50	10.80	10.20	9.50	9.30
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.008	0.013	0.010	0.011	0.010	0.00
0.50	1.09	0.00	0.006	0.009	0.008	0.008	0.007	0.00
1.00	2.09	0.00	0.015	0.020	0.019	0.020	0.016	0.00
1.00	3.09	0.00	0.017	0.022	0.020	0.020	0.016	0.00
1.00	4.09	0.00	0.017	0.022	0.020	0.020	0.016	0.00
1.00	5.09	0.00	0.016	0.021	0.020	0.021	0.016	0.00
1.00	6.09	0.00	0.016	0.021	0.021	0.021	0.015	0.00
1.00	7.09	0.00	0.016	0.021	0.021	0.015	0.010	0.00
1.00	8.09	0.00	0.016	0.015	0.014	0.040	0.018	0.00
1.00	9.09	0.00	0.012	0.043	0.031			0.00
		0.00	0.031					
		$\sum(V^2_{i,1} * A_{i,1})$	$\sum(V^2_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^2_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^2_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^2_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^2_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^2_{i,7} * A_{i,7})$
$V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.000	0.170	0.207	0.185	0.176	0.124	0.000
$\sum V^2_j * A_j [m^4/s^3]$								0.862
$\beta [-]$								1.029

## Pendiente: 6% Caudal: 423.64 l/s *Perfiles de Velocidad*



**Pendiente: 6% Caudal: 423.64 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 423.64		Velocidad V <sub>ij</sub> [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		13.10	12.90	12.20	11.50	10.90	10.20	10.00
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Az [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	2.03	2.17	2.08	2.02	2.20	0.00
0.50	1.09	0.00	2.18	1.98	2.25	2.19	2.30	0.00
1.00	2.09	0.00	2.42	2.12	2.43	2.38	2.43	0.00
1.00	3.09	0.00	2.48	2.16	2.44	2.45	2.43	0.00
1.00	4.09	0.00	2.50	2.15	2.48	2.48	2.42	0.00
1.00	5.09	0.00	2.48	2.16	2.49	2.48	2.41	0.00
1.00	6.09	0.00	2.50	2.15	2.48	2.47	2.42	0.00
1.00	7.09	0.00	2.47	2.14	2.48	2.48	2.42	0.00
1.00	8.09	0.00	2.45	2.14	2.48	2.48		
		0.00	2.45	2.14				

Q [l/s]= 423.64		Área A <sub>ij</sub> [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		13.10	12.90	12.20	11.50	10.90	10.20	10.00
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Az [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	5.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	6.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	7.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	98.55	0.68
1.00	8.09	0.20	27.30	35.00	136.85	115.85		
		0.90	117.66	126.35				

A <sub>j</sub> [cm <sup>2</sup> ]	ΣA <sub>i,1</sub>	ΣA <sub>i,2</sub>	ΣA <sub>i,3</sub>	ΣA <sub>i,4</sub>	ΣA <sub>i,5</sub>	ΣA <sub>i,6</sub>	ΣA <sub>i,7</sub>
ΣA <sub>v≠0</sub> [cm <sup>2</sup> ]	2.60	349.17	423.15	398.65	377.65	275.46	1.98
ΣA <sub>v=0</sub> [cm <sup>2</sup> ]				1792.15			
ΣA <sub>j</sub> [cm <sup>2</sup> ]				36.496			
				1828.65			

Q [l/s]= 423.64		Caudal Q <sub>ij</sub> [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		13.10	12.90	12.20	11.50	10.90	10.20	10.00
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Az [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	4,322.68	5,924.10	5,678.40	5,514.60	4,684.68	0.00
0.50	1.09	0.00	2,975.70	3,465.00	3,937.50	3,832.50	3,139.50	0.00
1.00	2.09	0.00	6,606.60	7,420.00	8,505.00	8,330.00	6,633.90	0.00
1.00	3.09	0.00	6,770.40	7,560.00	8,540.00	8,575.00	6,633.90	0.00
1.00	4.09	0.00	6,825.00	7,525.00	8,680.00	8,680.00	6,606.60	0.00
1.00	5.09	0.00	6,770.40	7,560.00	8,715.00	8,680.00	6,579.30	0.00
1.00	6.09	0.00	6,825.00	7,525.00	8,680.00	8,645.00	6,606.60	0.00
1.00	7.09	0.00	6,743.10	7,490.00	8,680.00	8,680.00	23,849.83	0.00
1.00	8.09	0.00	6,688.50	7,490.00	33,938.80	28,730.80		
		0.00	28,827.44	27,038.90				

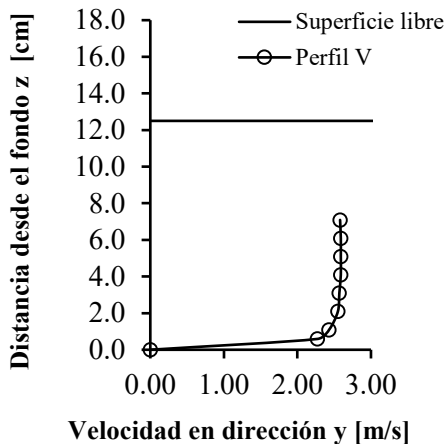
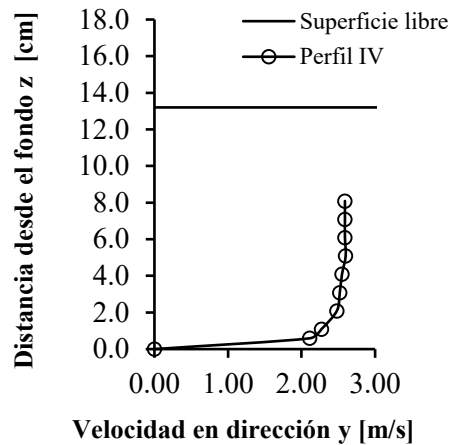
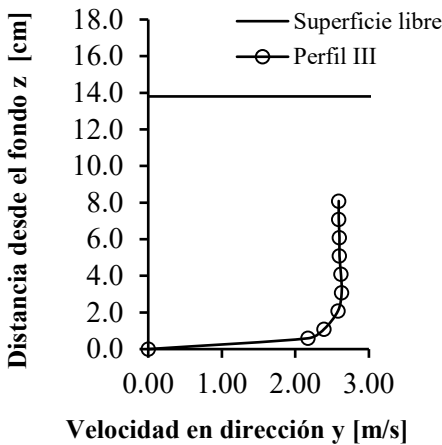
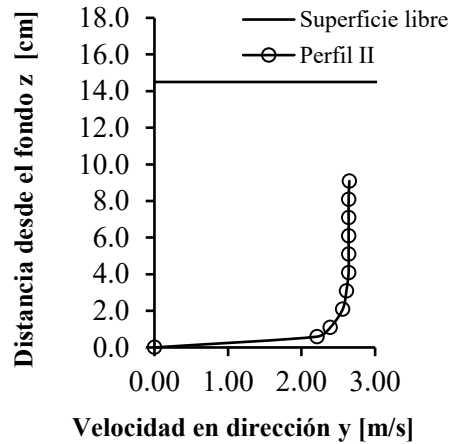
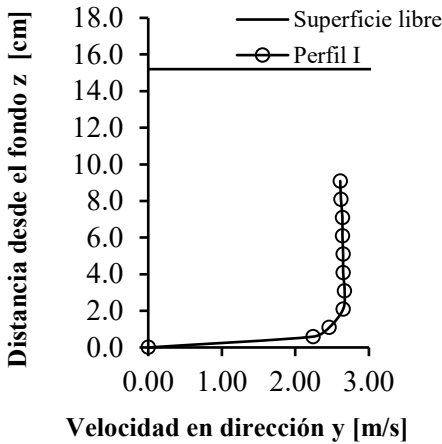
Q <sub>j</sub> [cm <sup>3</sup> /s]	ΣQ <sub>i,1</sub>	ΣQ <sub>i,2</sub>	ΣQ <sub>i,3</sub>	ΣQ <sub>i,4</sub>	ΣQ <sub>i,5</sub>	ΣQ <sub>i,6</sub>	ΣQ <sub>i,7</sub>
ΣQ <sub>j</sub> [cm <sup>3</sup> /s]	0.00	83,354.82	88,998.00	95,354.70	89,667.90	64,734.31	0.00
				422,109.72			
Q <sub>j</sub> [l/s]	ΣQ <sub>i,1</sub>	ΣQ <sub>i,2</sub>	ΣQ <sub>i,3</sub>	ΣQ <sub>i,4</sub>	ΣQ <sub>i,5</sub>	ΣQ <sub>i,6</sub>	ΣQ <sub>i,7</sub>
ΣQ <sub>j</sub> [l/s]	0.00	83.35	89.00	95.35	89.67	64.73	0.00
				422.11			

**Pendiente: 6% Caudal: 423.64 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$**

Q [l/s]= 423.64		V <sup>3</sup> <sub>i,j</sub> * A <sub>i,j</sub> [m <sup>5</sup> /s <sup>3</sup> ]							
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-	
Calado [cm]		13.10	12.90	12.20	11.50	10.90	10.20	10.00	
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20	
$\Delta z$ [cm]	P <sub>i,j</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00	
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.78	0.59	0.00	0.018	0.028	0.025	0.023	0.023	0.00	
0.50	1.09	0.00	0.014	0.014	0.020	0.018	0.017	0.00	
1.00	2.09	0.00	0.039	0.033	0.050	0.047	0.039	0.00	
1.00	3.09	0.00	0.042	0.035	0.051	0.051	0.039	0.00	
1.00	4.09	0.00	0.043	0.035	0.053	0.053	0.039	0.00	
1.00	5.09	0.00	0.042	0.035	0.054	0.053	0.038	0.00	
1.00	6.09	0.00	0.043	0.035	0.053	0.053	0.039	0.00	
1.00	7.09	0.00	0.041	0.034	0.053	0.053	0.140	0.00	
1.00	8.09	0.00	0.040	0.034	0.209	0.177		0.00	
		0.00	0.173	0.124					
		$\Sigma(V^{3_{i,1}}*A_{i,1})$	$\Sigma(V^{3_{i,2}}*A_{i,2})$	$\Sigma(V^{3_{i,3}}*A_{i,3})$	$\Sigma(V^{3_{i,4}}*A_{i,4})$	$\Sigma(V^{3_{i,5}}*A_{i,5})$	$\Sigma(V^{3_{i,6}}*A_{i,6})$	$\Sigma(V^{3_{i,7}}*A_{i,7})$	
V <sup>3</sup> <sub>j</sub> * A <sub>j</sub> [m <sup>5</sup> /s <sup>3</sup> ]		0.000	0.494	0.407	0.568	0.529	0.373	0.000	
$\Sigma V^3_j * A_j$ [m <sup>5</sup> /s <sup>3</sup> ]								2.371	
$\alpha$ [-]								1.054	

Q [l/s]= 423.64		V <sup>2</sup> <sub>i,j</sub> * A <sub>i,j</sub> [m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> ]							
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-	
Calado [cm]		13.10	12.90	12.20	11.50	10.90	10.20	10.00	
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20	
$\Delta z$ [cm]	P <sub>i,j</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00	
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.78	0.59	0.00	0.009	0.013	0.012	0.011	0.010	0.00	
0.50	1.09	0.00	0.006	0.007	0.009	0.008	0.007	0.00	
1.00	2.09	0.00	0.016	0.016	0.021	0.020	0.016	0.00	
1.00	3.09	0.00	0.017	0.016	0.021	0.021	0.016	0.00	
1.00	4.09	0.00	0.017	0.016	0.022	0.022	0.016	0.00	
1.00	5.09	0.00	0.017	0.016	0.022	0.022	0.016	0.00	
1.00	6.09	0.00	0.017	0.016	0.022	0.021	0.016	0.00	
1.00	7.09	0.00	0.017	0.016	0.022	0.022	0.058	0.00	
1.00	8.09	0.00	0.016	0.016	0.084	0.071		0.00	
		0.00	0.071	0.058					
		$\Sigma(V^{2_{i,1}}*A_{i,1})$	$\Sigma(V^{2_{i,2}}*A_{i,2})$	$\Sigma(V^{2_{i,3}}*A_{i,3})$	$\Sigma(V^{2_{i,4}}*A_{i,4})$	$\Sigma(V^{2_{i,5}}*A_{i,5})$	$\Sigma(V^{2_{i,6}}*A_{i,6})$	$\Sigma(V^{2_{i,7}}*A_{i,7})$	
V <sup>2</sup> <sub>j</sub> * A <sub>j</sub> [m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> ]		0.000	0.203	0.190	0.233	0.218	0.155	0.000	
$\Sigma V^2_j * A_j$ [m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> ]								0.999	
$\beta$ [-]								1.025	

**Pendiente: 6% Caudal: 553.46 l/s Perfiles de Velocidad**



El calado en las aceras era tan pequeño que no se pudo determinar un perfil de velocidades. Únicamente se obtuvo una medida para cada uno de las 4 localizaciones de los perfiles (A, B, C y D), según se indica en las tablas de determinación del caudal.

**Pendiente: 6% Caudal: 553.46 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s] = 553.46		Velocidad V <sub>h</sub> [m/s]													
Id. Perfil		-	A	B	-	I	II	III	IV	V	-	C	D	-	
Calado [cm]		0.40	0.40	0.40	15.40	15.20	14.50	13.80	13.20	12.50	12.30	0.40	0.40	0.40	
Ax [cm]		0.20	20.30	20.70	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20	20.70	20.30	0.20	
Carretera		-41.00	-30.75	-10.25	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00	170.25	190.75	201.00	
Az [cm]	P <sub>h</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>h</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>h</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>h</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>h</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>h</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>h</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>h</sub> [cm]
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00	2.24	2.21	2.17	2.11	2.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	1.09	0.00	0.00	0.00	0.00	2.46	2.39	2.39	2.27	2.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	2.09	0.00	0.00	0.00	0.00	2.65	2.56	2.58	2.48	2.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	3.09	0.00	0.00	0.00	0.00	2.67	2.61	2.63	2.52	2.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	4.09	0.00	0.00	0.00	0.00	2.65	2.64	2.62	2.55	2.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	5.09	0.00	0.00	0.00	0.00	2.65	2.64	2.60	2.60	2.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	6.09	0.00	0.00	0.00	0.00	2.64	2.64	2.60	2.59	2.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	7.09	0.00	0.00	0.00	0.00	2.64	2.64	2.59	2.59	2.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	8.09	0.00	0.00	0.00	0.00	2.62	2.64	2.59	2.59	2.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	9.09	0.00	0.00	0.00	0.00	2.61	2.65	2.59	2.59	2.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	10.09	0.00	0.00	0.00	0.00	2.61	2.65	2.65	2.59	2.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	11.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	12.09	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	13.09	0.20	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	14.09	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	15.09	0.20	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	16.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

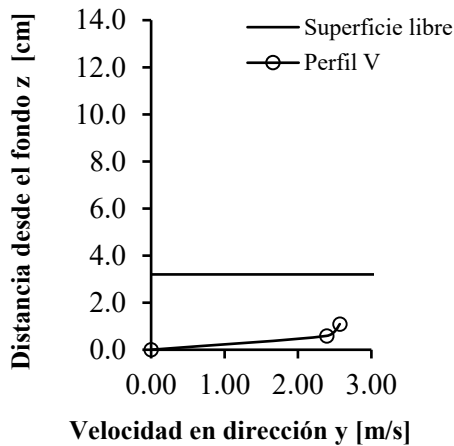
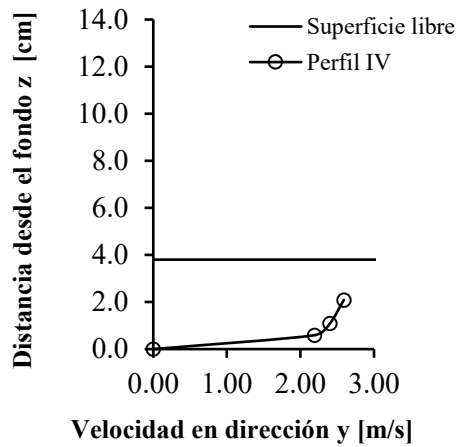
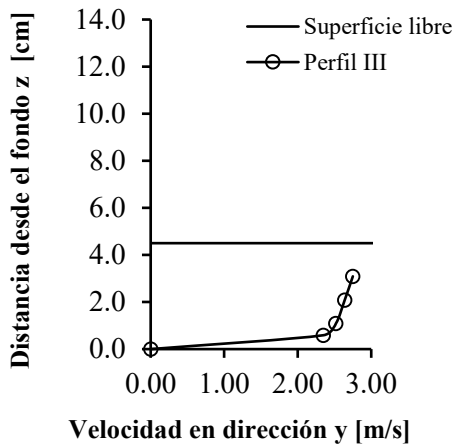
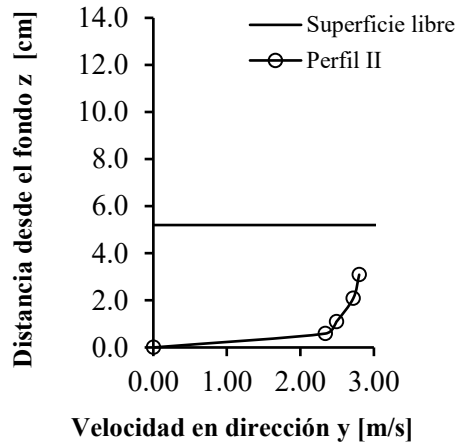
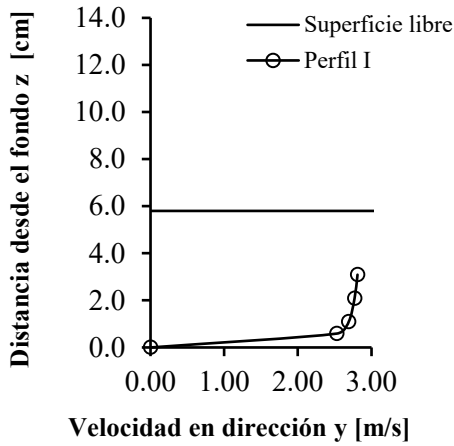
Q  V s = 553.46																								
Área A <sub>i,j</sub> [cm <sup>2</sup> ]																								
Id. Perfil																								
Calado [cm]																								
Ax [cm]																								
Aceras (Izda y Decha)																								
Az [cm]	P <sub>li</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>li</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>li</sub> [cm]	A	B	-	I	II	III	IV	V	-	C	D	-							
0.20	0.00	-41.00	-30.75	-10.25	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00	170.25	190.75	201.00										
0.78	0.59				0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04													
0.50	1.09				0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16													
1.00	2.09				0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10													
1.00	3.09				0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20													
1.00	4.09				0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20													
1.00	5.09				0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20													
1.00	6.09				0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20													
1.00	7.09				0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20													
1.00	8.09				0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20													
1.00	9.09				0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20													
1.00	10.09				0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20													
1.00	11.09				0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20													
1.00	12.09	0.20	0.00		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20													
1.00	13.09	0.20	0.30		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20													
1.00	14.09			0.20	0.00	4.06	4.14								4.14	4.06	0.04							
1.00	15.09			0.20	0.30	4.06	4.14								4.14	4.06	0.04							
1.00	16.09					0.00	0.00	0.00							8.28	8.12	0.00							
												ΣA <sub>i,1</sub>	ΣA <sub>i,2</sub>	ΣA <sub>i,3</sub>	ΣA <sub>i,4</sub>	ΣA <sub>i,5</sub>	ΣA <sub>i,6</sub>	ΣA <sub>i,7</sub>	ΣA <sub>i,8</sub>	ΣA <sub>i,9</sub>	ΣA <sub>i,10</sub>	ΣA <sub>i,11</sub>	ΣA <sub>i,12</sub>	ΣA <sub>i,13</sub>
												0.08	8.12	8.28	3.06	411.96	503.65	479.15	458.15	338.25	2.44	16.56	16.24	0.08
												2192.03												
												53.976												
												2246.01												
												A <sub>j</sub> [cm <sup>2</sup> ]												
												ΣA <sub>v≠0</sub> [cm <sup>2</sup> ]												
												ΣA <sub>v=0</sub> [cm <sup>2</sup> ]												
												ΣA <sub>j</sub> [cm <sup>2</sup> ]												



Q [l/s]= 553.46		Caudal Q <sub>ij</sub> [cm <sup>3</sup> /s]												
Id. Perfil		A	B	-	I	II	III	IV	V	C	D			
Calado [cm]		0.40	0.40	15.40	15.20	14.50	13.80	13.20	12.50	12.30	0.40	0.40	0.40	
Ax [cm]		0.20	20.30	20.70	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	20.70	20.30	0.20	0.20	
Carretera														
Az [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	Az [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	
0.20	0.00	-41.00	-30.75	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00	170.25	190.75	201.00	
0.78	0.59	0.00	0.00	0.00	4,769.86	6,033.30	5,924.10	5,760.30	4,833.74	0.00				
0.50	1.09	0.00	0.00	0.00	3,357.90	4,182.50	4,182.50	3,972.50	3,316.95	0.00				
1.00	2.09	0.00	0.00	0.00	7,234.50	8,960.00	9,030.00	8,680.00	6,961.50	0.00				
1.00	3.09	0.00	0.00	0.00	7,289.10	9,135.00	9,205.00	8,820.00	7,016.10	0.00				
1.00	4.09	0.00	0.00	0.00	7,234.50	9,240.00	9,170.00	8,925.00	7,070.70	0.00				
1.00	5.09	0.00	0.00	0.00	7,234.50	9,240.00	9,100.00	9,100.00	7,070.70	0.00				
1.00	6.09	0.00	0.00	0.00	7,207.20	9,240.00	9,100.00	9,065.00	7,070.70	0.00				
1.00	7.09	0.00	0.00	0.00	7,207.20	9,240.00	9,065.00	9,065.00	7,043.40	0.00				
1.00	8.09	0.00	0.00	0.00	7,152.60	9,240.00	9,065.00	9,065.00	34,583.09	0.00				
1.00	9.09	0.00	0.00	0.00	7,125.30	9,275.00	47,228.65	41,789.65						
1.00	10.09	0.00	0.00	0.00	39,972.93	45,540.25								
1.00	11.09	0.00	0.00	0.00										
1.00	12.09	0.20	0.00											
1.00	13.09	0.20	0.30											
1.00	14.09	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1.00	15.09	0.20	0.30	0.00	710.50	712.08	712.08	712.08	712.08	712.08	712.08	712.08	712.08	
1.00	16.09	0.20	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		ΣQ <sub>i,1</sub>	ΣQ <sub>i,2</sub>	ΣQ <sub>i,3</sub>	ΣQ <sub>i,4</sub>	ΣQ <sub>i,5</sub>	ΣQ <sub>i,6</sub>	ΣQ <sub>i,7</sub>	ΣQ <sub>i,8</sub>	ΣQ <sub>i,9</sub>	ΣQ <sub>i,10</sub>	ΣQ <sub>i,11</sub>	ΣQ <sub>i,12</sub>	ΣQ <sub>i,13</sub>
Q <sub>i</sub> [cm <sup>3</sup> /s]		0.00	710.50	712.08	0.00	105,785.59	129,326.05	121,070.25	114,242.45	84,966.88	0.00	2,136.24	2,058.42	0.00
ΣQ <sub>i</sub> [cm <sup>3</sup> /s]		0.00	710.50	712.08	0.00	105,785.59	129,326.05	121,070.25	114,242.45	84,966.88	0.00	2,136.24	2,058.42	0.00
		561,008.46												
Q <sub>i</sub> [l/s]		0.00	0.71	0.71	0.00	105.79	129.33	121.07	114.24	84.97	0.00	2.14	2.06	0.00
ΣQ <sub>i</sub> [l/s]		0.00	0.71	0.71	0.00	105.79	129.33	121.07	114.24	84.97	0.00	2.14	2.06	0.00
		561.01												



**Pendiente: 8% Caudal: 192.59 l/s Perfiles de Velocidad**



**Pendiente: 8% Caudal: 192.59 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 192.59		Velocidad V <sub>i,j</sub> [m/s]						
Id. Perfil	-	I	II	III	IV	V	-	
Calado [cm]	6.00	5.80	5.20	4.50	3.80	3.20	3.00	
Δx [cm]	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20	
Δz [cm]	P <sub>i,j</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.78	0.59	0.00	2.53	2.34	2.35	2.19	2.39	0.00
0.50	1.09	0.00	2.69	2.49	2.52	2.40	2.57	0.00
1.00	2.09	0.00	2.77	2.72	2.64	2.59	2.57	0.00
1.00	3.09	0.00	2.81	2.80	2.75	2.59		
		0.00	2.81	2.80	2.75			

Q [l/s]= 192.59		Área A <sub>i,j</sub> [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil	-	I	II	III	IV	V	-	
Calado [cm]	6.00	5.80	5.20	4.50	3.80	3.20	3.00	
Δx [cm]	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20	
Δz [cm]	P <sub>i,j</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	50.78	0.33
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	42.35		
		0.48	60.33	56.35	31.85			
A <sub>j</sub> [cm <sup>2</sup> ]		ΣA <sub>i,1</sub>	ΣA <sub>i,2</sub>	ΣA <sub>i,3</sub>	ΣA <sub>i,4</sub>	ΣA <sub>i,5</sub>	ΣA <sub>i,6</sub>	ΣA <sub>i,7</sub>
ΣA <sub>v≠0</sub> [cm <sup>2</sup> ]		1.18	155.34	178.15	153.65	129.15	91.18	0.63
ΣA <sub>v=0</sub> [cm <sup>2</sup> ]					675.55			
ΣA <sub>j</sub> [cm <sup>2</sup> ]					33.726			
					709.275			

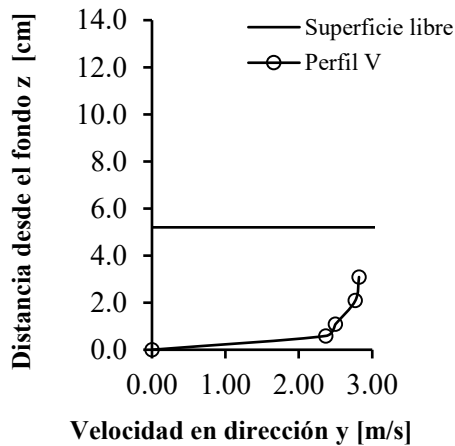
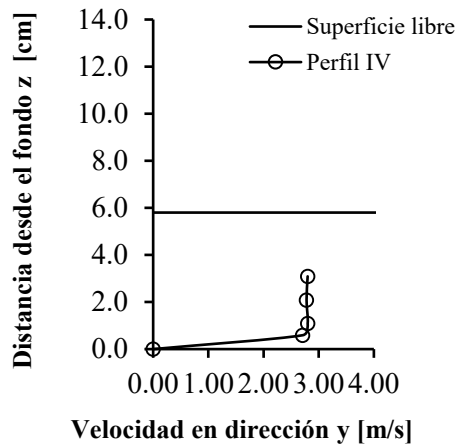
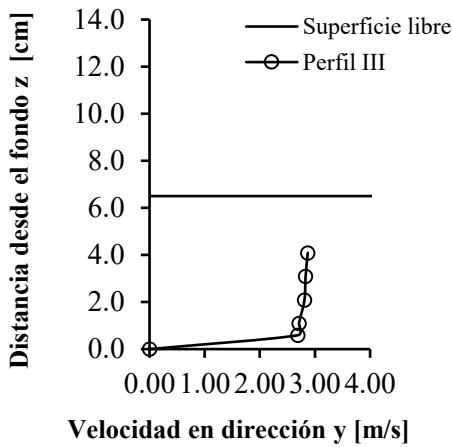
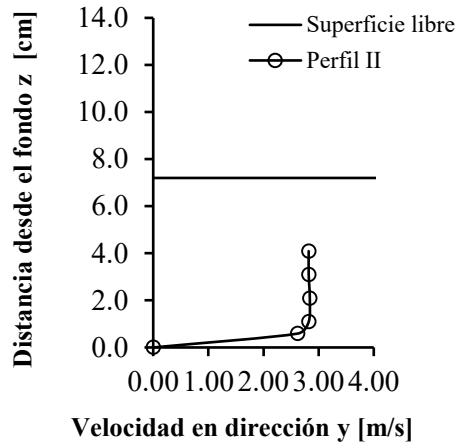
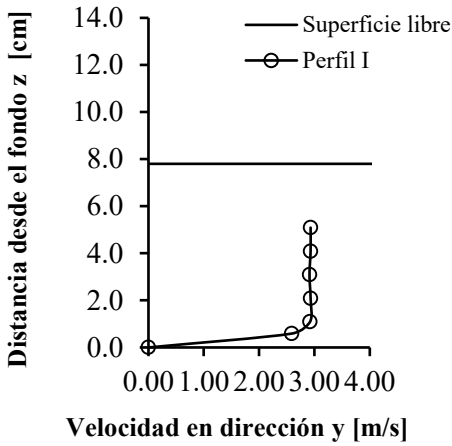
Q [l/s]= 192.59		Caudal Q <sub>i,j</sub> [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil	-	I	II	III	IV	V	-	
Calado [cm]	6.00	5.80	5.20	4.50	3.80	3.20	3.00	
Δx [cm]	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20	
Δz [cm]	P <sub>i,j</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.78	0.59	0.00	5,387.38	6,388.20	6,415.50	5,978.70	5,089.27	0.00
0.50	1.09	0.00	3,671.85	4,357.50	4,410.00	4,200.00	3,508.05	0.00
1.00	2.09	0.00	7,562.10	9,520.00	9,240.00	9,065.00	13,049.95	0.00
1.00	3.09	0.00	7,671.30	9,800.00	9,625.00	10,968.65		
		0.00	16,953.57	15,778.00	8,758.75			
Q <sub>j</sub> [cm <sup>3</sup> /s]		ΣQ <sub>i,1</sub>	ΣQ <sub>i,2</sub>	ΣQ <sub>i,3</sub>	ΣQ <sub>i,4</sub>	ΣQ <sub>i,5</sub>	ΣQ <sub>i,6</sub>	ΣQ <sub>i,7</sub>
ΣQ <sub>j</sub> [cm <sup>3</sup> /s]		0.00	41,246.21	45,843.70	38,449.25	30,212.35	21,647.26	0.00
					177,398.77			
Q <sub>j</sub> [l/s]		ΣQ <sub>i,1</sub>	ΣQ <sub>i,2</sub>	ΣQ <sub>i,3</sub>	ΣQ <sub>i,4</sub>	ΣQ <sub>i,5</sub>	ΣQ <sub>i,6</sub>	ΣQ <sub>i,7</sub>
ΣQ <sub>j</sub> [l/s]		0.00	41.25	45.84	38.45	30.21	21.65	0.00
					177.40			

**Pendiente: 8% Caudal: 192.59 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$**

Q [l/s]= 192.59		$V^3_{i,j} * A_{i,j} [m^5/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.00	5.80	5.20	4.50	3.80	3.20	3.00
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.034	0.035	0.035	0.029	0.029	0.00
0.50	1.09	0.00	0.027	0.027	0.028	0.024	0.023	0.00
1.00	2.09	0.00	0.058	0.070	0.064	0.061	0.086	0.00
1.00	3.09	0.00	0.061	0.077	0.073	0.074		
		0.00	0.134	0.124	0.066			
		$\sum(V^3_{i,1} * A_{i,1})$	$\sum(V^3_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^3_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^3_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^3_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^3_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^3_{i,7} * A_{i,7})$
$V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		0.000	0.314	0.333	0.267	0.187	0.138	0.000
$\sum V^3_j * A_j [m^5/s^3]$								1.239
$\alpha [-]$								1.116

Q [l/s]= 192.59		$V^2_{i,j} * A_{i,j} [m^4/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6	5.8	5.2	4.5	3.8	3.2	3
$\Delta x$ [cm]		0.2	27.3	35	35	35	27.3	0.2
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.2	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.014	0.015	0.015	0.013	0.012	0.00
0.5	1.09	0.00	0.010	0.011	0.011	0.010	0.009	0.00
1	2.09	0.00	0.021	0.026	0.024	0.023	0.034	0.00
1	3.09	0.00	0.022	0.027	0.026	0.028		
		0.00	0.048	0.044	0.024			
		$\sum(V^2_{i,1} * A_{i,1})$	$\sum(V^2_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^2_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^2_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^2_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^2_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^2_{i,7} * A_{i,7})$
$V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.000	0.114	0.123	0.101	0.075	0.055	0.000
$\sum V^2_j * A_j [m^4/s^3]$								0.468
$\beta [-]$								1.054

**Pendiente: 8% Caudal: 292.85 l/s Perfiles de Velocidad**



**Pendiente: 8% Caudal: 292.85 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 292.85		Velocidad $V_{i,j}$ [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		8.50	8.30	7.70	7.00	6.30	5.70	5.50
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	2.59	2.62	2.69	2.71	2.37	0.00
0.50	1.09	0.00	2.92	2.82	2.71	2.80	2.50	0.00
1.00	2.09	0.00	2.93	2.84	2.81	2.78	2.77	0.00
1.00	3.09	0.00	2.91	2.82	2.83	2.80	2.82	0.00
1.00	4.09	0.00	2.93	2.82	2.87	2.80	2.82	0.00
1.00	5.09	0.00	2.93	2.82	2.87			
		0.00	2.93					

Q [l/s]= 292.85		Área $A_{i,j}$ [cm <sup>2</sup> ]							
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-	
Calado [cm]		8.50	8.30	7.70	7.00	6.30	5.70	5.50	
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20	
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00	
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04	
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16	
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10	
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20	
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20	
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	35.00	94.85	57.60	0.38	
1.00	5.09	0.20	27.30	108.85	84.35				
		0.58	73.98						
$\sum A_{i,1}$	$\sum A_{i,2}$	$\sum A_{i,3}$	$\sum A_{i,4}$	$\sum A_{i,5}$	$\sum A_{i,6}$	$\sum A_{i,7}$			
$A_j$ [cm <sup>2</sup> ]	1.68	223.59	265.65	241.15	216.65	152.61	1.08		
$\sum A_{v \neq 0}$ [cm <sup>2</sup> ]	1,067.72								
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]	34.676								
$\sum A_j$ [cm <sup>2</sup> ]	1,102.40								

Q [l/s]= 292.85		Caudal $Q_{i,j}$ [cm <sup>3</sup> /s]							
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-	
Calado [cm]		8.50	8.30	7.70	7.00	6.30	5.70	5.50	
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20	
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00	
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.78	0.59	0.00	5,515.15	7,152.60	7,343.70	7,398.30	5,046.68	0.00	
0.50	1.09	0.00	3,985.80	4,935.00	4,742.50	4,900.00	3,412.50	0.00	
1.00	2.09	0.00	7,998.90	9,940.00	9,835.00	9,730.00	7,562.10	0.00	
1.00	3.09	0.00	7,944.30	9,870.00	9,905.00	9,800.00	7,698.60	0.00	
1.00	4.09	0.00	7,998.90	9,870.00	10,045.00	26,558.00	16,244.05	0.00	
1.00	5.09	0.00	7,998.90	30,695.70	24,208.45				
		0.00	21,677.02						
$\sum Q_{i,1}$	$\sum Q_{i,2}$	$\sum Q_{i,3}$	$\sum Q_{i,4}$	$\sum Q_{i,5}$	$\sum Q_{i,6}$	$\sum Q_{i,7}$			
$Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]	0.00	63,118.97	72,463.30	66,079.65	58,386.30	39,963.92	0.00		
$\sum Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]	300,012.14								
$Q_j$ [l/s]	$\sum Q_{i,1}$	$\sum Q_{i,2}$	$\sum Q_{i,3}$	$\sum Q_{i,4}$	$\sum Q_{i,5}$	$\sum Q_{i,6}$	$\sum Q_{i,7}$		
$\sum Q_j$ [l/s]	0.00	63.12	72.46	66.08	58.39	39.96	0.00		
	300.01								

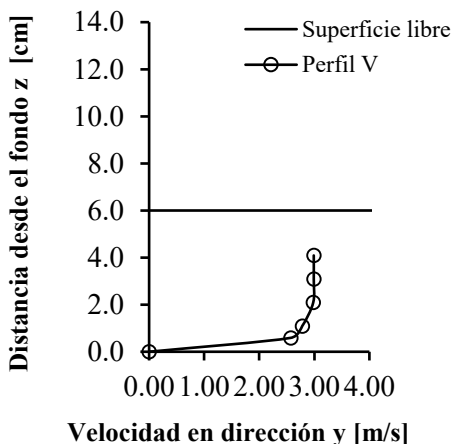
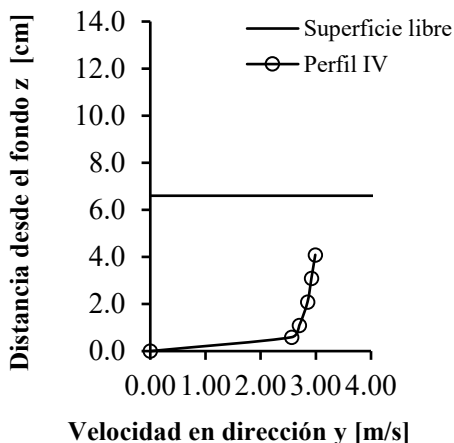
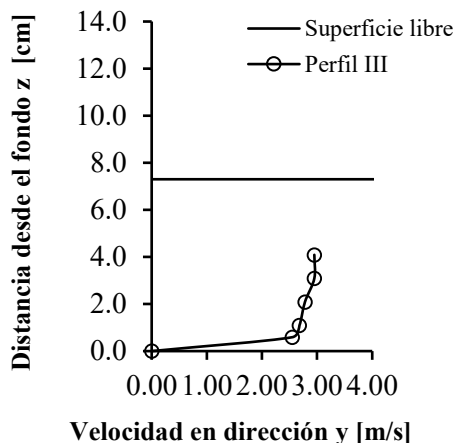
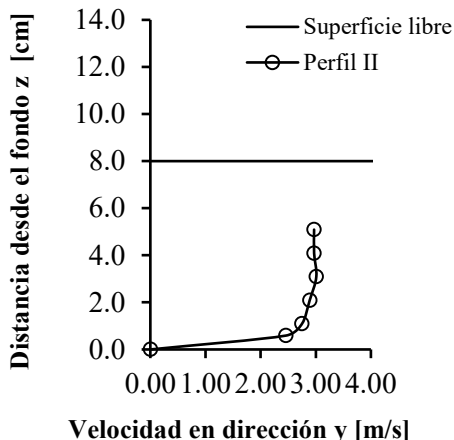
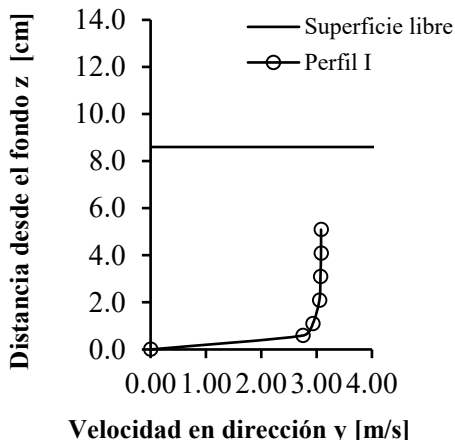
**Pendiente: 8%    Caudal: 292.85 l/s    Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$**

Q [l/s]= 292.85		V <sup>3</sup> <sub>ij</sub> * A <sub>ij</sub> [m <sup>5</sup> /s <sup>3</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		8.50	8.30	7.70	7.00	6.30	5.70	5.50
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.037	0.049	0.053	0.054	0.028	0.00
0.50	1.09	0.00	0.034	0.039	0.035	0.038	0.021	0.00
1.00	2.09	0.00	0.069	0.080	0.078	0.075	0.058	0.00
1.00	3.09	0.00	0.067	0.078	0.079	0.077	0.061	0.00
1.00	4.09	0.00	0.069	0.078	0.083	0.208	0.129	0.00
1.00	5.09	0.00	0.069	0.244	0.199			
		0.00	0.186					
		$\sum(V^{3}_{i,1} * A_{i,1})$	$\sum(V^{3}_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^{3}_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^{3}_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^{3}_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^{3}_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^{3}_{i,7} * A_{i,7})$
V <sup>3</sup> <sub>j</sub> * A <sub>j</sub> [m <sup>5</sup> /s <sup>3</sup> ]		0.000	0.530	0.570	0.527	0.453	0.298	0.000
$\sum V^3_j * A_j$ [m <sup>5</sup> /s <sup>3</sup> ]								2.378
$\alpha$ [-]								1.070

Q [l/s]= 292.85		V <sup>2</sup> <sub>ij</sub> * A <sub>ij</sub> [m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		8.5	8.3	7.7	7	6.3	5.7	5.5
$\Delta x$ [cm]		0.2	27.3	35	35	35	27.3	0.2
$\Delta z$ [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.2	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.014	0.019	0.020	0.020	0.012	0.00
0.5	1.09	0.00	0.012	0.014	0.013	0.014	0.009	0.00
1	2.09	0.00	0.023	0.028	0.028	0.027	0.021	0.00
1	3.09	0.00	0.023	0.028	0.028	0.027	0.022	0.00
1	4.09	0.00	0.023	0.028	0.029	0.074	0.046	0.00
1	5.09	0.00	0.023	0.087	0.069			
		0.00	0.064					
		$\sum(V^2_{i,1} * A_{i,1})$	$\sum(V^2_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^2_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^2_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^2_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^2_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^2_{i,7} * A_{i,7})$
V <sup>2</sup> <sub>j</sub> * A <sub>j</sub> [m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> ]		0.000	0.183	0.203	0.187	0.163	0.109	0.000
$\sum V^2_j * A_j$ [m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> ]								0.844
$\beta$ [-]								1.034



### Pendiente: 8% Caudal: 379.69 l/s Perfiles de Velocidad



**Pendiente: 8% Caudal: 379.69 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 379.69		Velocidad $V_{i,j}$ [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		8.80	8.60	8.00	7.30	6.60	6.00	5.80
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	2.75	2.46	2.55	2.56	2.57	0.00
0.50	1.09	0.00	2.93	2.75	2.68	2.70	2.78	0.00
1.00	2.09	0.00	3.05	2.89	2.78	2.85	2.98	0.00
1.00	3.09	0.00	3.07	3.01	2.95	2.92	2.99	0.00
1.00	4.09	0.00	3.08	2.97	2.95	2.99	2.99	0.00
1.00	5.09	0.00	3.08	2.97	2.95	2.99	2.99	0.00
		0.00	3.08	2.97				

Q [l/s]= 379.69		Área $A_{i,j}$ [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		8.80	8.60	8.00	7.30	6.60	6.00	5.80
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.44
1.00	5.09	0.20	27.30	35.00	94.85	70.35	38.49	
		0.64	82.17	84.35				
		$\sum A_{i,1}$	$\sum A_{i,2}$	$\sum A_{i,3}$	$\sum A_{i,4}$	$\sum A_{i,5}$	$\sum A_{i,6}$	$\sum A_{i,7}$
$A_j$ [cm <sup>2</sup> ]		1.74	231.78	276.15	251.65	227.15	160.80	1.14
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]		1115.60						
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]		34.796						
$\sum A_j$ [cm <sup>2</sup> ]		1150.4						

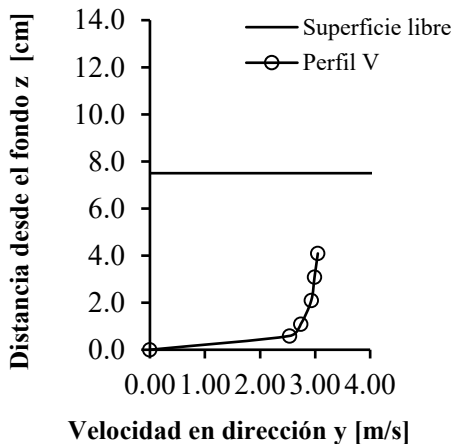
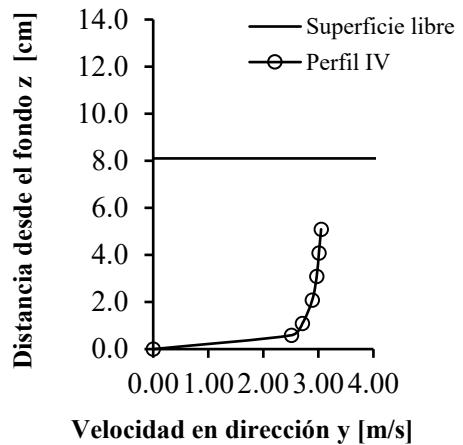
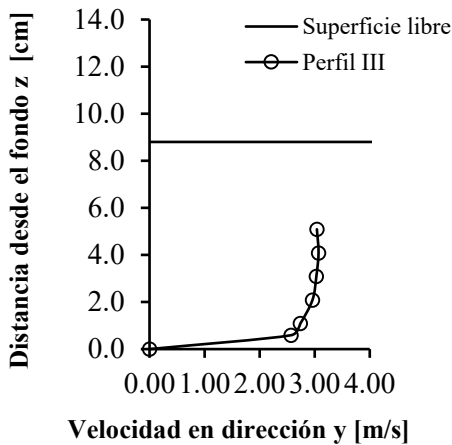
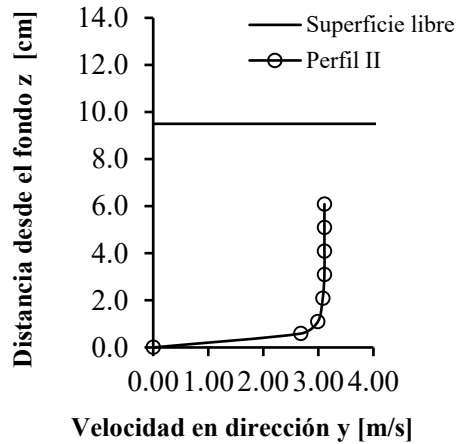
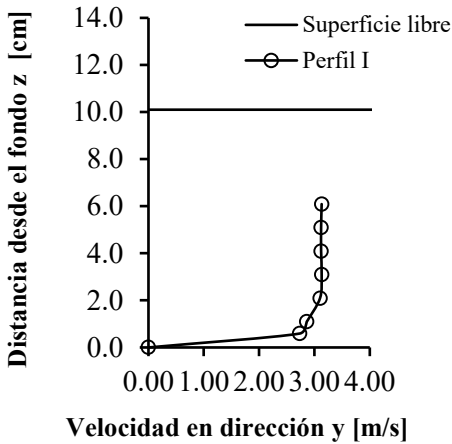
Q [l/s]= 379.69		Caudal $Q_{i,j}$ [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		8.80	8.60	8.00	7.30	6.60	6.00	5.80
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	5,855.85	6,715.80	6,961.50	6,988.80	5,472.56	0.00
0.50	1.09	0.00	3,999.45	4,812.50	4,690.00	4,725.00	3,794.70	0.00
1.00	2.09	0.00	8,326.50	10,115.00	9,730.00	9,975.00	8,135.40	0.00
1.00	3.09	0.00	8,381.10	10,535.00	10,325.00	10,220.00	8,162.70	0.00
1.00	4.09	0.00	8,408.40	10,395.00	10,325.00	10,465.00	8,162.70	0.00
1.00	5.09	0.00	8,408.40	10,395.00	27,980.75	21,034.65	11,509.41	
		0.00	25,309.28	25,051.95				
		$\sum Q_{i,1}$	$\sum Q_{i,2}$	$\sum Q_{i,3}$	$\sum Q_{i,4}$	$\sum Q_{i,5}$	$\sum Q_{i,6}$	$\sum Q_{i,7}$
$Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]		0.00	68,688.98	78,020.25	70,012.25	63,408.45	45,237.47	0.00
$\sum Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]		325,367.40						
		$\sum Q_{i,1}$	$\sum Q_{i,2}$	$\sum Q_{i,3}$	$\sum Q_{i,4}$	$\sum Q_{i,5}$	$\sum Q_{i,6}$	$\sum Q_{i,7}$
$Q_j$ [l/s]		0.00	68.69	78.02	70.01	63.41	45.24	0.00
$\sum Q_j$ [l/s]		325.37						

**Pendiente: 8% Caudal: 379.69 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$**

Q [l/s]= 379.69		$V^3_{i,j} * A_{i,j} [m^5/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		8.80	8.60	8.00	7.30	6.60	6.00	5.80
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.044	0.041	0.045	0.046	0.036	0.00
0.50	1.09	0.00	0.034	0.036	0.034	0.034	0.029	0.00
1.00	2.09	0.00	0.077	0.084	0.075	0.081	0.072	0.00
1.00	3.09	0.00	0.079	0.095	0.090	0.087	0.073	0.00
1.00	4.09	0.00	0.080	0.092	0.090	0.094	0.073	0.00
1.00	5.09	0.00	0.080	0.092	0.244	0.188	0.103	
		0.00	0.240	0.221				
		$\sum(V^3_{i,1} * A_{i,1})$	$\sum(V^3_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^3_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^3_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^3_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^3_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^3_{i,7} * A_{i,7})$
$V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		0.000	0.635	0.661	0.577	0.530	0.387	0.000
$\sum V^3_j * A_j [m^5/s^3]$								2.790
$\alpha [-]$								1.072

Q [l/s]= 379.69		$V^2_{i,j} * A_{i,j} [m^4/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		8.8	8.6	8	7.3	6.6	6	5.8
$\Delta x$ [cm]		0.2	27.3	35	35	35	27.3	0.2
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.2	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.016	0.017	0.018	0.018	0.014	0.00
0.5	1.09	0.00	0.012	0.013	0.013	0.013	0.011	0.00
1	2.09	0.00	0.025	0.029	0.027	0.028	0.024	0.00
1	3.09	0.00	0.026	0.032	0.030	0.030	0.024	0.00
1	4.09	0.00	0.026	0.031	0.030	0.031	0.024	0.00
1	5.09	0.00	0.026	0.031	0.083	0.063	0.034	
		0.00	0.078	0.074				
		$\sum(V^2_{i,1} * A_{i,1})$	$\sum(V^2_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^2_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^2_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^2_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^2_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^2_{i,7} * A_{i,7})$
$V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.000	0.209	0.227	0.201	0.183	0.132	0.000
$\sum V^2_j * A_j [m^4/s^3]$								0.952
$\beta [-]$								1.034

**Pendiente: 8% Caudal: 450.75 l/s Perfiles de Velocidad**



**Pendiente: 8% Caudal: 450.75 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 450.75		Velocidad $V_{i,j}$ [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		10.30	10.10	9.50	8.80	8.10	7.50	7.30
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	2.73	2.68	2.57	2.51	2.54	0.00
0.50	1.09	0.00	2.86	2.99	2.74	2.71	2.74	0.00
1.00	2.09	0.00	3.10	3.08	2.96	2.89	2.93	0.00
1.00	3.09	0.00	3.13	3.11	3.03	2.97	2.99	0.00
1.00	4.09	0.00	3.12	3.11	3.07	3.01	3.05	0.00
1.00	5.09	0.00	3.12	3.11	3.04	3.05	3.05	0.00
1.00	6.09	0.00	3.13	3.11	3.04	3.05		
		0.00	3.13	3.11				

Q [l/s]= 450.75		Área $A_{i,j}$ [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		10.30	10.10	9.50	8.80	8.10	7.50	7.30
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	5.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	79.44	0.54
1.00	6.09	0.20	27.30	35.00	112.35	87.85		
		0.74	95.82	101.85				
$\sum A_{i,1}$		2.04	272.73	328.65	304.15	279.65	201.75	1.44
$\sum A_{v \neq 0}$ [cm <sup>2</sup> ]					1355.00			
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]					35.396			
$\sum A_j$ [cm <sup>2</sup> ]					1390.4			

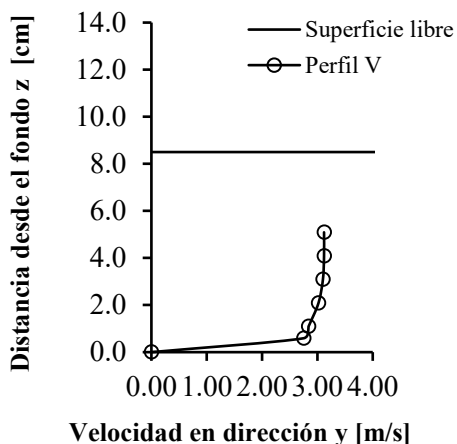
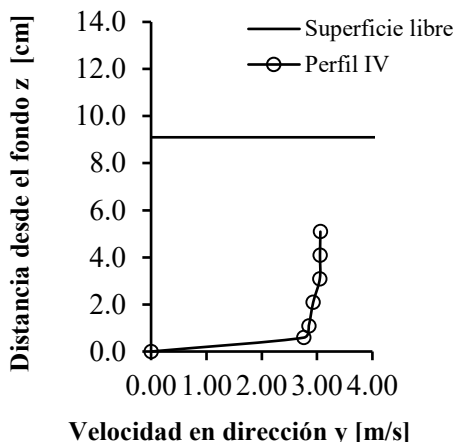
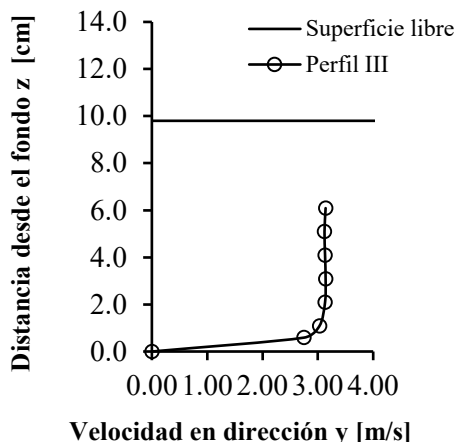
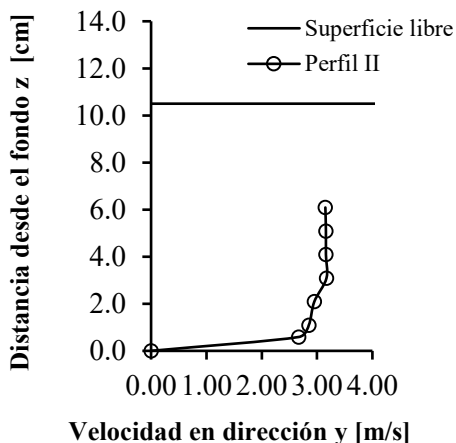
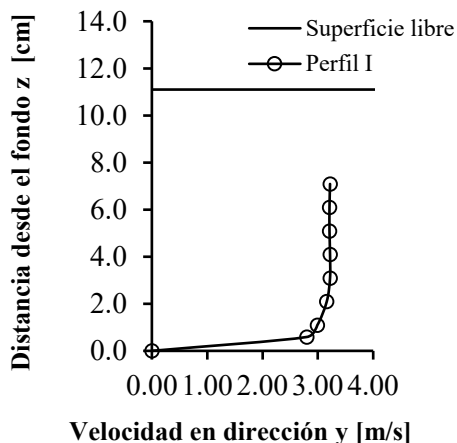
Q [l/s]= 450.75		Caudal $Q_{i,j}$ [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		10.30	10.10	9.50	8.80	8.10	7.50	7.30
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	5,813.26	7,316.40	7,016.10	6,852.30	5,408.68	0.00
0.50	1.09	0.00	3,903.90	5,232.50	4,795.00	4,742.50	3,740.10	0.00
1.00	2.09	0.00	8,463.00	10,780.00	10,360.00	10,115.00	7,998.90	0.00
1.00	3.09	0.00	8,544.90	10,885.00	10,605.00	10,395.00	8,162.70	0.00
1.00	4.09	0.00	8,517.60	10,885.00	10,745.00	10,535.00	8,326.50	0.00
1.00	5.09	0.00	8,517.60	10,885.00	10,640.00	10,675.00	24,230.12	0.00
1.00	6.09	0.00	8,544.90	10,885.00	34,154.40	26,794.25		
		0.00	29,992.60	31,675.35				
$\sum Q_{i,1}$		0.00	82,297.76	98,544.25	88,315.50	80,109.05	57,866.99	0.00
$Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]					407,133.55			
$\sum Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]								
$\sum Q_{i,1}$		0.00	82.30	98.54	88.32	80.11	57.87	0.00
$Q_j$ [l/s]					407.13			
$\sum Q_j$ [l/s]								

**Pendiente: 8% Caudal: 450.75 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$**

Q [l/s]= 450.75		$V^3_{ij} * A_{ij} [m^5/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		10.30	10.10	9.50	8.80	8.10	7.50	7.30
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0433	0.0525	0.0463	0.0432	0.0349	0.00
0.50	1.09	0.00	0.0319	0.0468	0.0360	0.0348	0.0281	0.00
1.00	2.09	0.00	0.0813	0.1023	0.0908	0.0845	0.0687	0.00
1.00	3.09	0.00	0.0837	0.1053	0.0974	0.0917	0.0730	0.00
1.00	4.09	0.00	0.0829	0.1053	0.1013	0.0954	0.0775	0.00
1.00	5.09	0.00	0.0829	0.1053	0.0983	0.0993	0.2254	0.00
1.00	6.09	0.00	0.0837	0.1053	0.3156	0.2493		0.00
		0.00	0.2938	0.3064				
		$\sum(V^3_{i,1} * A_{i,1})$	$\sum(V^3_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^3_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^3_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^3_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^3_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^3_{i,7} * A_{i,7})$
$V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		0.000	0.784	0.929	0.786	0.698	0.507	0.000
$\sum V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		3.704						
$\alpha [-]$		1.061						

Q [l/s]= 450.75		$V^2_{ij} * A_{ij} [m^4/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		10.30	10.10	9.50	8.80	8.10	7.50	7.30
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0159	0.0196	0.0180	0.0172	0.0137	0.00
0.50	1.09	0.00	0.0112	0.0156	0.0131	0.0129	0.0102	0.00
1.00	2.09	0.00	0.0262	0.0332	0.0307	0.0292	0.0234	0.00
1.00	3.09	0.00	0.0267	0.0339	0.0321	0.0309	0.0244	0.00
1.00	4.09	0.00	0.0266	0.0339	0.0330	0.0317	0.0254	0.00
1.00	5.09	0.00	0.0266	0.0339	0.0323	0.0326	0.0739	0.00
1.00	6.09	0.00	0.0267	0.0339	0.1038	0.0817		0.00
		0.00	0.0939	0.0985				
		$\sum(V^2_{i,1} * A_{i,1})$	$\sum(V^2_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^2_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^2_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^2_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^2_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^2_{i,7} * A_{i,7})$
$V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.000	0.254	0.302	0.263	0.236	0.171	0.000
$\sum V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		1.227						
$\beta [-]$		1.029						

**Pendiente: 8% Caudal: 535.14 l/s Perfiles de Velocidad**



El calado en las aceras era tan pequeño que no se pudo determinar un perfil de velocidades.

**Pendiente: 8% Caudal: 535.14 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 535.14		Velocidad $V_{i,j}$ [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		11.30	11.10	10.50	9.80	9.10	8.50	8.30
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	2.80	2.67	2.75	2.76	2.75	0.00
0.50	1.09	0.00	2.99	2.85	3.03	2.85	2.84	0.00
1.00	2.09	0.00	3.16	2.95	3.13	2.93	3.02	0.00
1.00	3.09	0.00	3.22	3.17	3.14	3.05	3.10	0.00
1.00	4.09	0.00	3.22	3.16	3.13	3.05	3.12	0.00
1.00	5.09	0.00	3.21	3.16	3.12	3.06	3.12	0.00
1.00	6.09	0.00	3.21	3.15	3.14	3.06	3.12	0.00
1.00	7.09	0.00	3.22	3.15	3.14			0.00
		0.00	3.22					

Q [l/s]= 535.14		Área $A_{i,j}$ [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		11.30	11.10	10.50	9.80	9.10	8.50	8.30
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	5.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	6.09	0.20	27.30	35.00	35.00	122.85	79.44	0.54
1.00	7.09	0.20	27.30	136.85	112.35			
		0.74	95.82					
$\sum A_{i,1}$		2.24	300.03	363.65	339.15	314.65	229.05	1.64
$\sum A_{j \neq 0}$ [cm <sup>2</sup> ]		1,514.60						
$\sum A_{j=0}$ [cm <sup>2</sup> ]		35.80						
$\sum A_j$ [cm <sup>2</sup> ]		1,550.40						

Q [l/s]= 535.14		Caudal $Q_{i,j}$ [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		11.30	11.10	10.50	9.80	9.10	8.50	8.30
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	5,962.32	7,289.10	7,507.50	7,534.80	5,855.85	0.00
0.50	1.09	0.00	4,081.35	4,987.50	5,302.50	4,987.50	3,876.60	0.00
1.00	2.09	0.00	8,626.80	10,325.00	10,955.00	10,255.00	8,244.60	0.00
1.00	3.09	0.00	8,790.60	11,095.00	10,990.00	10,675.00	8,463.00	0.00
1.00	4.09	0.00	8,790.60	11,060.00	10,955.00	10,685.50	8,517.60	0.00
1.00	5.09	0.00	8,763.30	11,060.00	10,920.00	10,710.00	8,517.60	0.00
1.00	6.09	0.00	8,763.30	11,025.00	10,990.00	37,592.10	24,786.22	0.00
1.00	7.09	0.00	8,790.60	43,107.75	35,277.90			0.00
		0.00	30,855.01					
$\sum Q_{i,1}$		0.00	93,423.88	109,949.35	102,897.90	92,439.90	68,261.47	0.00
$\sum Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]		466,972.49						
$\sum Q_{i,1}$		0.00	93.42	109.95	102.90	92.44	68.26	0.00
$\sum Q_j$ [l/s]		466.97						

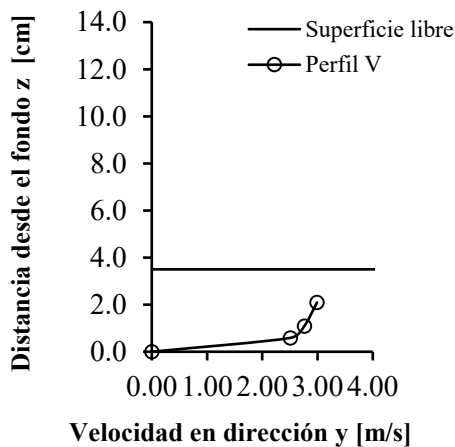
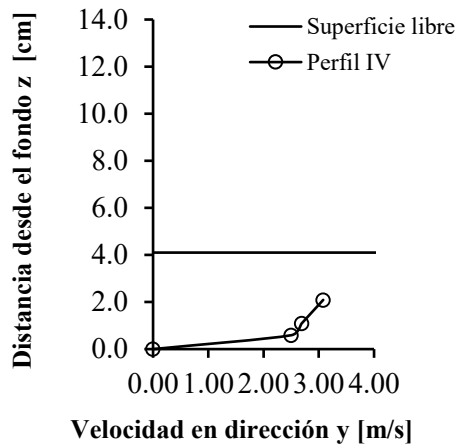
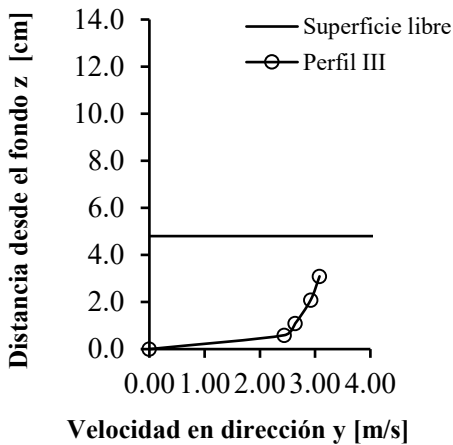
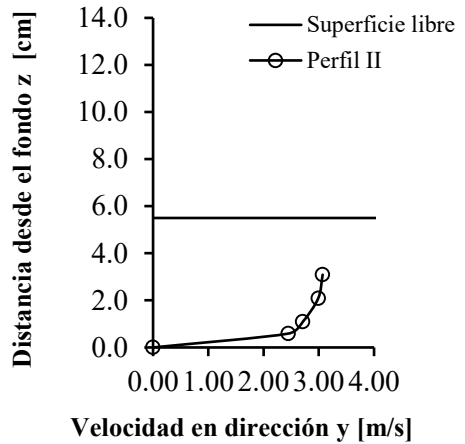
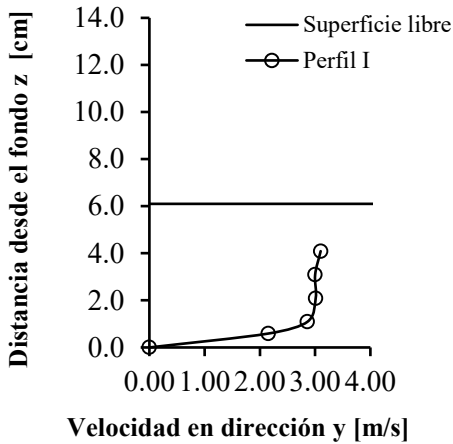


**Pendiente: 8% Caudal: 535.14 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$**

Q [l/s]= 535.14		$V^3_{i,j} * A_{i,j} [m^5/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		11.30	11.10	10.50	9.80	9.10	8.50	8.30
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0467	0.0520	0.0568	0.0574	0.0443	0.00
0.50	1.09	0.00	0.0365	0.0405	0.0487	0.0405	0.0313	0.00
1.00	2.09	0.00	0.0861	0.0899	0.1073	0.0880	0.0752	0.00
1.00	3.09	0.00	0.0911	0.1115	0.1084	0.0993	0.0813	0.00
1.00	5.09	0.00	0.0911	0.1104	0.1073	0.0996	0.0829	0.00
1.00	6.09	0.00	0.0903	0.1104	0.1063	0.1003	0.0829	0.00
1.00	7.09	0.00	0.0903	0.1094	0.1084	0.3520	0.2413	0.00
0.00	0.00	0.00	0.0911	0.4277	0.3478			
			0.3199					
$V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		0.000	0.943	1.052	0.991	0.837	0.639	0.000
$\sum V^3_j * A_j [m^5/s^3]$					4.462			
$\alpha [-]$					1.053			

Q [l/s]= 535.14		$V^2_{i,j} * A_{i,j} [m^4/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		11.30	11.10	10.50	9.80	9.10	8.50	8.30
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0167	0.0195	0.0206	0.0208	0.0161	0.00
0.50	1.09	0.00	0.0122	0.0142	0.0161	0.0142	0.0110	0.00
1.00	2.09	0.00	0.0273	0.0305	0.0343	0.0300	0.0249	0.00
1.00	3.09	0.00	0.0283	0.0352	0.0345	0.0326	0.0262	0.00
1.00	5.09	0.00	0.0283	0.0349	0.0343	0.0326	0.0266	0.00
1.00	6.09	0.00	0.0281	0.0349	0.0341	0.0328	0.0266	0.00
1.00	7.09	0.00	0.0281	0.0347	0.0345	0.1150	0.0773	0.00
0.00	0.00	0.00	0.0283	0.1358	0.1108			
			0.0994					
$V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.000	0.297	0.340	0.319	0.278	0.209	0.000
$\sum V^2_j * A_j [m^4/s^3]$					1.442			
$\beta [-]$					1.025			

**Pendiente: 10% Caudal: 200.15 l/s Perfiles de Velocidad**



**Pendiente: 10% Caudal: 200.15 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 200.15		Velocidad V <sub>i,j</sub> [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.30	6.10	5.50	4.80	4.10	3.50	3.30
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Δz [cm]	P <sub>i,j</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	2.15	2.45	2.44	2.50	2.51	0.00
0.50	1.09	0.00	2.86	2.71	2.64	2.69	2.76	0.00
1.00	2.09	0.00	3.01	2.99	2.92	3.08	2.99	0.00
1.00	3.09	0.00	3.00	3.07	3.08	3.08	2.99	0.00
1.00	4.09	0.00	3.10	3.07	3.08			
		0.00	3.10					

Q [l/s]= 200.15		Área A <sub>i,j</sub> [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.30	6.10	5.50	4.80	4.10	3.50	3.30
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Δz [cm]	P <sub>i,j</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	52.85	24.84	0.14
1.00	4.09	0.20	27.30	66.85	42.35			
		0.34	41.22					

	ΣA <sub>i,1</sub>	ΣA <sub>i,2</sub>	ΣA <sub>i,3</sub>	ΣA <sub>i,4</sub>	ΣA <sub>i,5</sub>	ΣA <sub>i,6</sub>	ΣA <sub>i,7</sub>
A <sub>j</sub> [cm <sup>2</sup> ]	1.24	163.53	188.65	164.15	139.65	92.55	0.64
ΣA <sub>v≠0</sub> [cm <sup>2</sup> ]	716.60						
ΣA <sub>v=0</sub> [cm <sup>2</sup> ]	33.796						
ΣA <sub>j</sub> [cm <sup>2</sup> ]	750.4						

Q [l/s]= 200.15		Caudal Q <sub>i,j</sub> [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.30	6.10	5.50	4.80	4.10	3.50	3.30
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Δz [cm]	P <sub>i,j</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	4,578.21	6,688.50	6,661.20	6,825.00	5,344.79	0.00
0.50	1.09	0.00	3,903.90	4,742.50	4,620.00	4,707.50	3,767.40	0.00
1.00	2.09	0.00	8,217.30	10,465.00	10,220.00	10,780.00	8,162.70	0.00
1.00	3.09	0.00	8,190.00	10,745.00	10,780.00	16,277.80	7,428.06	0.00
1.00	4.09	0.00	8,463.00	20,522.95	13,043.80			
		0.00	12,779.13					

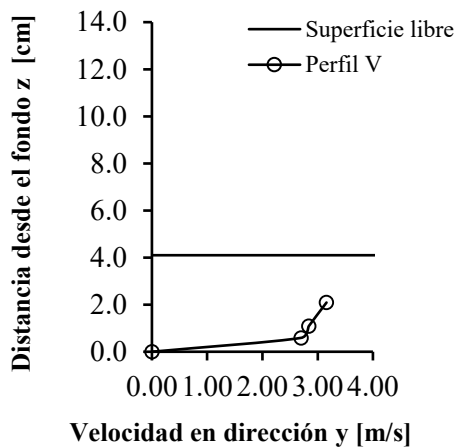
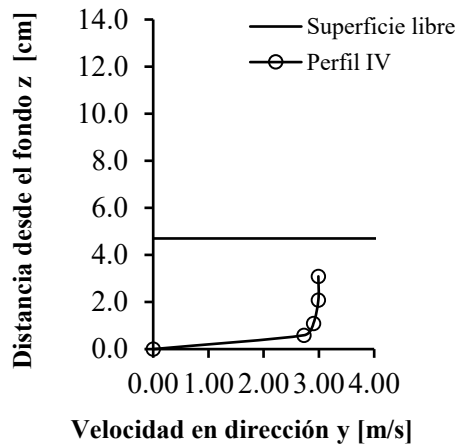
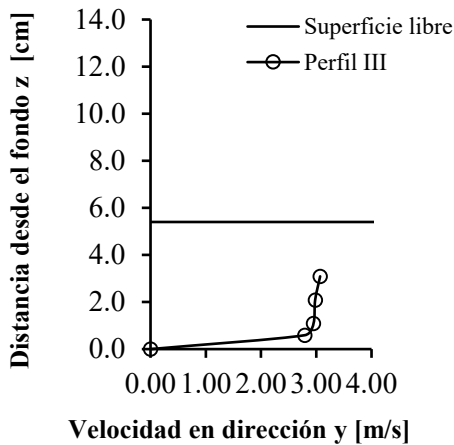
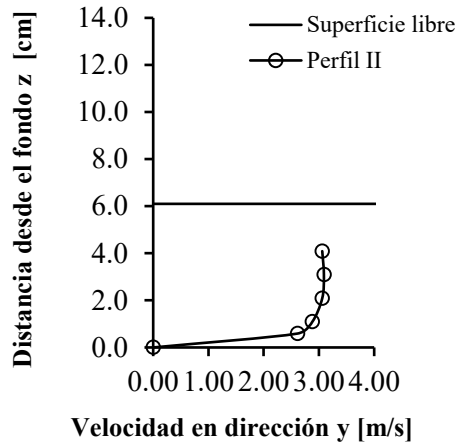
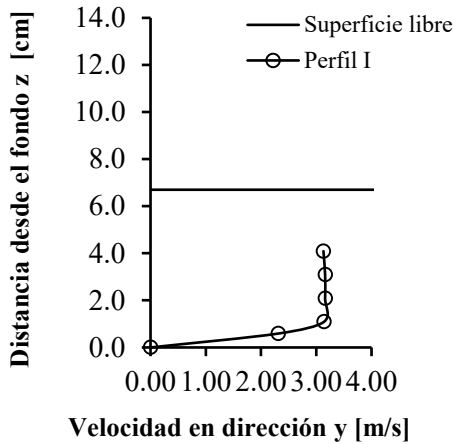
	ΣQ <sub>i,1</sub>	ΣQ <sub>i,2</sub>	ΣQ <sub>i,3</sub>	ΣQ <sub>i,4</sub>	ΣQ <sub>i,5</sub>	ΣQ <sub>i,6</sub>	ΣQ <sub>i,7</sub>
Q <sub>j</sub> [cm <sup>3</sup> /s]	0.00	46,131.54	53,163.95	45,325.00	38,590.30	24,702.95	0.00
ΣQ <sub>j</sub> [cm <sup>3</sup> /s]	207,913.74						
	ΣQ <sub>i,1</sub>	ΣQ <sub>i,2</sub>	ΣQ <sub>i,3</sub>	ΣQ <sub>i,4</sub>	ΣQ <sub>i,5</sub>	ΣQ <sub>i,6</sub>	ΣQ <sub>i,7</sub>
Q <sub>j</sub> [l/s]	0.00	46.13	53.16	45.33	38.59	24.70	0.00
ΣQ <sub>j</sub> [l/s]	207.91						

**Pendiente: 10% Caudal: 200.15 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$** 

Q [l/s]= 200.15		$V^3_{i,j} * A_{i,j} [m^5/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.30	6.10	5.50	4.80	4.10	3.50	3.30
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0212	0.0401	0.0397	0.0427	0.0337	0.00
0.50	1.09	0.00	0.0319	0.0348	0.0322	0.0341	0.0287	0.00
1.00	2.09	0.00	0.0744	0.0936	0.0871	0.1023	0.0730	0.00
1.00	3.09	0.00	0.0737	0.1013	0.1023	0.1544	0.0664	0.00
1.00	4.09	0.00	0.0813	0.1934	0.1237			
		0.00	0.1228					
		$\sum(V^3_{i,1} * A_{i,1})$	$\sum(V^3_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^3_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^3_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^3_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^3_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^3_{i,7} * A_{i,7})$
$V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		0.000	0.405	0.463	0.385	0.333	0.202	0.000
$\sum V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		1.789						
$\alpha [-]$		1.121						

Q [l/s]= 200.15		$V^2_{i,j} * A_{i,j} [m^4/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.30	6.10	5.50	4.80	4.10	3.50	3.30
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0098	0.0164	0.0163	0.0171	0.0134	0.00
0.50	1.09	0.00	0.0112	0.0129	0.0122	0.0127	0.0104	0.00
1.00	2.09	0.00	0.0247	0.0313	0.0298	0.0332	0.0244	0.00
1.00	3.09	0.00	0.0246	0.0330	0.0332	0.0501	0.0222	0.00
1.00	4.09	0.00	0.0262	0.0630	0.0402			
		0.00	0.0396					
		$\sum(V^2_{i,1} * A_{i,1})$	$\sum(V^2_{i,2} * A_{i,2})$	$\sum(V^2_{i,3} * A_{i,3})$	$\sum(V^2_{i,4} * A_{i,4})$	$\sum(V^2_{i,5} * A_{i,5})$	$\sum(V^2_{i,6} * A_{i,6})$	$\sum(V^2_{i,7} * A_{i,7})$
$V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.000	0.136	0.157	0.132	0.113	0.070	0.000
$\sum V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.608						
$\beta [-]$		1.055						

**Pendiente: 10% Caudal: 274.78 l/s Perfiles de Velocidad**



**Pendiente: 10% Caudal: 274.78 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 274.78		Velocidad V <sub>ij</sub> [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.90	6.70	6.10	5.40	4.70	4.10	3.90
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Δz [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	2.31	2.61	2.79	2.73	2.70	0.00
0.50	1.09	0.00	3.14	2.88	2.95	2.90	2.84	0.00
1.00	2.09	0.00	3.16	3.06	2.98	2.99	3.16	0.00
1.00	3.09	0.00	3.16	3.09	3.07	2.99	3.16	0.00
1.00	4.09	0.00	3.13	3.06	3.07	2.99		
		0.00	3.13	3.06				

Q [l/s]= 274.78		Área A <sub>ij</sub> [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.90	6.70	6.10	5.40	4.70	4.10	3.90
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Δz [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	41.22	0.26
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	63.35	38.85		
		0.46	57.60	52.85				
		ΣA <sub>i,1</sub>	ΣA <sub>i,2</sub>	ΣA <sub>i,3</sub>	ΣA <sub>i,4</sub>	ΣA <sub>i,5</sub>	ΣA <sub>i,6</sub>	ΣA <sub>i,7</sub>
A <sub>j</sub> [cm <sup>2</sup> ]		1.36	179.91	209.65	185.15	160.65	108.93	0.76
ΣA <sub>v=0</sub> [cm <sup>2</sup> ]					812.36			
ΣA <sub>v=0</sub> [cm <sup>2</sup> ]					34.036			
ΣA <sub>j</sub> [cm <sup>2</sup> ]					846.4			

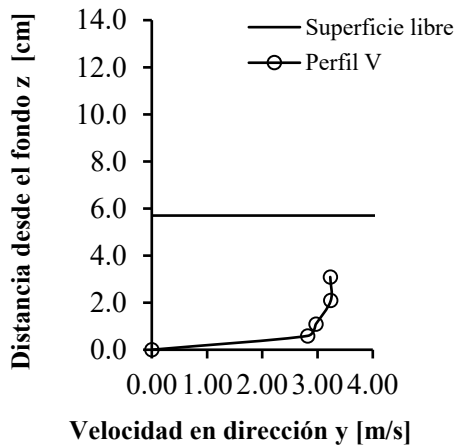
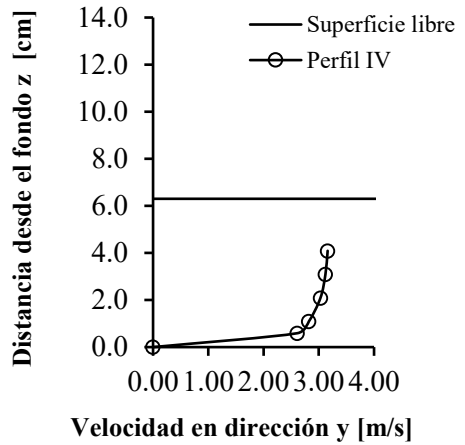
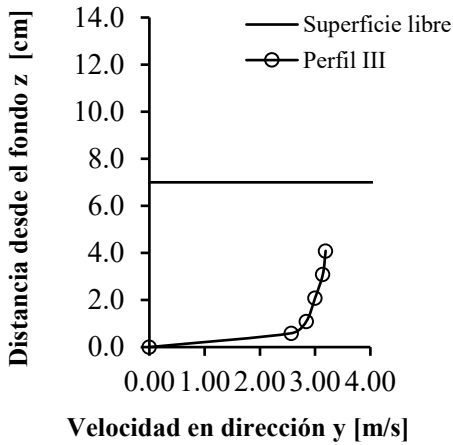
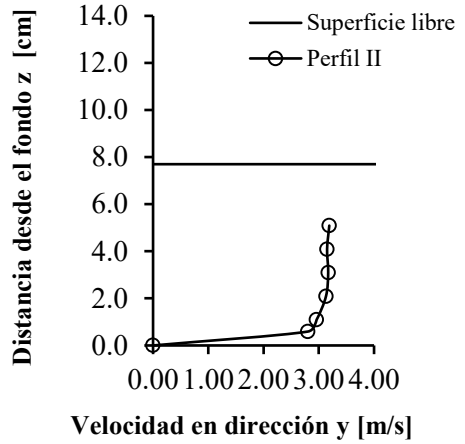
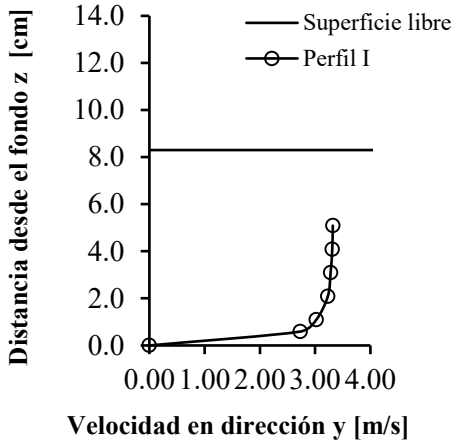
Q [l/s]= 274.78		Caudal Q <sub>ij</sub> [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.90	6.70	6.10	5.40	4.70	4.10	3.90
Δx [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
Δz [cm]	P <sub>ij</sub> [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	4,918.91	7,125.30	7,616.70	7,452.90	5,749.38	0.00
0.50	1.09	0.00	4,286.10	5,040.00	5,162.50	5,075.00	3,876.60	0.00
1.00	2.09	0.00	8,626.80	10,710.00	10,430.00	10,465.00	8,626.80	0.00
1.00	3.09	0.00	8,626.80	10,815.00	10,745.00	10,465.00	13,026.47	0.00
1.00	4.09	0.00	8,544.90	10,710.00	19,448.45	11,616.15		
		0.00	18,029.74	16,172.10				
		ΣQ <sub>i,1</sub>	ΣQ <sub>i,2</sub>	ΣQ <sub>i,3</sub>	ΣQ <sub>i,4</sub>	ΣQ <sub>i,5</sub>	ΣQ <sub>i,6</sub>	ΣQ <sub>i,7</sub>
Q <sub>j</sub> [cm <sup>3</sup> /s]		0.00	53,033.25	60,572.40	53,402.65	45,074.05	31,279.25	0.00
ΣQ <sub>j</sub> [cm <sup>3</sup> /s]					243,361.60			
		ΣQ <sub>i,1</sub>	ΣQ <sub>i,2</sub>	ΣQ <sub>i,3</sub>	ΣQ <sub>i,4</sub>	ΣQ <sub>i,5</sub>	ΣQ <sub>i,6</sub>	ΣQ <sub>i,7</sub>
Q <sub>j</sub> [l/s]		0.00	53.03	60.57	53.40	45.07	31.28	0.00
ΣQ <sub>j</sub> [l/s]					243.36			

**Pendiente: 10% Caudal: 274.78 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$**

Q [l/s]= 274.78		$V^3_{i,j} * A_{i,j} [m^5/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.90	6.70	6.10	5.40	4.70	4.10	3.90
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0262	0.0485	0.0593	0.0555	0.0419	0.00
0.50	1.09	0.00	0.0423	0.0418	0.0449	0.0427	0.0313	0.00
1.00	2.09	0.00	0.0861	0.1003	0.0926	0.0936	0.0861	0.00
1.00	3.09	0.00	0.0861	0.1033	0.1013	0.0936	0.1301	0.00
1.00	4.09	0.00	0.0837	0.1003	0.1833	0.1038		
		0.00	0.1766	0.1514				
		$\Sigma(V^3_{i,1} * A_{i,1})$	$\Sigma(V^3_{i,2} * A_{i,2})$	$\Sigma(V^3_{i,3} * A_{i,3})$	$\Sigma(V^3_{i,4} * A_{i,4})$	$\Sigma(V^3_{i,5} * A_{i,5})$	$\Sigma(V^3_{i,6} * A_{i,6})$	$\Sigma(V^3_{i,7} * A_{i,7})$
$V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		0.000	0.501	0.546	0.481	0.389	0.289	0.000
$\Sigma V^3_j * A_j [m^5/s^3]$								2.207
$\alpha [-]$								1.097

Q [l/s]= 274.78		$V^2_{i,j} * A_{i,j} [m^4/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		6.90	6.70	6.10	5.40	4.70	4.10	3.90
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0114	0.0186	0.0213	0.0203	0.0155	0.00
0.50	1.09	0.00	0.0135	0.0145	0.0152	0.0147	0.0110	0.00
1.00	2.09	0.00	0.0273	0.0328	0.0311	0.0313	0.0273	0.00
1.00	3.09	0.00	0.0273	0.0334	0.0330	0.0313	0.0412	0.00
1.00	4.09	0.00	0.0267	0.0328	0.0597	0.0347		
		0.00	0.0564	0.0495				
		$\Sigma(V^2_{i,1} * A_{i,1})$	$\Sigma(V^2_{i,2} * A_{i,2})$	$\Sigma(V^2_{i,3} * A_{i,3})$	$\Sigma(V^2_{i,4} * A_{i,4})$	$\Sigma(V^2_{i,5} * A_{i,5})$	$\Sigma(V^2_{i,6} * A_{i,6})$	$\Sigma(V^2_{i,7} * A_{i,7})$
$V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.000	0.163	0.182	0.160	0.132	0.095	0.000
$\Sigma V^2_j * A_j [m^4/s^3]$								0.732
$\beta [-]$								1.046

**Pendiente: 10% Caudal: 385.98 l/s Perfiles de Velocidad**





**Pendiente: 10% Caudal: 385.98 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 385.98		Velocidad $V_{i,j}$ [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		8.50	8.30	7.70	7.00	6.30	5.70	5.50
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	2.73	2.80	2.57	2.61	2.82	0.00
0.50	1.09	0.00	3.02	2.96	2.84	2.82	2.97	0.00
1.00	2.09	0.00	3.23	3.13	3.00	3.03	3.24	0.00
1.00	3.09	0.00	3.28	3.17	3.14	3.12	3.23	0.00
1.00	4.09	0.00	3.31	3.15	3.19	3.16	3.23	0.00
1.00	5.09	0.00	3.32	3.19	3.19	3.16		0.00
		0.00	3.32	3.19				

Q [l/s]= 385.98		Área $A_{i,j}$ [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		8.50	8.30	7.70	7.00	6.30	5.70	5.50
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	57.60	0.38
1.00	5.09	0.20	27.30	35.00	84.35	59.85		
		0.58	73.98	73.85				
$\sum A_{i,1}$	$\sum A_{i,2}$	$\sum A_{i,3}$	$\sum A_{i,4}$	$\sum A_{i,5}$	$\sum A_{i,6}$	$\sum A_{i,7}$		
$A_j$ [cm <sup>2</sup> ]	1.68	223.59	265.65	241.15	216.65	152.61	1.08	
$\sum A_{v \neq 0}$ [cm <sup>2</sup> ]	1067.72							
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]	34.676							
$\sum A_j$ [cm <sup>2</sup> ]	1102.4							

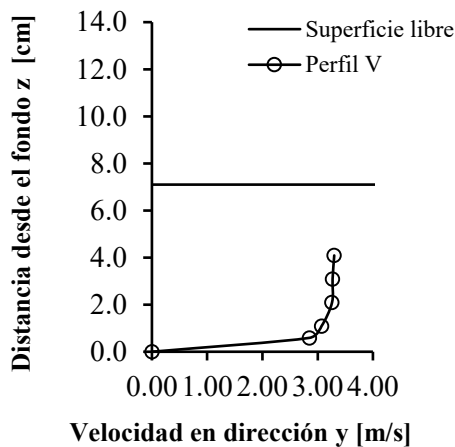
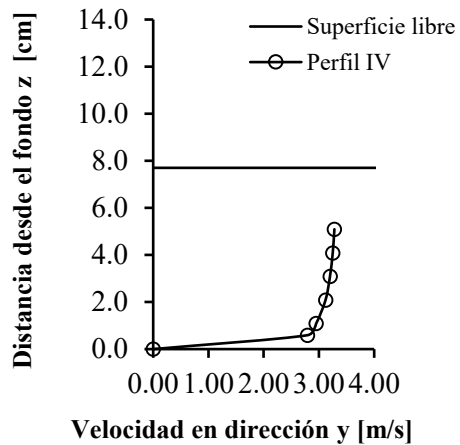
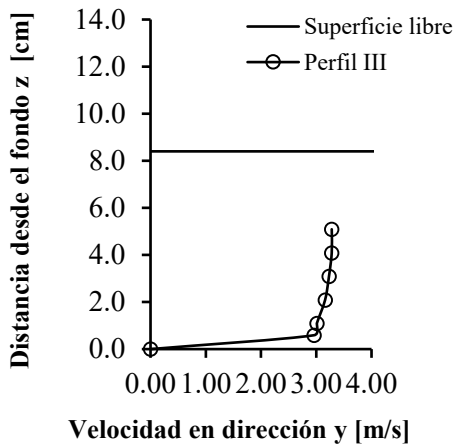
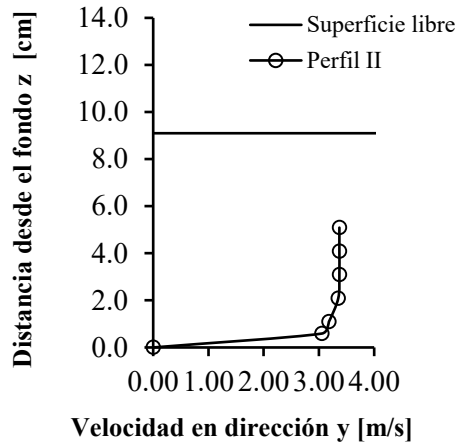
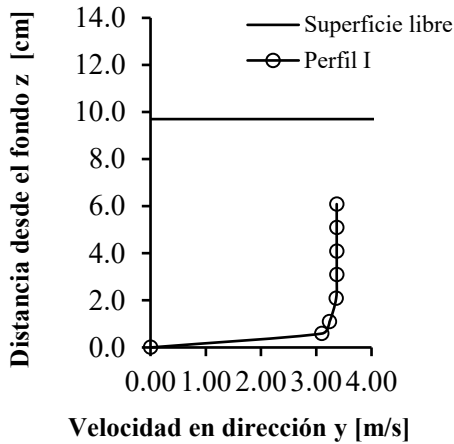
Q [l/s]= 385.98		Caudal $Q_{i,j}$ [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		8.50	8.30	7.70	7.00	6.30	5.70	5.50
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	5,813.26	7,644.00	7,016.10	7,125.30	6,004.91	0.00
0.50	1.09	0.00	4,122.30	5,180.00	4,970.00	4,935.00	4,054.05	0.00
1.00	2.09	0.00	8,817.90	10,955.00	10,500.00	10,605.00	8,845.20	0.00
1.00	3.09	0.00	8,954.40	11,095.00	10,990.00	10,920.00	8,817.90	0.00
1.00	4.09	0.00	9,036.30	11,025.00	11,165.00	11,060.00	18,605.77	0.00
1.00	5.09	0.00	9,063.60	11,165.00	26,907.65	18,912.60		0.00
		0.00	24,562.36	23,558.15				
$\sum Q_{i,1}$	$\sum Q_{i,2}$	$\sum Q_{i,3}$	$\sum Q_{i,4}$	$\sum Q_{i,5}$	$\sum Q_{i,6}$	$\sum Q_{i,7}$		
$Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]	0.00	70,370.12	80,622.15	71,548.75	63,557.90	46,327.83	0.00	
$\sum Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]	332,426.75							
$Q_j$ [l/s]	0.00	70.37	80.62	71.55	63.56	46.33	0.00	
$\sum Q_j$ [l/s]	332.43							

**Pendiente: 10% Caudal: 385.98 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$** 

Q [l/s]= 385.98		$V^3_{ij} * A_{ij} [m^5/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		8.50	8.30	7.70	7.00	6.30	5.70	5.50
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.043	0.060	0.046	0.049	0.048	0.00
0.50	1.09	0.00	0.038	0.045	0.040	0.039	0.036	0.00
1.00	2.09	0.00	0.092	0.107	0.095	0.097	0.093	0.00
1.00	3.09	0.00	0.096	0.111	0.108	0.106	0.092	0.00
1.00	4.09	0.00	0.099	0.109	0.114	0.110	0.194	0.00
1.00	5.09	0.00	0.100	0.114	0.274	0.189		0.00
		0.00	0.271	0.240				
$V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		0.000	0.739	0.787	0.677	0.591	0.462	0.000
$\Sigma V^3_j * A_j [m^5/s^3]$					3.256			
$\alpha [-]$					1.077			

Q [l/s]= 385.98		$V^2_{ij} * A_{ij} [m^4/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		8.5	8.3	7.7	7	6.3	5.7	5.5
$\Delta x$ [cm]		0.2	27.3	35	35	35	27.3	0.2
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.2	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.016	0.021	0.018	0.019	0.017	0.00
0.5	1.09	0.00	0.012	0.015	0.014	0.014	0.012	0.00
1	2.09	0.00	0.028	0.034	0.032	0.032	0.029	0.00
1	3.09	0.00	0.029	0.035	0.035	0.034	0.028	0.00
1	4.09	0.00	0.030	0.035	0.036	0.035	0.060	0.00
1	5.09	0.00	0.030	0.036	0.086	0.060		0.00
		0.00	0.082	0.075				
$V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.000	0.228	0.252	0.220	0.193	0.146	0.000
$\Sigma V^2_j * A_j [m^4/s^3]$					1.039			
$\beta [-]$					1.036			

**Pendiente: 10% Caudal: 450.95 l/s Perfiles de Velocidad**



**Pendiente: 10% Caudal: 450.95 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 450.95		Velocidad $V_{ij}$ [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		9.90	9.70	9.10	8.40	7.70	7.10	6.90
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	3.10	3.05	2.96	2.79	2.85	0.00
0.50	1.09	0.00	3.24	3.18	3.01	2.95	3.07	0.00
1.00	2.09	0.00	3.36	3.35	3.16	3.12	3.26	0.00
1.00	3.09	0.00	3.37	3.37	3.23	3.20	3.27	0.00
1.00	4.09	0.00	3.37	3.37	3.28	3.25	3.30	0.00
1.00	5.09	0.00	3.37	3.37	3.28	3.28	3.30	0.00
1.00	6.09	0.00	3.37	3.37	3.28	3.28	3.30	0.00
		0.00	3.37					

Q [l/s]= 450.95		Área $A_{ij}$ [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		9.90	9.70	9.10	8.40	7.70	7.10	6.90
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	5.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.46
1.00	6.09	0.20	27.30	122.85	98.35	73.85		
		0.66	84.90					
		$\sum A_{i,1}$	$\sum A_{i,2}$	$\sum A_{i,3}$	$\sum A_{i,4}$	$\sum A_{i,5}$	$\sum A_{i,6}$	$\sum A_{i,7}$
$A_j$ [cm <sup>2</sup> ]		1.96	261.81	314.65	290.15	265.65	149.60	1.36
$\sum A_{v \neq 0}$ [cm <sup>2</sup> ]		1249.94						
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]		35.236						
$\sum A_j$ [cm <sup>2</sup> ]		1285.177						

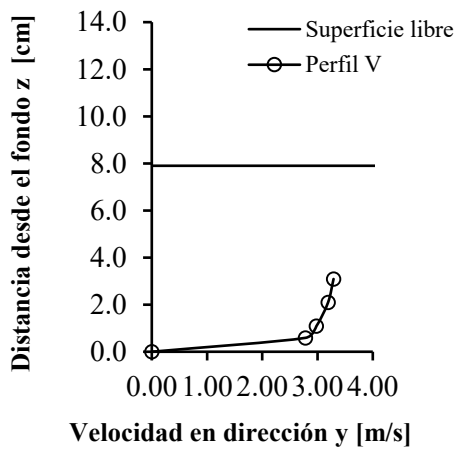
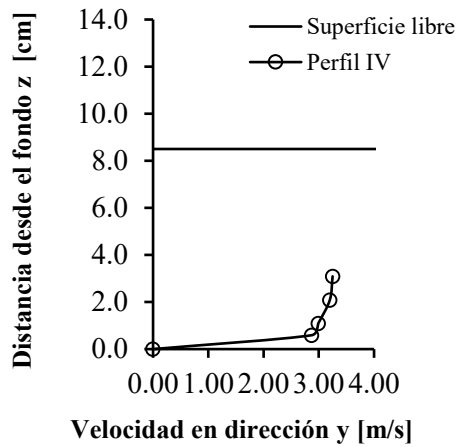
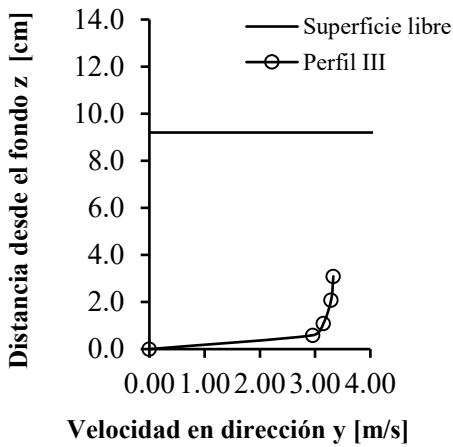
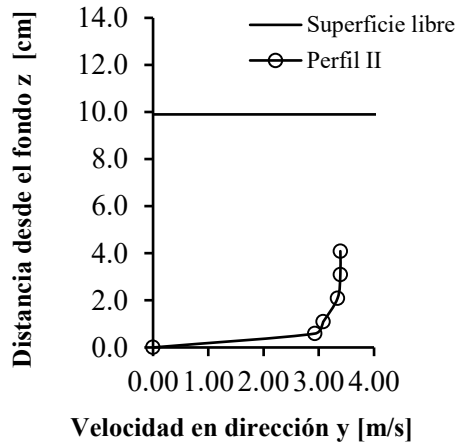
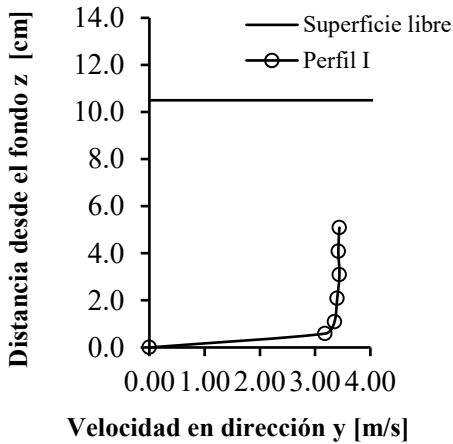
Q [l/s]= 450.95		Caudal $Q_{ij}$ [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		9.90	9.70	9.10	8.40	7.70	7.10	6.90
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	6,601.14	8,326.50	8,080.80	7,616.70	6,068.79	0.00
0.50	1.09	0.00	4,422.60	5,565.00	5,267.50	5,162.50	4,190.55	0.00
1.00	2.09	0.00	9,172.80	11,725.00	11,060.00	10,920.00	8,899.80	0.00
1.00	3.09	0.00	9,200.10	11,795.00	11,305.00	11,200.00	8,927.10	0.00
1.00	4.09	0.00	9,200.10	11,795.00	11,480.00	11,375.00	9,009.00	0.00
1.00	5.09	0.00	9,200.10	11,795.00	11,480.00	11,480.00	9,009.00	0.00
1.00	6.09	0.00	9,200.10	41,400.45	32,258.80	24,222.80		
		0.00	28,612.31					
		$\sum Q_{i,1}$	$\sum Q_{i,2}$	$\sum Q_{i,3}$	$\sum Q_{i,4}$	$\sum Q_{i,5}$	$\sum Q_{i,6}$	$\sum Q_{i,7}$
$Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]		0.00	85,609.25	102,401.95	90,932.10	81,977.00	46,104.24	0.00
$\sum Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]		407,024.54						
		$\sum Q_{i,1}$	$\sum Q_{i,2}$	$\sum Q_{i,3}$	$\sum Q_{i,4}$	$\sum Q_{i,5}$	$\sum Q_{i,6}$	$\sum Q_{i,7}$
$Q_j$ [l/s]		0.00	85.61	102.40	90.93	81.98	46.10	0.00
$\sum Q_j$ [l/s]		407.02						

**Pendiente: 10% Caudal: 450.95 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$**

Q [l/s]= 450.95		$V^3_{i,j} * A_{i,j} [m^5/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		9.90	9.70	9.10	8.40	7.70	7.10	6.90
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0634	0.0775	0.0708	0.0593	0.0493	0.00
0.50	1.09	0.00	0.0464	0.0563	0.0477	0.0449	0.0395	0.00
1.00	2.09	0.00	0.1036	0.1316	0.1104	0.1063	0.0946	0.00
1.00	4.09	0.00	0.1045	0.1340	0.1179	0.1147	0.0955	0.00
1.00	5.09	0.00	0.1045	0.1340	0.1235	0.1201	0.0981	0.00
1.00	6.09	0.00	0.1045	0.1340	0.1235	0.1235	0.0981	0.00
0.00	0.00	0.00	0.1045	0.4702	0.3471	0.2606		0.00
		0.00	0.3249					
		$\sum(V^3_{i,j} * A_{i,j})$						
$V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		0.000	0.956	1.137	0.941	0.829	0.475	0.000
$\sum V^3_j * A_j [m^5/s^3]$								
$\alpha [-]$								
		1.063						

Q [l/s]= 450.95		$V^2_{i,j} * A_{i,j} [m^4/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		9.90	9.70	9.10	8.40	7.70	7.10	6.90
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.0205	0.0254	0.0239	0.0213	0.0173	0.00
0.50	1.09	0.00	0.0143	0.0177	0.0159	0.0152	0.0129	0.00
1.00	2.09	0.00	0.0308	0.0393	0.0349	0.0341	0.0290	0.00
1.00	4.09	0.00	0.0310	0.0397	0.0365	0.0358	0.0292	0.00
1.00	5.09	0.00	0.0310	0.0397	0.0377	0.0370	0.0297	0.00
1.00	6.09	0.00	0.0310	0.0397	0.0377	0.0377	0.0297	0.00
0.00	0.00	0.00	0.0310	0.1395	0.1058	0.0795		0.00
		0.00	0.0964					
		$\sum(V^2_{i,j} * A_{i,j})$						
$V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.000	0.286	0.341	0.292	0.260	0.148	0.000
$\sum V^2_j * A_j [m^4/s^3]$								
$\beta [-]$								
		1.030						

**Pendiente: 10% Caudal: 538.78 l/s Perfiles de Velocidad**



**Pendiente: 10% Caudal: 538.78 l/s Determinación del Caudal**

Q [l/s]= 538.78		Velocidad $V_{i,j}$ [m/s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		10.70	10.50	9.90	9.20	8.50	7.90	7.70
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	3.18	2.93	2.96	2.87	2.78	0.00
0.50	1.09	0.00	3.35	3.08	3.15	2.99	2.98	0.00
1.00	2.09	0.00	3.40	3.34	3.29	3.20	3.19	0.00
1.00	3.09	0.00	3.44	3.39	3.33	3.25	3.29	0.00
1.00	4.09	0.00	3.42	3.39	3.33	3.25	3.29	0.00
1.00	5.09	0.00	3.44	3.39				
		0.00	3.44					

Q [l/s]= 538.78		Área $A_{i,j}$ [cm <sup>2</sup> ]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		10.70	10.50	9.90	9.20	8.50	7.90	7.70
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.04	5.46	7.00	7.00	7.00	5.46	0.04
0.78	0.59	0.16	21.29	27.30	27.30	27.30	21.29	0.16
0.50	1.09	0.10	13.65	17.50	17.50	17.50	13.65	0.10
1.00	2.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	3.09	0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
1.00	4.09	0.20	27.30	35.00	196.35	171.85	117.66	0.82
1.00	5.09	0.20	27.30	185.85				
		1.02	134.04					
$\sum A_{i,1}$		2.12	283.65	342.65	318.15	293.65	212.67	1.52
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]		1418.84						
$\sum A_{v=0}$ [cm <sup>2</sup> ]		35.556						
$\sum A_j$ [cm <sup>2</sup> ]		1454.4						

Q [l/s]= 538.78		Caudal $Q_{i,j}$ [cm <sup>3</sup> /s]						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		10.70	10.50	9.90	9.20	8.50	7.90	7.70
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{i,j}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	6,771.49	7,998.90	8,080.80	7,835.10	5,919.73	0.00
0.50	1.09	0.00	4,572.75	5,390.00	5,512.50	5,232.50	4,067.70	0.00
1.00	2.09	0.00	9,282.00	11,690.00	11,515.00	11,200.00	8,708.70	0.00
1.00	3.09	0.00	9,391.20	11,865.00	11,655.00	11,375.00	8,981.70	0.00
1.00	4.09	0.00	9,336.60	11,865.00	65,384.55	55,851.25	38,711.13	0.00
1.00	5.09	0.00	9,391.20	63,003.15				
		0.00	46,110.79					
$\sum Q_{i,1}$		0.00	94,856.03	111,812.05	102,147.85	91,493.85	66,388.96	0.00
$\sum Q_j$ [cm <sup>3</sup> /s]		466,698.74						
$\sum Q_{i,1}$		0.00	94.86	111.81	102.15	91.49	66.39	0.00
$\sum Q_j$ [l/s]		466.70						

**Pendiente: 10% Caudal: 538.78 l/s Determinación de  $\alpha$  y  $\beta$** 

Q [l/s]= 538.78		$V^3_{ij} * A_{ij} [m^5/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		10.70	10.50	9.90	9.20	8.50	7.90	7.70
$\Delta x$ [cm]		0.20	27.30	35.00	35.00	35.00	27.30	0.20
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0.00	10.00	45.00	80.00	115.00	150.00	160.00
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.068	0.069	0.071	0.065	0.046	0.00
0.50	1.09	0.00	0.051	0.051	0.055	0.047	0.036	0.00
1.00	2.09	0.00	0.107	0.130	0.125	0.115	0.089	0.00
1.00	3.09	0.00	0.111	0.136	0.129	0.120	0.097	0.00
1.00	4.09	0.00	0.109	0.136	0.725	0.590	0.419	0.00
1.00	5.09	0.00	0.111	0.724				
		0.00	0.546	0.000				
$V^3_j * A_j [m^5/s^3]$		0.000	1.104	1.247	1.104	0.936	0.687	0.000
$\Sigma V^3_j * A_j [m^5/s^3]$					5.078			
$\alpha [-]$					1.057			

Q [l/s]= 538.78		$V^2_{ij} * A_{ij} [m^4/s^3]$						
Id. Perfil		-	I	II	III	IV	V	-
Calado [cm]		10.7	10.5	9.9	9.2	8.5	7.9	7.7
$\Delta x$ [cm]		0.2	27.3	35	35	35	27.3	0.2
$\Delta z$ [cm]	$P_{ij}$ [cm]	0	10	45	80	115	150	160
0.2	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.78	0.59	0.00	0.022	0.023	0.024	0.022	0.016	0.00
0.5	1.09	0.00	0.015	0.017	0.017	0.016	0.012	0.00
1	2.09	0.00	0.032	0.039	0.038	0.036	0.028	0.00
1	3.09	0.00	0.032	0.040	0.039	0.037	0.030	0.00
1	4.09	0.00	0.032	0.040	0.218	0.182	0.127	0.00
1	5.09	0.00	0.032	0.214				
		0.00	0.159	0.000				
$V^2_j * A_j [m^4/s^3]$		0.000	0.324	0.373	0.336	0.292	0.213	0.000
$\Sigma V^2_j * A_j [m^4/s^3]$					1.538			
$\beta [-]$					1.027			





---

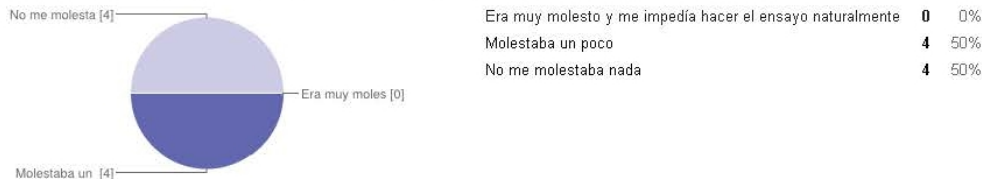
**Anejo B.**  
**Resumen de los resultados de las encuestas  
a las personas ensayadas**

---



### 1ª Encuesta. Personas ensayadas con pendiente de 4% en el modelo de plataforma

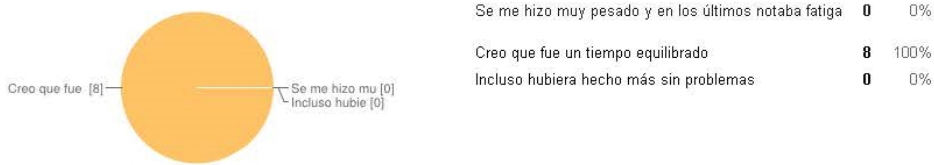
#### 1- El equipo de seguridad: casco, arnés, impermeable y cinturón:



#### Observaciones:

El cinturón se cruzaba y las gafas se clavaban No impedía caminar. De hecho el arnes daba seguridad ya que podías agarrarte a la cuerda. Especialmente me molestaba cuando giraba para dar la vuelta. el cinturón que sujetaba el arnés de seguridad molestaba al girar para hacer los cambios de trayectoria El equipo de seguridad no molestaba. Las gafas sí eran bastante incómodas y al ser duras y no ajustarse me dejaron marcas 2 o 3 días

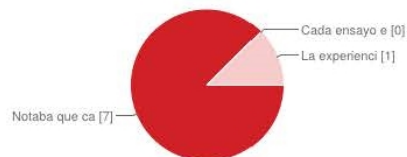
#### 2- En referencia a la duración de los ensayos:



#### Observaciones:

Más tiempo se hubiera hecho pesado Aunque hubiera hecho una mas si hubiera sido necesario

#### 3- Sobre tus sensaciones...

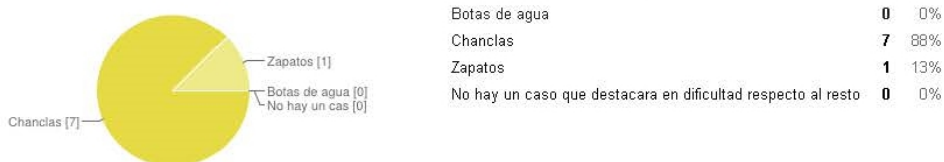


Notaba que cada vez adquiría experiencia y cada ensayo me sentía más seguro/a	7	88%
Cada ensayo era una experiencia diferente	0	0%
La experiencia adquirida no era significativa, y aunque hubiera hecho más ensayos mis sensaciones de seguridad o inseguridad serían las mismas	1	13%

#### Observaciones:

Quizas es primer ensayo te enseña un poco a caminar, pero despues de este pequeño aprendizaje no considero q se adquiera mucha mas experiencia Progresivamente vas aprendiendo a caminar en contra/a través de la corriente de agua a pesar de ir aumentando caudal-velocidad, me notaba más segura a medida que avanzaban los ensayos. Al principio esa inseguridad era debida a no saber qué ocurriría más que a la velocidad del agua

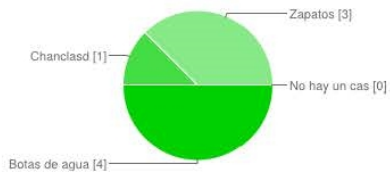
#### 4- En relación a las combinaciones de calzado utilizadas ¿Qué calzado fue con el que sentiste mayor inseguridad?



**Observaciones:**

se resbalaban, torcían dentro del agua y causaban desequilibrio. Incluso se me llegó a escapar. Las chanclas eran muy molestas y dificultaban caminar. En una situación real me las hubiera quitado. Habi que estar pendiente de que no se rompieran o salieran, me paso un par de veces. Las chanclas, debido a que he sentido la sensación de que la chancla al tener el paso del agua se convierte en una barrera al abrirse. Ademas es mas dibicil en concentrarse en no perder la chancla apretandola con los dedos y a la ves evitar caerse.

**5- ¿Y cual te dio mayor seguridad?**

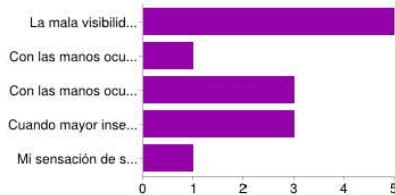


Botas de agua	4	50%
Chanclas	1	13%
Zapatos	3	38%
No hay un caso que destacara en seguridad respecto al resto	0	0%

**Observaciones:**

más libertad de movimiento que con las botas. Con tacones resulto ser mas facil de lo que pensaba. El inconveniente de las bitas es la gran resistencia que opones, aun asi es el calzado mas comodo, sobretodo para chicas. a pesar de que eran tacones... será porque ofrecían menor resistencia que las botas...

**6- En relación a la buena o mala visibilidad y manos ocupadas o no...**

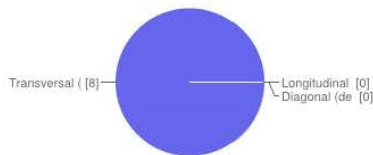


La mala visibilidad era el factor que más afectaba	5	36%
Con las manos ocupadas sentía mayor inseguridad	1	8%
Con las manos ocupadas sentía mayor seguridad y estabilidad	3	23%
Cuando mayor inseguridad sentía era con mala visibilidad y con las manos ocupadas a la vez	3	23%
Mi sensación de seguridad o inseguridad no variaba con ninguno de estos factores: manos ocupadas, mala visibilidad o ambos a la vez	1	8%

**Observaciones:**

La visibilidad afectaba bastante, creo que porque no me veía los pies. Tener las manos ocupadas no influía. La mala visibilidad al llegar al bordillo es un factor importante, no sabes si lo vas a pisar.

**7- En general ¿Qué recorrido te resultó más peligroso?**



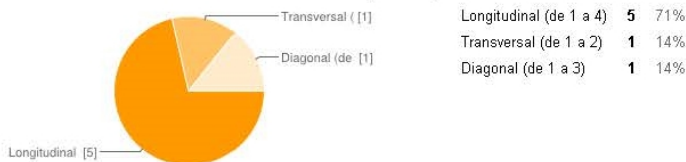
Longitudinal (de 1 a 4)	0	0%
Transversal (de 1 a 2)	8	100%
Diagonal (de 1 a 3)	0	0%

**[Image]**

**Observaciones:**

En el recorrido transversal es donde es más posible que el agua te haga caer. Longitudinalmente sientes mas la fuerza del agua pero tu peso, ya que lo desplaza un poco hacia adelante al caminar, estabiliza la pendiente.

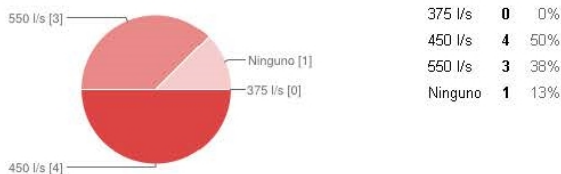
**8- ¿Y el que menos?**



**Observaciones:**

Creo que influye el sentido del recorrido además de la dirección. Por ejemplo, me pareció más fácil el ascenso longitudinal pero el descenso transversal.

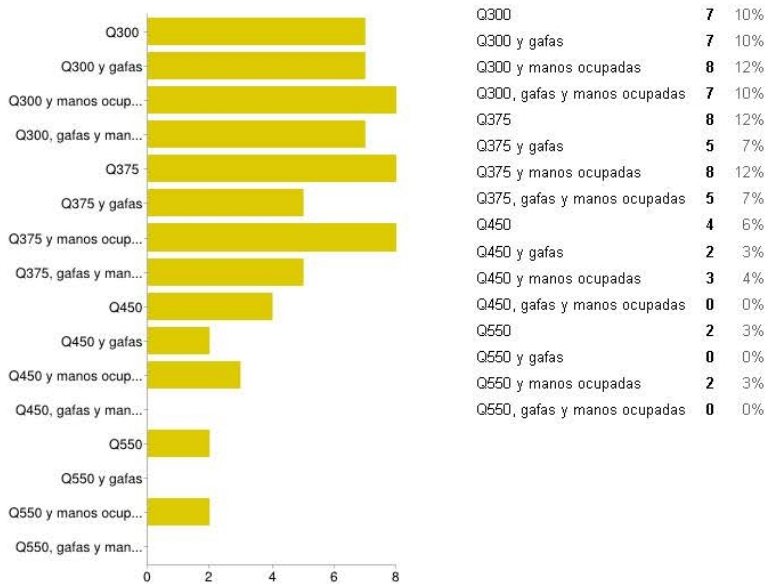
**9- ¿A partir de qué caudal empezaste a tener sensaciones de inestabilidad?**



**Observaciones:**

Solo un poco. al poner el primer pie sobre todo El momento de mayor inestabilidad fue al poner el pie por primera vez aunque el caudal era sólo de 300. Después te vas habituando aunque suba el caudal.

**10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Baja, Media y Alta; señala de las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo, cuales consideras baja (Calzado: botas de agua):**



**Observaciones:**

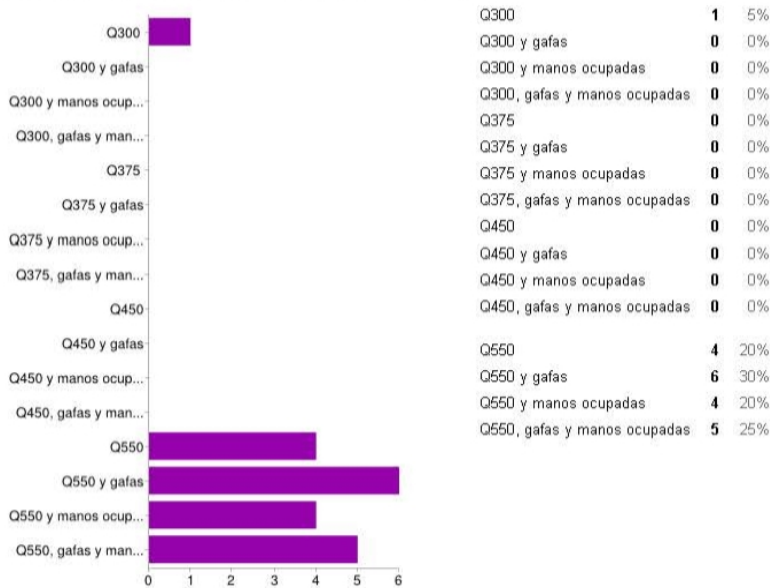
Considero que las de menos peligrosidad son las de menor caudal. Por esta razón que he marcado la de 300 litros/s.

**11- ¿Cuales consideras media? (Calzado: botas de agua)**



**Observaciones:**

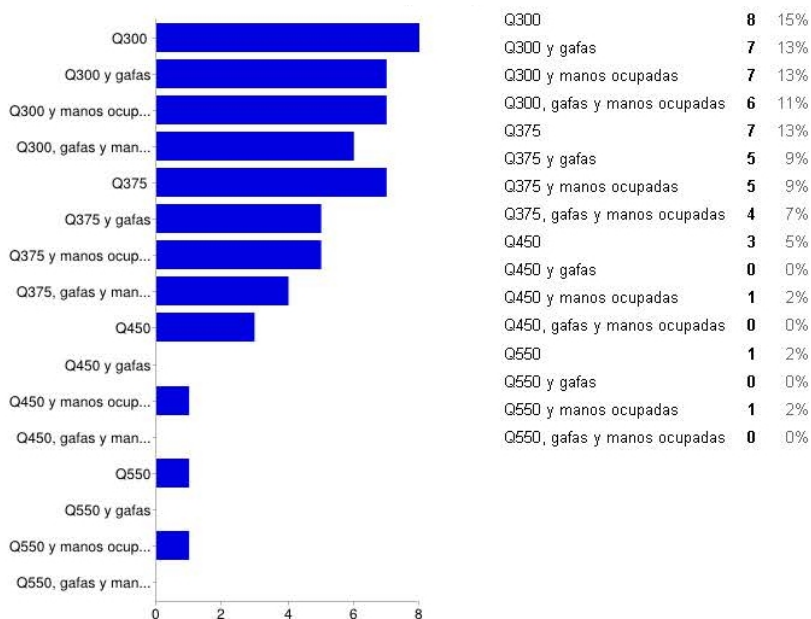
**12- ¿Y Cuales consideras alta? (Calzado: botas de agua)**



**Observaciones:**

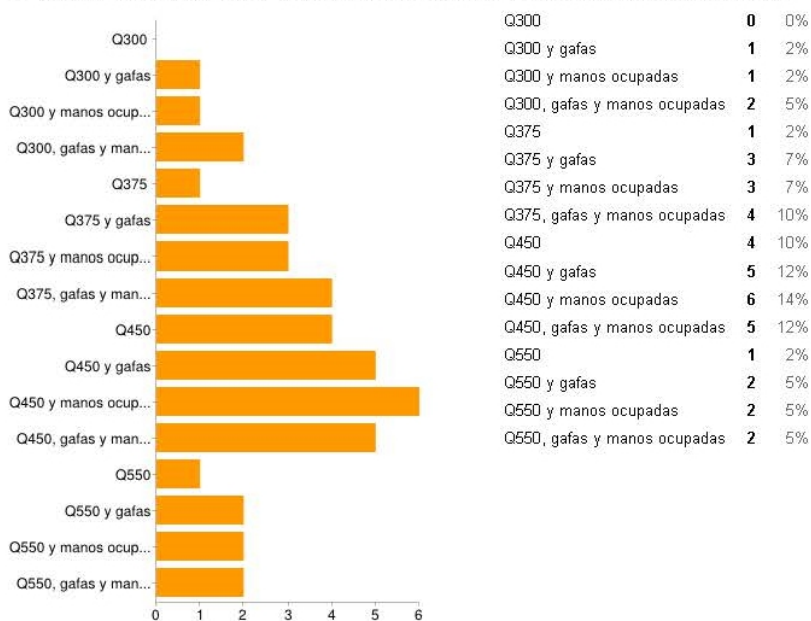
En la pregunta has puesto "baja" en lugar de "alta". En las preguntas 15 y 18, igual. Considero Q300 alta porque el primer encuentro con el agua es el más peligroso. Todas las combinaciones que he estado con gafas y manos ocupadas las considero mas peligrosas, ya que me imposibilitaba ver correctamente y se que un descuido seguro podría caerme.

**13- De la misma manera que antes, señala de las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo, cuales consideras baja (Calzado: Zapatos (plano si eres chico o tacón si eres chica)):**



**Observaciones:**

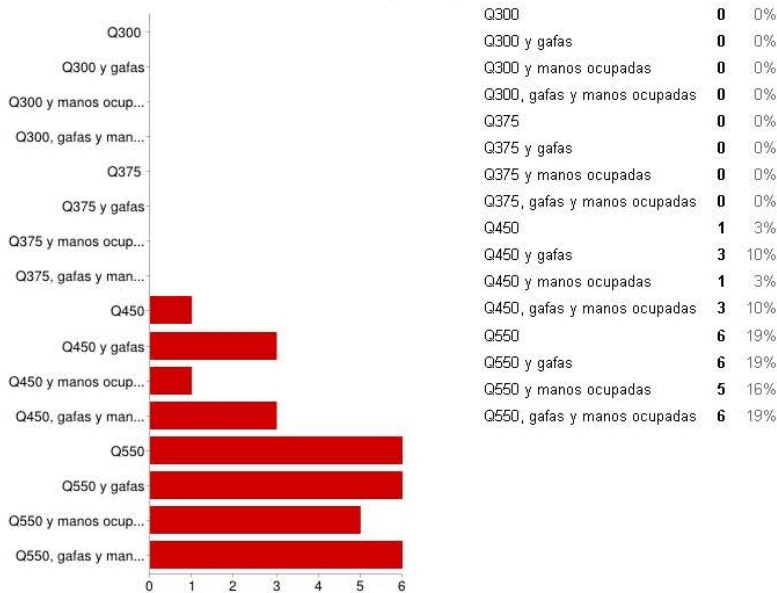
**14- ¿Cuales consideras media? (Calzado:Zapatos (plano si eres chico o tacón si eres chica))**



**Observaciones:**

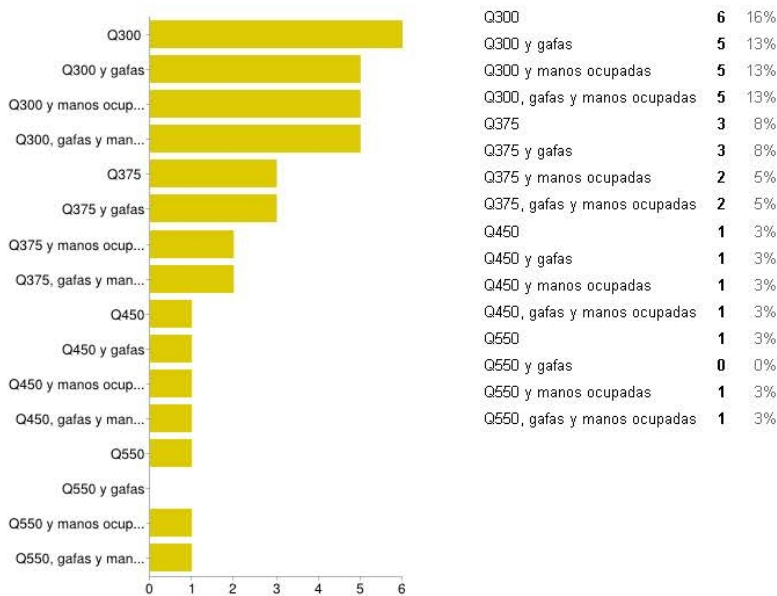
**15 ¿Y cuales consideras alta? (Calzado:Zapatos (plano si eres chico o tacón si eres chica))**





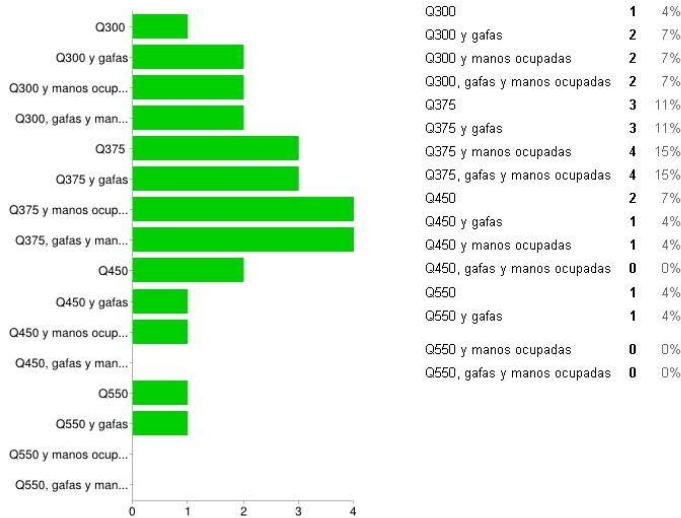
Observaciones:

16- Por último, señala de las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo, cuales consideras baja (Calzado:Chanclas):



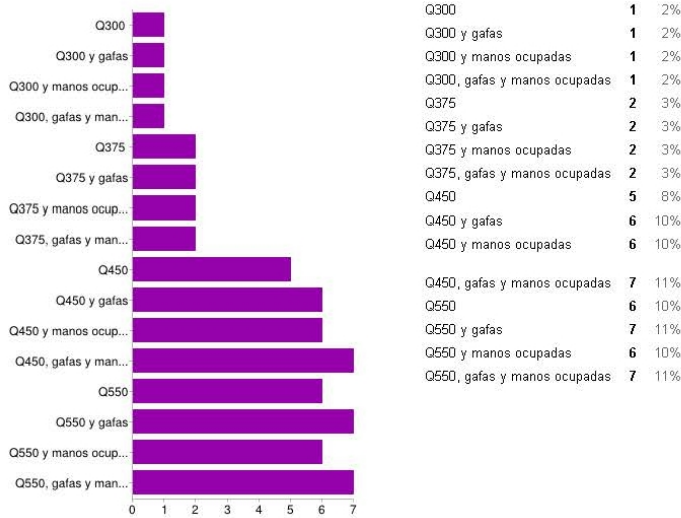
Observaciones:

17- ¿Cuales consideras media? (Calzado:Chanclas)



**Observaciones:**

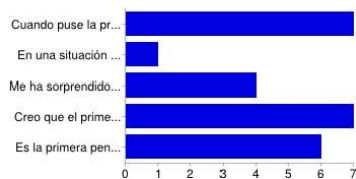
**18- ¿Y cuales consideras alta? (Calzado:Chancias)**



**Observaciones:**

porque las chancas me parecieron el calzado con el que menos podía mantenerme firme con el agua circulando. He respondido como si la pregunta fuera ¿Y cuales consideras alta?

**19- Señala las afirmaciones con las que estás de acuerdo**



Cuando puse la primera vez el pié en el agua me sorprendí, porque no esperaba la fuerza del agua.

En una situación real de lluvia en verano, cruzaría la calle si llevara chanclas, pero no si llevara zapatos.

Me ha sorprendido mi elección del calzado más peligroso. Nunca hubiera dicho que ese calzado fuera el que más me iba a desestabilizar.

Creo que el primer pie que introduzco en el agua es importante. Si entrara (en caso que no me haya pasado en los ensayos) con el pie de menor fuerza habría tenido más pro  
Es la primera pendiente que ensayo.

**Observaciones:**

Normalmente al bajar el agua, depende de con que pie baje, ya que depende si tengo mas fuerza en la pierna derecha o izquierda, esto hace que me de mas seguridad y tenga menos facilidad de caer. Ademas me he dado cuenta que al pasar mas seguido ya voy aprendiendo a saber con que pie debo bajar para no sentir que el agua me quiere hacer caer. 2 - Según como, me quitaria los zapatos/chanclas para cruzar 4 - Es más peligroso entrar con el pie del lado de donde viene la corriente de agua

## 2ª Encuesta. Personas ensayadas con pendiente de 6% en el modelo de plataforma

### 1- El equipo de seguridad: casco, arnés, impermeable y cinturón:

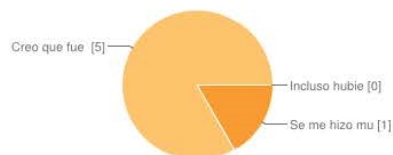


Era muy molesto y me impedía hacer el ensayo naturalmente	0	0%
Molestaba un poco	6	86%
No me molestaba nada	0	0%
Era muy molesto y no me molestaba nada	0	0%

#### Observaciones:

las gafas eran bastante molestas  
 Los anteojos me molestaban más que el cinturón.  
 La "cuerda" me pareció un poco corto, era un poco difícil empezar y llegar a los extremos.

### 2- En referencia a la duración de los ensayos:

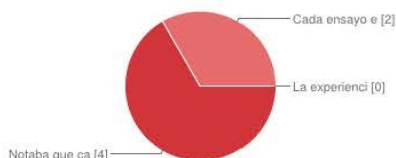


Se me hizo muy pesado y en los últimos notaba fatiga	1	14%
Creo que fue un tiempo equilibrado	5	71%
Incluso hubiera hecho más sin problemas	0	0%
Incluso hubié	0	0%
Se me hizo mu	1	14%

#### Observaciones:

El calor y el constante caminar en el agua, generó más fatiga

### 3- Sobre tus sensaciones...

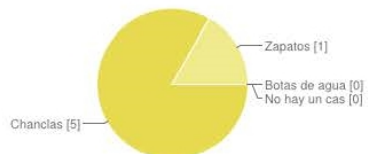


Notaba que cada vez adquiría experiencia y cada ensayo me sentía más seguro/a	4	57%
Cada ensayo era una experiencia diferente	2	29%
La experiencia adquirida no era significativa, y aunque hubiera hecho más ensayos mis sensaciones de seguridad o inseguridad serían las mismas	0	0%

#### Observaciones:

Al inicio fue mucho más difícil que al final

### 4- En relación a las combinaciones de calzado utilizadas ¿Qué calzado fue con el que sentiste mayor inseguridad?



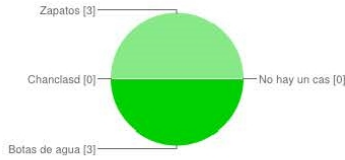
Botas de agua	0	0%
Chancas	5	71%
Zapatos	1	14%
No hay un caso que destacara en dificultad respecto al resto	0	0%

#### Observaciones:

Fueron chanclas y tacones, pero si hubieran sido de mi talla supongo que tendría menos problema. Aunque las chanclas depende de cómo sean, las que usé eran de "pata de gallo" (con sujetador entre el dedo gordo) ya que haces más fuerza en levantar el pie y a la vez sujetar con los dedos la chancla para que no se zafe. Y entre que alzas el pie y te mantienes equilibrado, pierdes segundos y te puedes caer.

Con taciónes!

**5- ¿Y cual te dio mayor seguridad?**

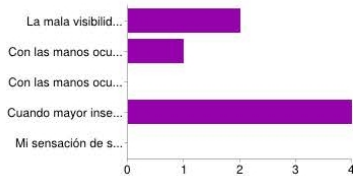


Botas de agua	3	43%
Chanclas	0	0%
Zapatos	3	43%
No hay un caso que destacara en seguridad respecto al resto	0	0%

**Observaciones:**

Aún no hay respuestas para esta pregunta.

**6- En relación a la buena o mala visibilidad y manos ocupadas o no...**

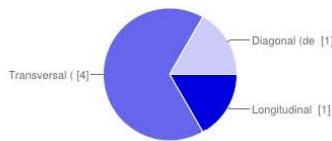


La mala visibilidad era el factor que más afectaba	2	29%
Con las manos ocupadas sentía mayor inseguridad	1	14%
Con las manos ocupadas sentía mayor seguridad y estabilidad	0	0%
Cuando mayor inseguridad sentía era con mala visibilidad y con las manos ocupadas a la vez	4	57%
Mi sensación de seguridad o inseguridad no variaba con ninguno de estos factores: manos ocupadas, mala visibilidad o ambos a la vez	0	0%

**Observaciones:**

Aún no hay respuestas para esta pregunta.

**7- En general ¿Qué recorrido te resultó más peligroso?**



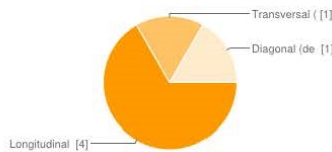
Longitudinal (de 1 a 4)	1	14%
Transversal (de 1 a 2)	4	57%
Diagonal (de 1 a 3)	1	14%

**[Image]**

**Observaciones:**

Aún no hay respuestas para esta pregunta.

**8- ¿Y el que menos?**

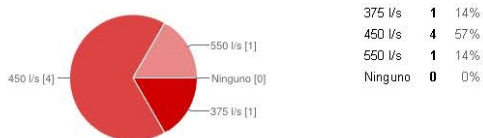


Longitudinal (de 1 a 4)	4	57%
Transversal (de 1 a 2)	1	14%
Diagonal (de 1 a 3)	1	14%

**Observaciones:**

Aún no hay respuestas para esta pregunta.

**9- ¿A partir de qué caudal empezaste a tener sensaciones de inestabilidad?**



375 l/s	1	14%
450 l/s	4	57%
550 l/s	1	14%
Ninguno	0	0%

**Observaciones:**

aunque el último fue el de mayor sensación de inestabilidad, en cualquier caso, con las chancas fue una alta sensación de inestabilidad.

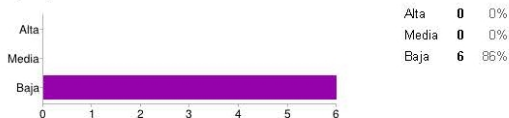
**Q300 [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]**



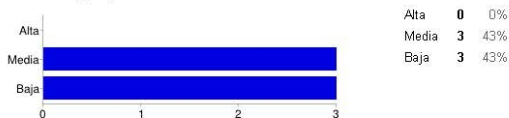
**Q300 y gafas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]**



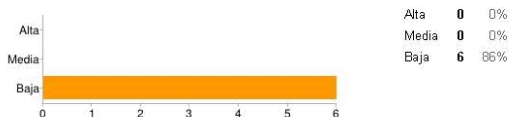
**Q300 y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]**



**Q300, gafas y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]**



**Q375 [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]**

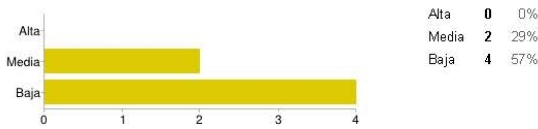


**Q375 y gafas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]**



**Q375 y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]**

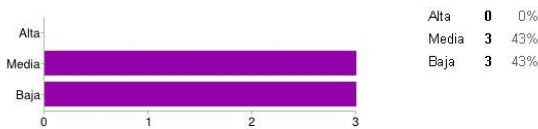
tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]



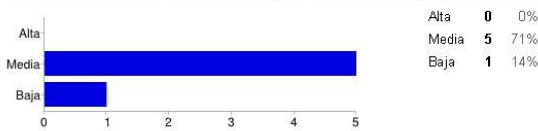
Q375. gafas y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]



Q450 [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]



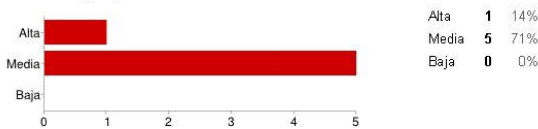
Q450 y gafas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]



Q450 y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]



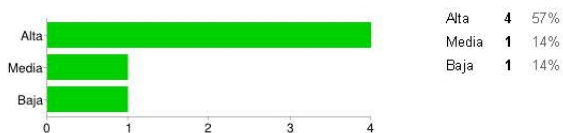
Q450. gafas y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]



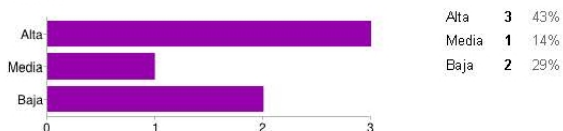
Q550 [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]



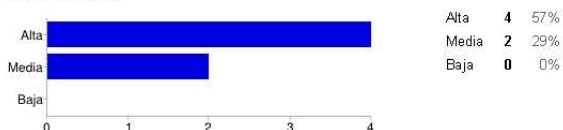
Q550 y gafas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]



**Q550 y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]**



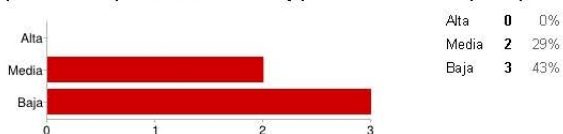
**Q550, gafas y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]**



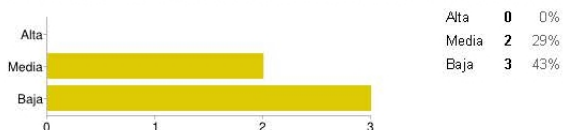
**Q300 [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



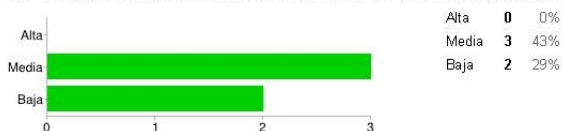
**Q300 y gafas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



**Q300 y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**

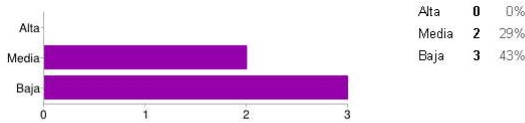


**Q300, gafas y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



**Q375 [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**

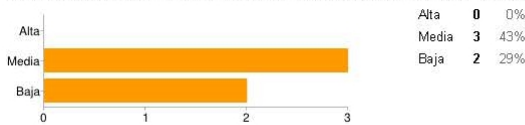




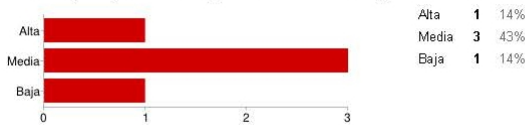
Q375 y gafas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos);]



Q375 y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos);]



Q375, gafas y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos);]



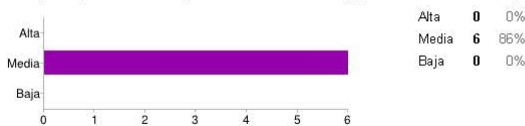
Q450 [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos);]



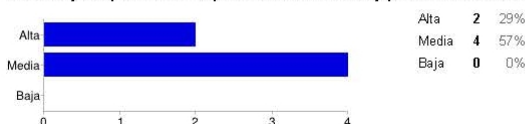
Q450 y gafas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos);]



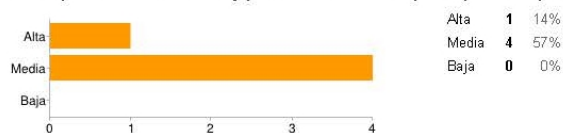
Q450 y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos);]



Q450, gafas y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos);]



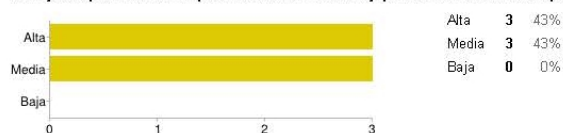
**Q550 [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



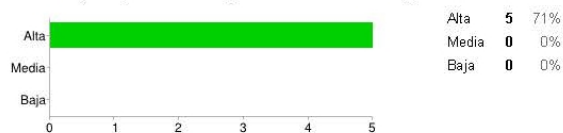
**Q550 y gafas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



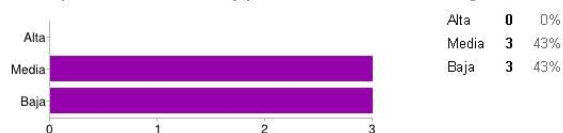
**Q550 y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



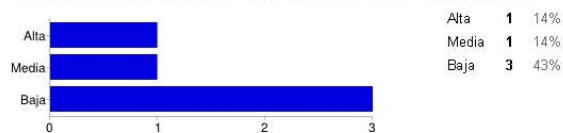
**Q550, gafas y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



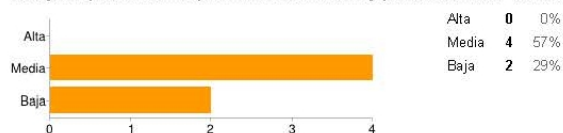
**Q300 [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



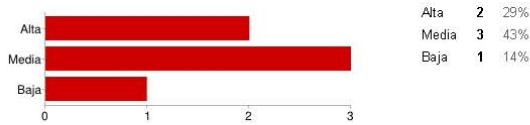
**Q300 y gafas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



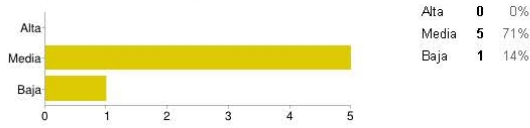
**Q300 y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



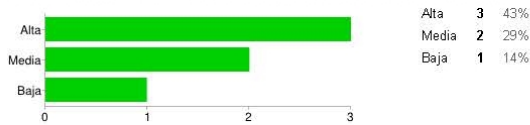
**Q300, gafas y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



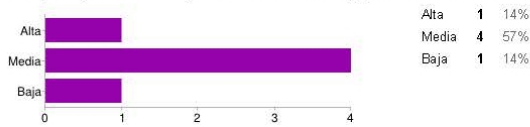
Q375 [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]



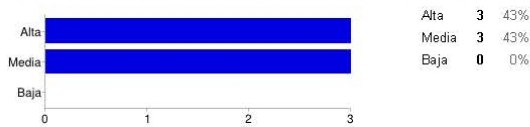
Q375 y gafas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]



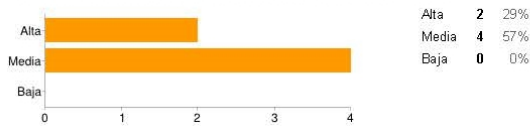
Q375 y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]



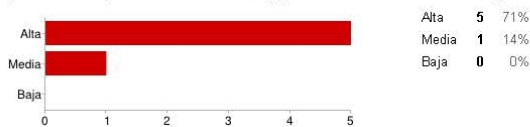
Q375, gafas y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]



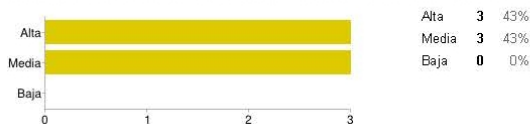
Q450 [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]



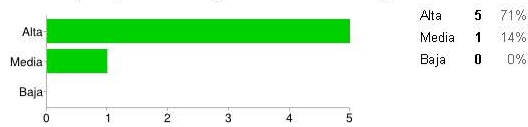
Q450 y gafas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]



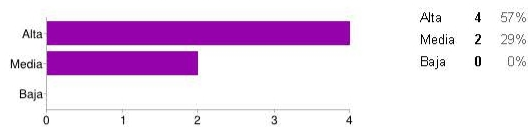
Q450 y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]



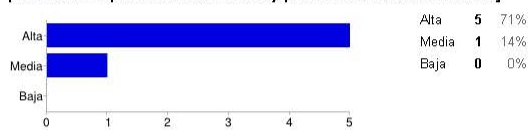
**Q450, gafas y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



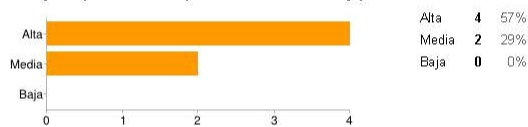
**Q550 [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



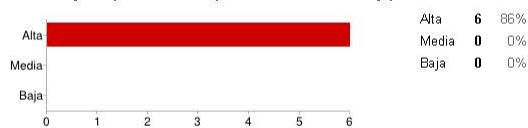
**Q550 y gafas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



**Q550 y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



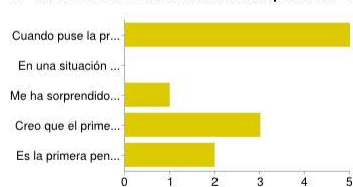
**Q550, gafas y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



**Observaciones:**

Aún no hay respuestas para esta pregunta.

**13- Señala las afirmaciones con las que estás de acuerdo**



Cuando puse la primera vez el pie en el agua me sorprendí, porque no esperaba la fuerza del agua.

En una situación real de lluvia en verano, cruzaría la calle si llevara chanclas, pero no si llevara zapatos.

Me ha sorprendido mi elección del calzado más peligroso. Nunca hubiera dicho que ese calzado fuera el que más me iba a desestabilizar.

Creo que el primer pie que introduzco en el agua es importante. Si entrara (en caso que no me haya pasado en los ensayos) con el pie de menor fuerza habría tenido más pro

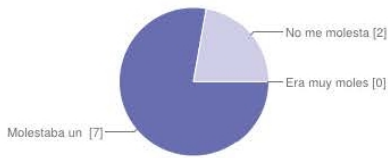
Es la primera pendiente que ensayo.

**Observaciones:**

Aún no hay respuestas para esta pregunta.

### 3ª Encuesta. Personas ensayadas con pendiente de 8% en el modelo de plataforma

**1- El equipo de seguridad: casco, arnés, impermeable y cinturón:**

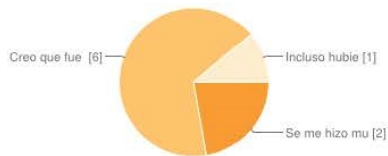


Era muy molesto y me impedía hacer el ensayo naturalmente	0	0%
Molestaba un poco	7	78%
No me molestaba nada	2	22%

**Observaciones:**

las gafas molestaban y el cinturón de seguridad molestaba al hacer el giro El cinturón interfería, en algún caso, al girar

**2- En referencia a la duración de los ensayos:**

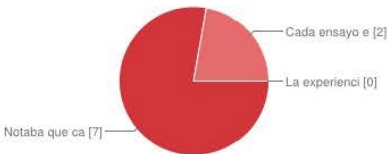


Se me hizo muy pesado y en los últimos notaba fatiga	2	22%
Creo que fue un tiempo equilibrado	6	67%
Incluso hubiera hecho más sin problemas	1	11%

**Observaciones:**

Más tiempo si hubiese sido pesado

**3- Sobre tus sensaciones...**

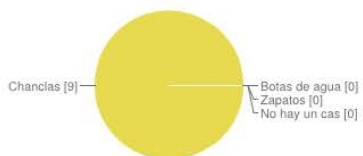


Notaba que cada vez adquiría experiencia y cada ensayo me sentía más seguro/a	7	78%
Cada ensayo era una experiencia diferente	2	22%
La experiencia adquirida no era significativa, y aunque hubiera hecho más ensayos mis sensaciones de seguridad o inseguridad serían las mismas	0	0%

**Observaciones:**

Esta experiencia era mas significativa con el uso de chancas, ya que la posición respecto el flujo del pie influía en la posible pérdida de la chanca. En este sentido el aprendizaje era fundamental.

**4- En relación a las combinaciones de calzado utilizadas ¿Qué calzado fue con el que sentiste mayor inseguridad?**

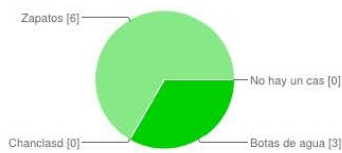


Botas de agua	0	0%
Chancas	9	100%
Zapatos	0	0%
No hay un caso que destacara en dificultad respecto al resto	0	0%

**Observaciones:**

solo los zapatos eran de mi talla, los otros dos eran grandes Por miedo a la pérdida de la chancla.

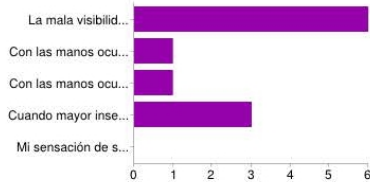
**5- ¿Y cual te dio mayor seguridad?**



Botas de agua	3	33%
Chanclas	0	0%
Zapatos	6	67%
No hay un caso que destacara en seguridad respecto al resto	0	0%

**Observaciones:**

**6- En relación a la buena o mala visibilidad y manos ocupadas o no...**



La mala visibilidad era el factor que más afectaba	6	55%
Con las manos ocupadas sentía mayor inseguridad	1	9%
Con las manos ocupadas sentía mayor seguridad y estabilidad	1	9%
Cuando mayor inseguridad sentía era con mala visibilidad y con las manos ocupadas a la vez	3	27%
Mi sensación de seguridad o inseguridad no variaba con ninguno de estos factores: manos ocupadas, mala visibilidad o ambos a la vez	0	0%

**Observaciones:**

Este factor es más influyente en el recorrido transversal debido a la existencia de los bordillos.

**7- En general ¿Qué recorrido te resultó más peligroso?**



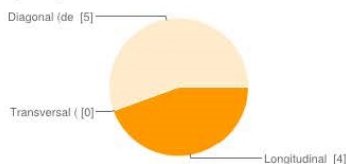
Longitudinal (de 1 a 4)	0	0%
Transversal (de 1 a 2)	9	100%
Diagonal (de 1 a 3)	0	0%

**[Image]**

**Observaciones:**

Cuando el flujo influye en el lateral del pie es mucho más molesto, sobretodo con chanclas.

**8- ¿Y el que menos?**

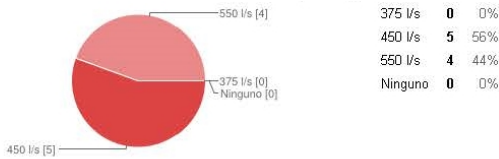


Longitudinal (de 1 a 4)	4	44%
Transversal (de 1 a 2)	0	0%
Diagonal (de 1 a 3)	5	56%

**Observaciones:**

El flujo es menos molesto

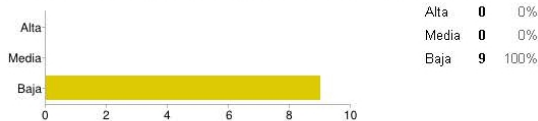
**9- ¿A partir de qué caudal empezaste a tener sensaciones de inestabilidad?**



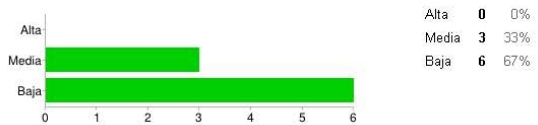
**Observaciones:**

Existe un salto significativo en cuanto a seguridad. Noté mayor cambio en pasar de 375 a 450 que en pasar de 300 a 375

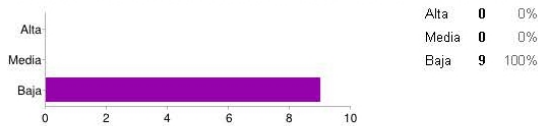
**Q300 [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua.]**



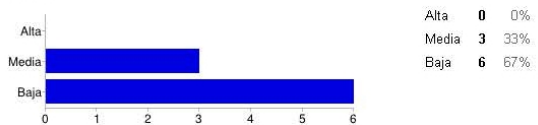
**Q300 y gafas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua.]**



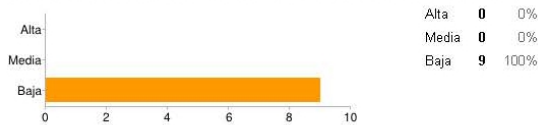
**Q300 y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua.]**



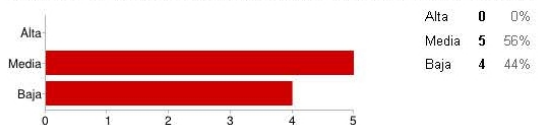
**Q300, gafas y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua.]**



**Q375 [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua.]**

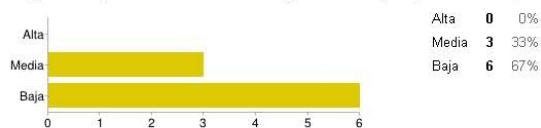


**Q375 y gafas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua.]**

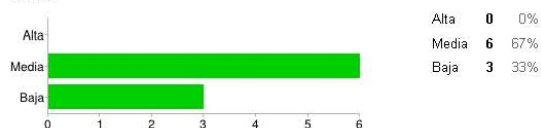


**Q375 y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres**

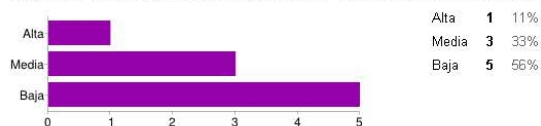
rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]



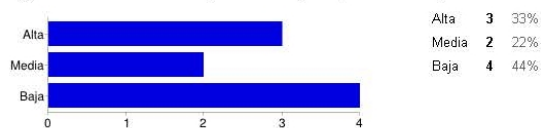
Q375, gafas y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]



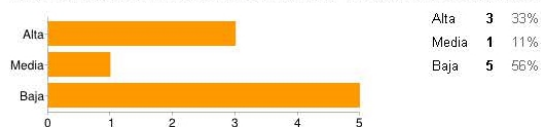
Q450 [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]



Q450 y gafas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]



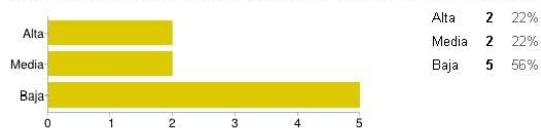
Q450 y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]



Q450, gafas y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]

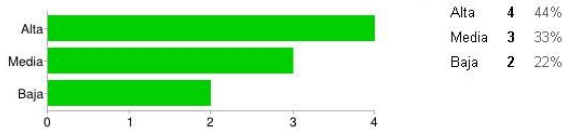


Q550 [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]

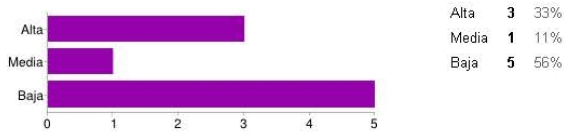


Q550 y gafas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]

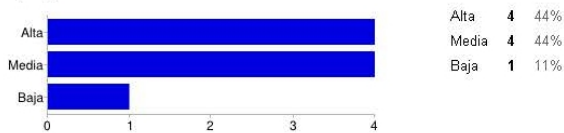




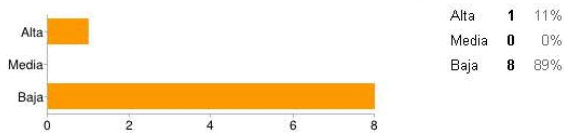
**Q550 y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]**



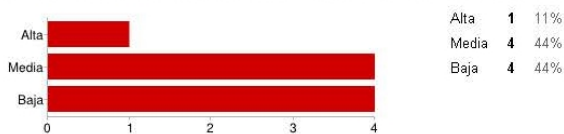
**Q550, gafas y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]**



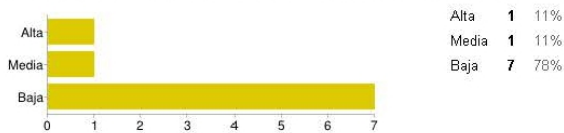
**Q300 [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



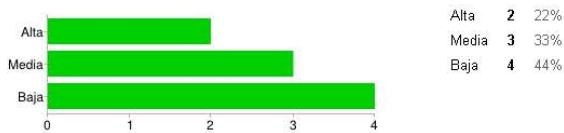
**Q300 y gafas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



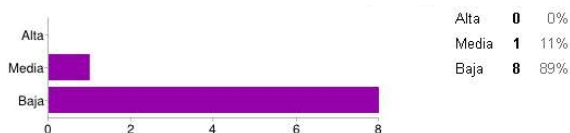
**Q300 y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



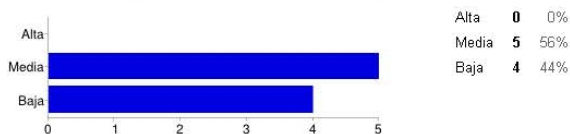
**Q300, gafas y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



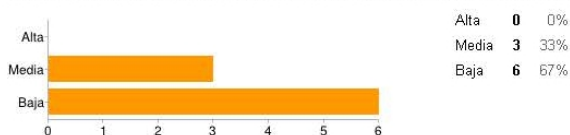
**Q375 [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



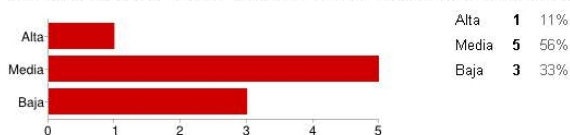
**Q375 y gafas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



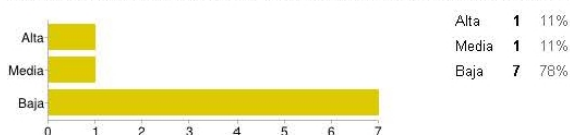
**Q375 y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



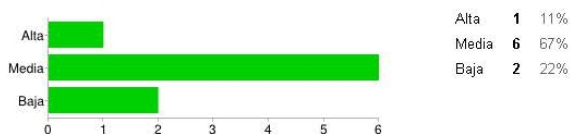
**Q375, gafas y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



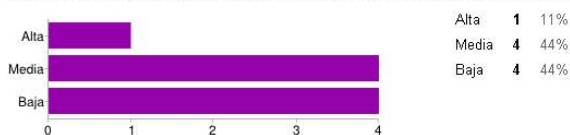
**Q450 [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



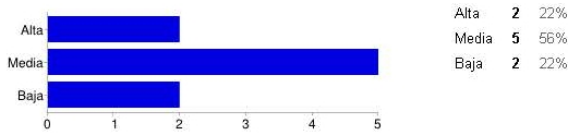
**Q450 y gafas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



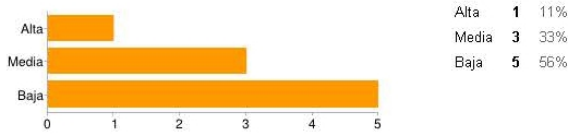
**Q450 y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



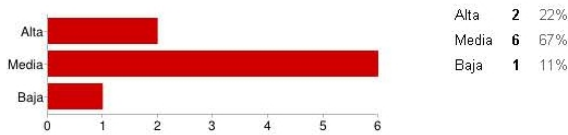
**Q450, gafas y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



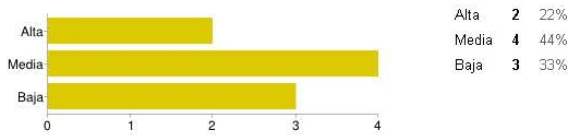
**Q550 [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



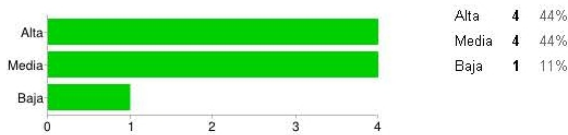
**Q550 y gafas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



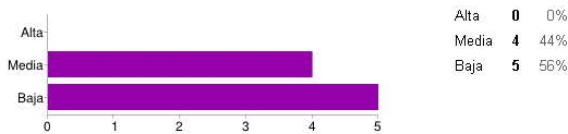
**Q550 y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



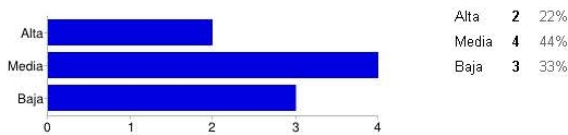
**Q550, gafas y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



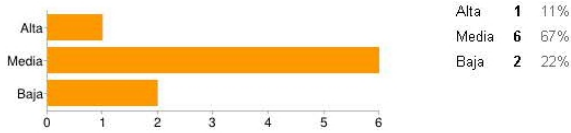
**Q300 [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



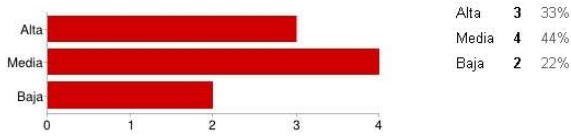
**Q300 y gafas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



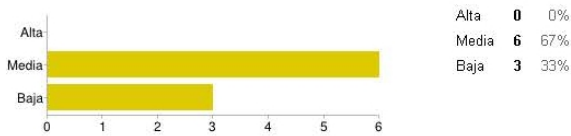
**Q300 y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



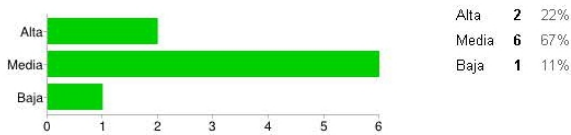
**Q300, gafas y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



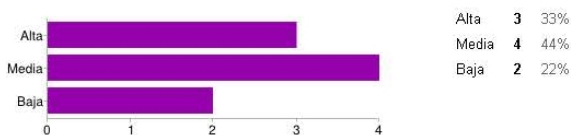
**Q375 [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



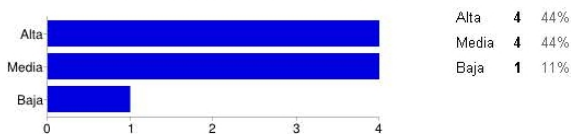
**Q375 y gafas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



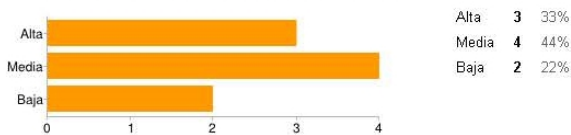
**Q375 y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



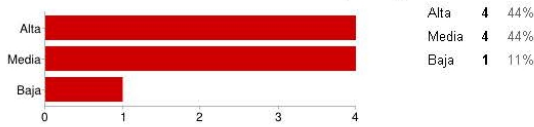
**Q375, gafas y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



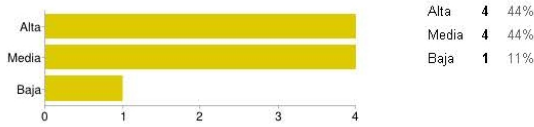
**Q450 [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



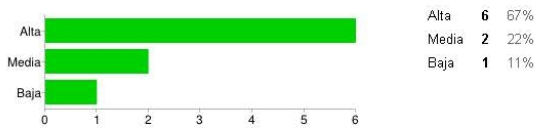
**Q450 y gafas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



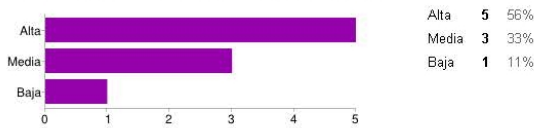
**Q450 y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



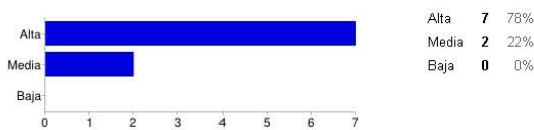
**Q450, gafas y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



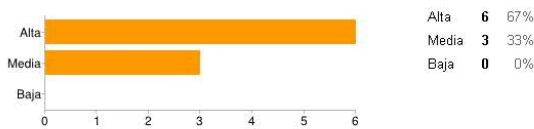
**Q550 [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



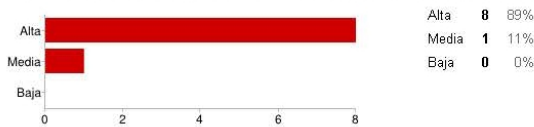
**Q550 y gafas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



**Q550 y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



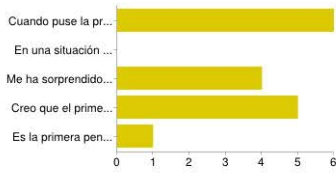
**Q550, gafas y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



**Observaciones:**

Llevar chanclas en el recorrido transversal es la prueba que supone más dificultad. El aumento de caudal y llevar gafas aumentan la dificultad pero en menor medida. No noté cambio en tener las manos ocupadas o libres

13- Señala las afirmaciones con las que estás de acuerdo



Cuando puse la primera vez el pie en el agua me sorprendí, porque no esperaba la fuerza del agua.

En una situación real de lluvia en verano, cruzaría la calle si llevara chanclas, pero no si llevara zapatos.

Me ha sorprendido mi elección del calzado más peligroso. Nunca hubiera dicho que ese calzado fuera el que más me iba a desestabilizar.

Creo que el primer pie que introduzco en el agua es importante. Si entrara (en caso que no me haya pasado en los ensayos) con el pie de menor fuerza habría tenido más problemas.

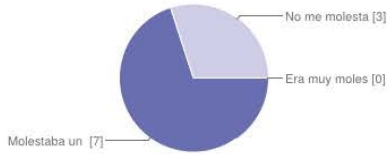
Es la primera pendiente que ensayo.

**Observaciones:**

En una situación real me quitaría las chanclas para cruzar

## 4ª Encuesta. Personas ensayadas con pendiente de 10% en el modelo de plataforma

### 1- El equipo de seguridad: casco, arnés, impermeable y cinturón:

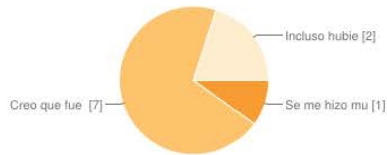


Era muy molesto y me impedía hacer el ensayo naturalmente	0	0%
Molestaba un poco	7	70%
No me molestaba nada	3	30%

#### Observaciones:

Una de las cintas que me aguantaba la pierna izquierda estaba doblada, y la cuerda de seguridad se bloquea demasiado pronto, pero bien en general. Molestaba mucho la cinta que sujetaba el casco. La cinta del arnés por detrás, mucho mejor. El arnés molesta un poco pero por falta de costumbre de usar este equipo de seguridad

### 2- En referencia a la duración de los ensayos:

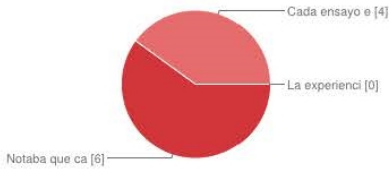


Se me hizo muy pesado y en los últimos notaba fatiga	1	10%
Creo que fue un tiempo equilibrado	7	70%
Incluso hubiera hecho más sin problemas	2	20%

#### Observaciones:

al final un poco cansada Fueron unas dos horas que pasaron bien. Quizás más de 2:30 hubieran sido demasiadas.

### 3- Sobre tus sensaciones...

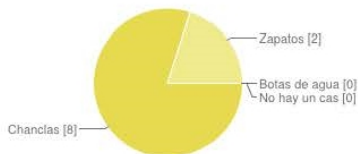


Notaba que cada vez adquiría experiencia y cada ensayo me sentía más seguro/a	6	60%
Cada ensayo era una experiencia diferente	4	40%
La experiencia adquirida no era significativa, y aunque hubiera hecho más ensayos mis sensaciones de seguridad o inseguridad serían las mismas	0	0%

#### Observaciones:

la experiencia puede influir en sentirse más seguro.

### 4- En relación a las combinaciones de calzado utilizadas ¿Qué calzado fue con el que sentiste mayor inseguridad?

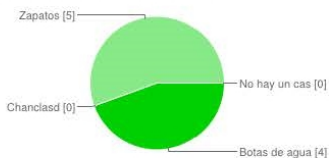


Botas de agua	0	0%
Chancas	8	80%
Zapatos	2	20%
No hay un caso que destacara en dificultad respecto al resto	0	0%

#### Observaciones:

Más insegura las chancas q se torcían y resbalaban del pie dentro de la corriente de agua resbaladizas, no agarran bien el pie, peligrosas a la hora de caminar Notaba más peligrosidad con las chancas porque notaba que se me iban a caer.

**5- ¿Y cual te dio mayor seguridad?**

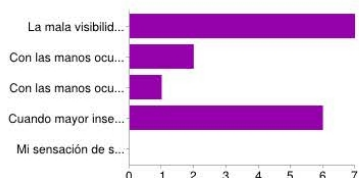


Botas de agua	4	44%
Chancas	0	0%
Zapatos	5	56%
No hay un caso que destacara en seguridad respecto al resto	0	0%

**Observaciones:**

zapatos y botas mucho más seguros que las chancas Era mucho más fácil caminar con los zapatos porque respecto a las botas, no hay tanta superficie con la que el agua te pueda llevar.

**6- En relación a la buena o mala visibilidad y manos ocupadas o no...**

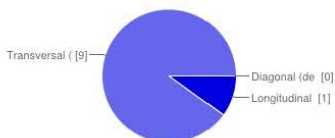


La mala visibilidad era el factor que más afectaba	7	44%
Con las manos ocupadas sentía mayor inseguridad	2	13%
Con las manos ocupadas sentía mayor seguridad y estabilidad	1	6%
Cuando mayor inseguridad sentía era con mala visibilidad y con las manos ocupadas a la vez	6	38%
Mi sensación de seguridad o inseguridad no variaba con ninguno de estos factores: manos ocupadas, mala visibilidad o ambos a la vez	0	0%

**Observaciones:**

El menor peso de las cargas de este ensayo respecto el anterior me hizo sentir más insegura. Creo q el mayor peso anterior aportaba estabilidad Lo más difícil de llevar las gafas era que tenías un campo de visión mucho más reducido. Cuando tenía las manos ocupadas no notaba mucha diferencia respecto con las manos libres.

**7- En general ¿Qué recorrido te resultó más peligroso?**



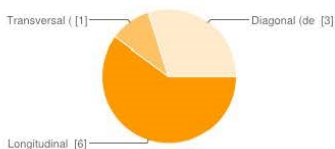
Longitudinal (de 1 a 4)	1	10%
Transversal (de 1 a 2)	9	90%
Diagonal (de 1 a 3)	0	0%

**[Image]**

**Observaciones:**

Era más difícil porque era la combinación del agua que te venía de lado y de frente. Punto 1 el sitio de más inestabilidad Básicamente porque el agua de lado era más desafiante que las demás. de 4 a 1 más inseguro que de 1 a 4 girar en el punto 1 es más complicado que el resto

**8- ¿Y el que menos?**



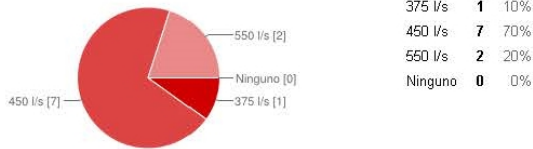
Longitudinal (de 1 a 4)	6	60%
Transversal (de 1 a 2)	1	10%
Diagonal (de 1 a 3)	3	30%

**Observaciones:**



En el paso longitudinal necesitaba más fuerza, pero sentía más seguridad. No era ni contra corriente ni el agua te llegaba de lado. Era el más equilibrado.

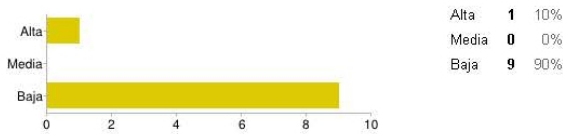
**9- ¿A partir de qué caudal empezaste a tener sensaciones de inestabilidad?**



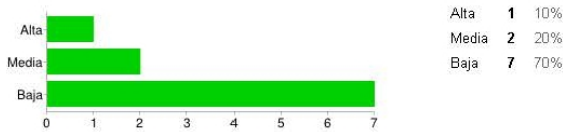
**Observaciones:**

El agua te empujaba ligeramente más fuerte.

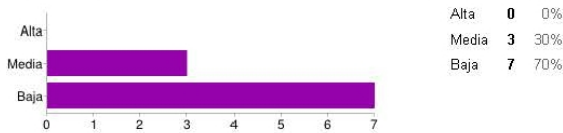
**Q300 [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]**



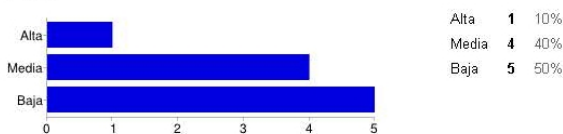
**Q300 y gafas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]**



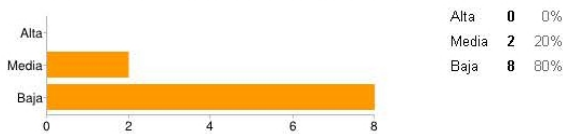
**Q300 y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]**



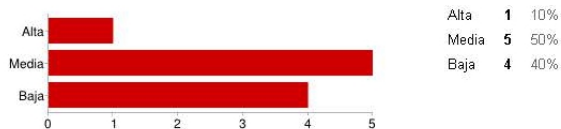
**Q300, gafas y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]**



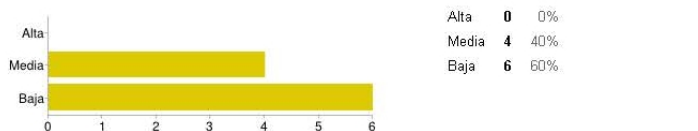
**Q375 [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]**



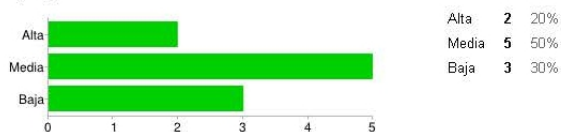
**Q375 y gafas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]**



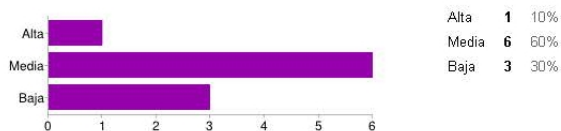
Q375 y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]



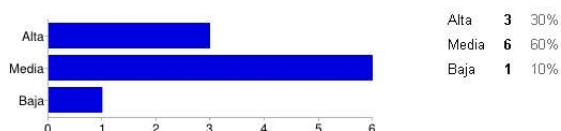
Q375, gafas y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]



Q450 [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]



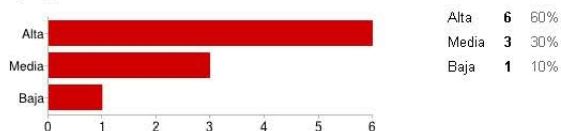
Q450 y gafas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]



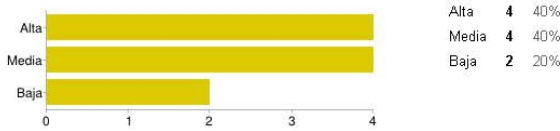
Q450 y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]



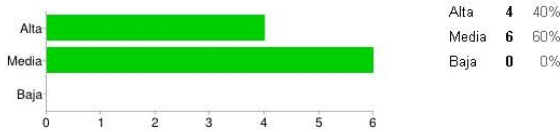
Q450, gafas y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]



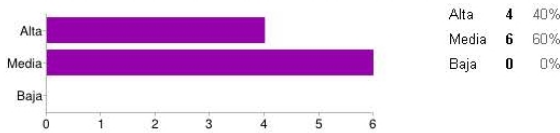
Q550 [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]



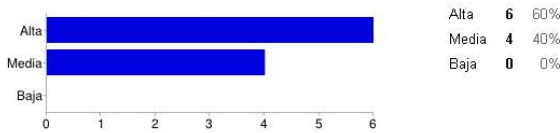
**Q550 y gafas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]**



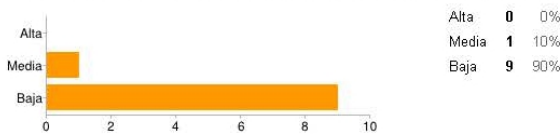
**Q550 y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]**



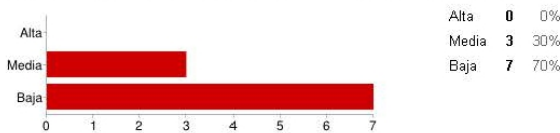
**Q550, gafas y manos ocupadas [10- Si clasificamos tus sensaciones de peligrosidad en 3 niveles: Alta, Media y Baja; clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de botas de agua:]**



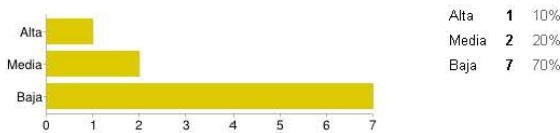
**Q300 [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



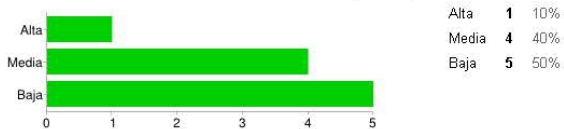
**Q300 y gafas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



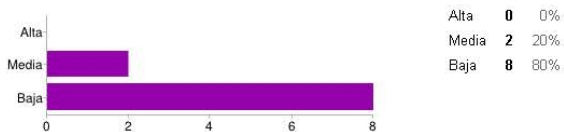
**Q300 y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



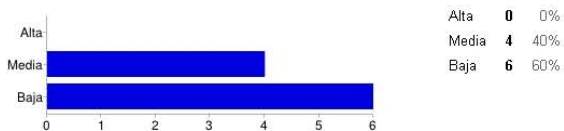
**Q300, gafas y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



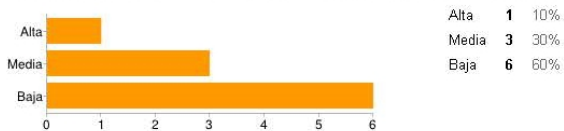
**Q375 [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



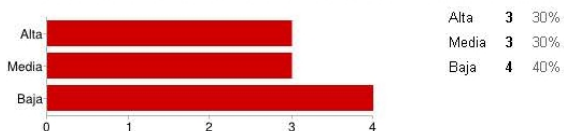
**Q375 y gafas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



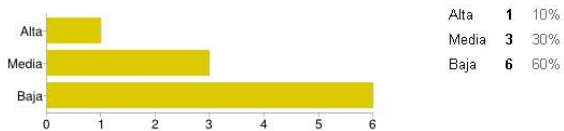
**Q375 y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



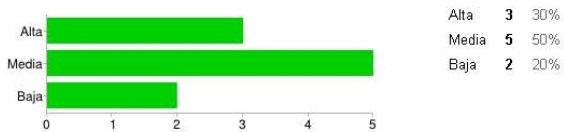
**Q375, gafas y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



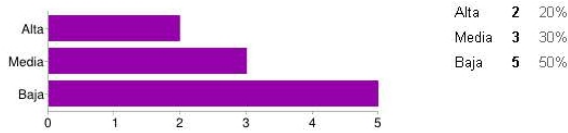
**Q450 [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



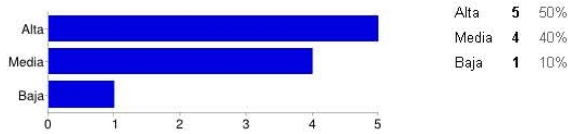
**Q450 y gafas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



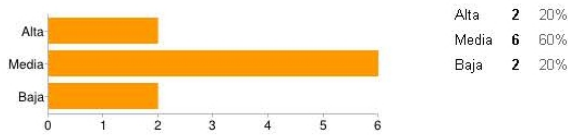
**Q450 y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



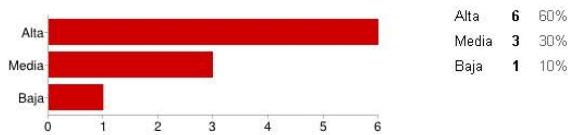
**Q450, gafas y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



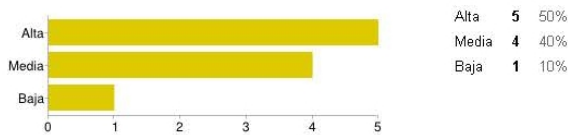
**Q550 [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



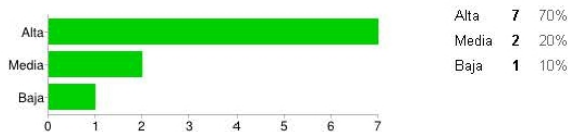
**Q550 y gafas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



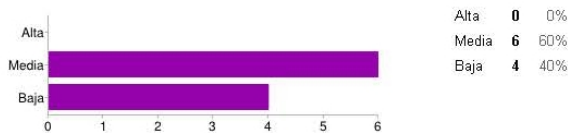
**Q550 y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



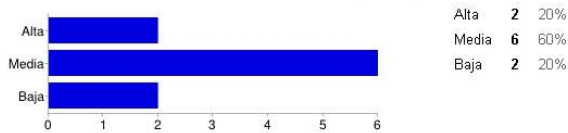
**Q550, gafas y manos ocupadas [11- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de zapatos (de tacón para chicas y plano para chicos):]**



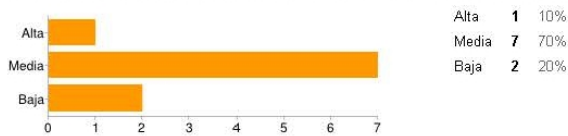
**Q300 [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



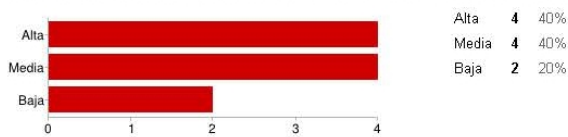
**Q300 y gafas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



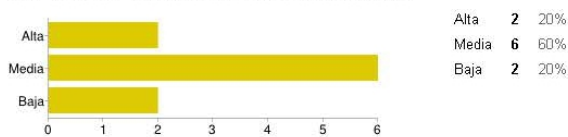
**Q300 y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



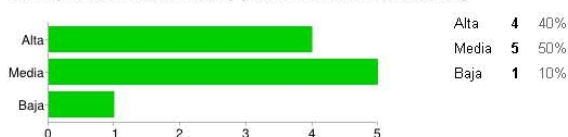
**Q300, gafas y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



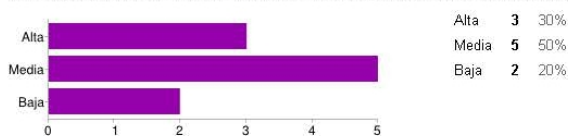
**Q375 [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



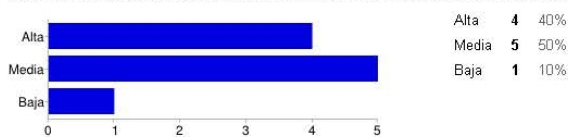
**Q375 y gafas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



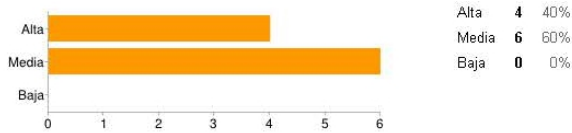
**Q375 y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



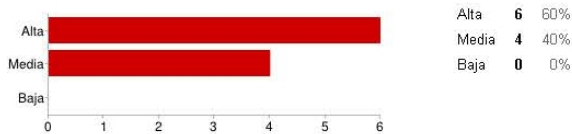
**Q375, gafas y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



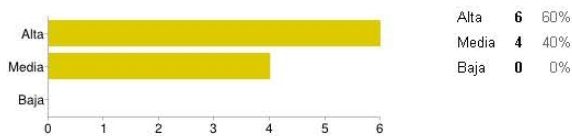
**Q450 [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chanclas:]**



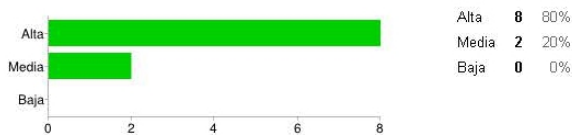
**Q450 y gafas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chancas:]**



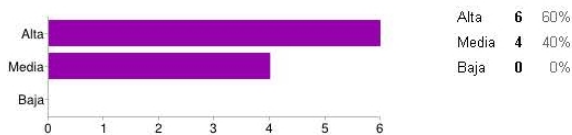
**Q450 y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chancas:]**



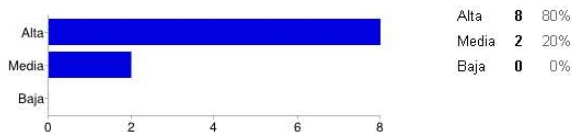
**Q450, gafas y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chancas:]**



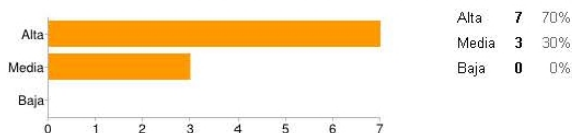
**Q550 [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chancas:]**



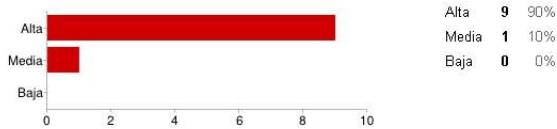
**Q550 y gafas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chancas:]**



**Q550 y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chancas:]**



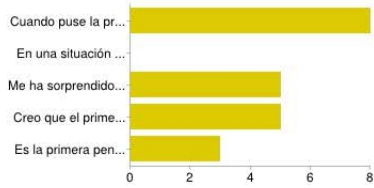
**Q550, gafas y manos ocupadas [12- Como en la pregunta anterior clasifica en estos tres rangos las siguientes combinaciones que has ensayado para la última pendiente del modelo y para un calzado de chancas:]**



**Observaciones:**

La transición del el caudal 300 al de 375 es en el que menos se ha notado. Las gafas daban mucha más sensación de inseguridad que los objetos en la mano. Las botas de agua pesaban tanto y tenían tanta superficie que el agua te llevaba más fácilmente con ella.

**13- Señala las afirmaciones con las que estás de acuerdo**



Cuando puse la primera vez el pie en el agua me sorprendí, porque no esperaba la fuerza del agua.

En una situación real de lluvia en verano, cruzaría la calle si llevara chancas, pero no si llevara zapatos.

Me ha sorprendido mi elección del calzado más peligroso. Nunca hubiera dicho que ese calzado fuera el que más me iba a desestabilizar.

Creo que el primer pie que introduzco en el agua es importante. Si entrara (en caso que no me haya pasado en los ensayos) con el pie de menor fuerza habría tenido más pro

Es la primera pendiente que ensayo.

**Observaciones:**

Soy Anais, por si decides asociar las encuestas y videos...





---

**Anejo C.**

**Planificación numérica de cobertura de  
puntos (velocidad-calado) para los ensayos  
experimentales de inestabilidad de  
vehículos**

---



Punto	i [%]	CC A. Arriba	CC A. Abajo	Incremento Aguas Abajo (m)	Xi** (m)	Lectura vertedero [cm]	Q [l/s]	yc* (m)	v* (m/s)	y* (m)
1	0.8%	0.025	-	-	17.4	23.50	11.13	0.0327	0.6180	0.0300
2	0.8%	0.028	-	-	17.4	24.50	13.13	0.0365	0.6798	0.0322
3	0.8%	0.031	-	-	17.4	25.50	15.34	0.0405	0.7364	0.0347
4	1.0%	0.019	-	-	17.4	21.50	7.70	0.0256	0.5503	0.0233
5	1.0%	0.021	-	-	17.4	22.50	9.32	0.0291	0.6197	0.0251
6	1.0%	0.024	-	-	17.4	23.50	11.13	0.0327	0.6824	0.0272
7	1.0%	0.026	-	-	17.4	24.50	13.13	0.0365	0.7420	0.0295
8	1.0%	0.029	-	-	17.4	25.50	15.34	0.0405	0.7995	0.0320
9	1.2%	0.016	-	-	17.4	20.50	6.26	0.0223	0.5247	0.0199
10	1.2%	0.018	-	-	17.4	21.50	7.70	0.0256	0.5978	0.0215
11	1.2%	0.020	-	-	17.4	22.50	9.32	0.0291	0.6645	0.0234
12	1.2%	0.022	-	-	17.4	23.50	11.13	0.0327	0.7281	0.0255
13	1.2%	0.025	-	-	17.4	24.50	13.13	0.0365	0.7896	0.0277
14	1.2%	0.027	-	-	17.4	25.50	15.34	0.0405	0.8495	0.0301
15	1.5%	0.013	-	-	17.4	19.50	5.00	0.0192	0.4968	0.0168
16	1.5%	0.015	-	-	17.4	20.50	6.26	0.0223	0.5752	0.0181
17	1.5%	0.017	-	-	17.4	21.50	7.70	0.0256	0.6473	0.0198
18	1.5%	0.019	-	-	17.4	22.50	9.32	0.0291	0.7162	0.0217
19	1.5%	0.021	-	-	17.4	23.50	11.13	0.0327	0.7828	0.0237
20	1.5%	0.023	-	-	17.4	24.50	13.13	0.0365	0.8479	0.0258
21	1.5%	0.025	-	-	17.4	25.50	15.34	0.0405	0.9115	0.0280
22	2.0%	0.010	-	-	17.4	18.50	3.90	0.0163	0.4675	0.0139
23	2.0%	0.012	-	-	17.4	19.50	5.00	0.0192	0.5533	0.0151
24	2.0%	0.013	-	-	17.4	20.50	6.26	0.0223	0.6325	0.0165
25	2.0%	0.015	-	-	17.4	21.50	7.70	0.0256	0.7085	0.0181
26	2.0%	0.017	-	-	17.4	22.50	9.32	0.0291	0.7823	0.0199
27	2.0%	0.019	-	-	17.4	23.50	11.13	0.0327	0.8544	0.0217
28	2.0%	0.021	-	-	17.4	24.50	13.13	0.0365	0.9251	0.0237
29	2.0%	0.023	-	-	17.4	25.50	15.34	0.0405	0.9946	0.0257
30	2.0%	0.025	-	-	17.4	26.50	17.75	0.0447	1.0629	0.0278
31	3.0%	0.008	-	-	17.4	17.50	2.96	0.0135	0.4386	0.0113
32	3.0%	0.009	-	-	17.4	18.50	3.90	0.0163	0.5349	0.0122
33	3.0%	0.010	-	-	17.4	19.50	5.00	0.0192	0.6247	0.0133
34	3.0%	0.012	-	-	17.4	20.50	6.26	0.0223	0.7114	0.0147
35	3.0%	0.013	-	-	17.4	21.50	7.70	0.0256	0.7960	0.0161
36	3.0%	0.015	-	-	17.4	22.50	9.32	0.0291	0.8789	0.0177
37	3.0%	0.017	-	-	17.4	23.50	11.13	0.0327	0.9603	0.0193
38	3.0%	0.019	-	-	17.4	24.50	13.13	0.0365	1.0404	0.0210
39	3.0%	0.021	-	-	17.4	25.50	15.34	0.0405	1.1193	0.0228
40	3.0%	0.022	-	-	17.4	26.50	17.75	0.0447	1.1971	0.0247
41	3.0%	0.024	-	-	17.4	27.50	20.38	0.0490	1.2739	0.0267
42	4.0%	0.007	-	-	17.4	17.50	2.96	0.0135	0.4790	0.0103
43	4.0%	0.008	-	-	17.4	18.50	3.90	0.0163	0.5788	0.0112
44	4.0%	0.009	-	-	17.4	19.50	5.00	0.0192	0.6748	0.0123
45	4.0%	0.011	-	-	17.4	20.50	6.26	0.0223	0.7685	0.0136
46	4.0%	0.012	-	-	17.4	21.50	7.70	0.0256	0.8604	0.0149
47	4.0%	0.014	-	-	17.4	22.50	9.32	0.0291	0.9508	0.0163
48	4.0%	0.015	-	-	17.4	23.50	11.13	0.0327	1.0398	0.0178
49	4.0%	0.017	-	-	17.4	24.50	13.13	0.0365	1.1276	0.0194
50	4.0%	0.019	-	-	17.4	25.50	15.34	0.0405	1.2141	0.0211
51	4.0%	0.021	-	-	17.4	26.50	17.75	0.0447	1.2996	0.0228
52	4.0%	0.022	-	-	17.4	27.50	20.38	0.0490	1.3840	0.0245
53	6.0%	0.006	-	-	17.4	17.50	2.96	0.0135	0.5309	0.0093
54	6.0%	0.007	-	-	17.4	18.50	3.90	0.0163	0.6396	0.0102

Punto	i [%]	CC A. Arriba	CC A. Abajo	Incremento Aguas Abajo (m)	X <sub>i</sub> ** (m)	Lectura vertedero [cm]	Q [l/s]	y <sub>c</sub> * (m)	v* (m/s)	y* (m)
55	6.0%	0.008	-	-	17.4	19.50	5.00	0.0192	0.7463	0.0112
56	6.0%	0.010	-	-	17.4	20.50	6.26	0.0223	0.8515	0.0123
57	6.0%	0.011	-	-	17.4	21.50	7.70	0.0256	0.9553	0.0135
58	6.0%	0.012	-	-	17.4	22.50	9.32	0.0291	1.0577	0.0147
59	6.0%	0.014	-	-	17.4	23.50	11.13	0.0327	1.1588	0.0160
60	6.0%	0.015	-	-	17.4	24.50	13.13	0.0365	1.2587	0.0174
61	6.0%	0.017	-	-	17.4	25.50	15.34	0.0405	1.3574	0.0188
62	6.0%	0.018	-	-	17.4	26.50	17.75	0.0447	1.4549	0.0203
63	6.0%	0.020	-	-	17.4	27.50	20.38	0.0490	1.5514	0.0219
64	8.0%	0.006	-	-	17.4	17.50	2.96	0.0135	0.5662	0.0087
65	8.0%	0.007	-	-	17.4	18.50	3.90	0.0163	0.6827	0.0095
66	8.0%	0.008	-	-	17.4	19.50	5.00	0.0192	0.7981	0.0104
67	8.0%	0.009	-	-	17.4	20.50	6.26	0.0223	0.9124	0.0114
68	8.0%	0.010	-	-	17.4	21.50	7.70	0.0256	1.0255	0.0125
69	8.0%	0.011	-	-	17.4	22.50	9.32	0.0291	1.1375	0.0137
70	8.0%	0.013	-	-	17.4	23.50	11.13	0.0327	1.2482	0.0149
71	8.0%	0.014	-	-	17.4	24.50	13.13	0.0365	1.3578	0.0161
72	8.0%	0.015	-	-	17.4	25.50	15.34	0.0405	1.4661	0.0174
73	8.0%	0.017	-	-	17.4	26.50	17.75	0.0447	1.5733	0.0188
74	8.0%	0.018	-	-	17.4	27.50	20.38	0.0490	1.6793	0.0202
75	8.0%	0.020	-	-	17.4	28.50	23.23	0.0535	1.7843	0.0217
76	-	-	critico	-	17.9	14.50	1.01	0.0066	0.2410	0.0070
77	-	-	critico	-	17.9	15.50	1.53	0.0087	0.2770	0.0092
78	-	-	critico	-	17.9	16.50	2.18	0.0110	0.3130	0.0116
79	-	-	critico	-	17.9	17.50	2.96	0.0135	0.3480	0.0142
80	-	-	critico	-	17.9	18.50	3.90	0.0163	0.3820	0.0170
81	-	-	critico	-	17.9	19.50	5.00	0.0192	0.4150	0.0201
82	-	-	critico	-	17.9	20.50	6.26	0.0223	0.4490	0.0233
83	-	-	critico	-	17.9	21.50	7.70	0.0256	0.4810	0.0267
84	-	-	critico	-	17.9	22.50	9.32	0.0291	0.5140	0.0302
85	-	-	critico	-	17.9	23.50	11.13	0.0327	0.5460	0.0340
86	-	-	critico	-	17.9	24.50	13.13	0.0365	0.5770	0.0379
87	-	-	critico	-	17.9	25.50	15.34	0.0405	0.6080	0.0420
88	-	-	0.00910	0.005	17.9	13.10	0.49	0.0041	0.0880	0.0094
89	-	-	0.01049	0.005	17.9	13.90	0.76	0.0055	0.1180	0.0108
90	-	-	0.01163	0.005	17.9	14.50	1.01	0.0066	0.1410	0.0120
91	-	-	0.01371	0.005	17.9	15.50	1.53	0.0087	0.1800	0.0142
92	-	-	0.01602	0.005	17.9	16.50	2.18	0.0110	0.2180	0.0166
93	-	-	0.01855	0.005	17.9	17.50	2.96	0.0135	0.2570	0.0192
94	-	-	0.02127	0.005	17.9	18.50	3.90	0.0163	0.2950	0.0220
95	-	-	0.02419	0.005	17.9	19.50	5.00	0.0192	0.3320	0.0251
96	-	-	0.02731	0.005	17.9	20.50	6.26	0.0223	0.3690	0.0283
97	-	-	0.03060	0.005	17.9	21.50	7.70	0.0256	0.4050	0.0317
98	-	-	0.03408	0.005	17.9	22.50	9.32	0.0291	0.4410	0.0352
99	-	-	0.03773	0.005	17.9	23.50	11.13	0.0327	0.4760	0.0390
100	-	-	0.01410	0.010	17.9	13.10	0.49	0.0041	0.0570	0.0144
101	-	-	0.01549	0.010	17.9	13.90	0.76	0.0055	0.0800	0.0158
102	-	-	0.01663	0.010	17.9	14.50	1.01	0.0066	0.0990	0.0170
103	-	-	0.01871	0.010	17.9	15.50	1.53	0.0087	0.1330	0.0192
104	-	-	0.02102	0.010	17.9	16.50	2.18	0.0110	0.1680	0.0216
105	-	-	0.02355	0.010	17.9	17.50	2.96	0.0135	0.2040	0.0242
106	-	-	0.02627	0.010	17.9	18.50	3.90	0.0163	0.2410	0.0270
107	-	-	0.02919	0.010	17.9	19.50	5.00	0.0192	0.2770	0.0301
108	-	-	0.03231	0.010	17.9	20.50	6.26	0.0223	0.3140	0.0333

Punto	i [%]	CC A. Arriba	CC A. Abajo	Incremento Aguas Abajo (m)	$X_i^{**}$ (m)	Lectura vertedero [cm]	Q [l/s]	$y_c^*$ (m)	$v^*$ (m/s)	$y^*$ (m)
109	-	-	0.03560	0.010	17.9	21.50	7.70	0.0256	0.3500	0.0367
110	-	-	0.03908	0.010	17.9	22.50	9.32	0.0291	0.3860	0.0402
111	-	-	0.04273	0.010	17.9	23.50	11.13	0.0327	0.4220	0.0440
112	-	-	0.01910	0.015	17.9	13.10	0.49	0.0041	0.0430	0.0194
113	-	-	0.02049	0.015	17.9	13.90	0.76	0.0055	0.0610	0.0208
114	-	-	0.02163	0.015	17.9	14.50	1.01	0.0066	0.0770	0.0220
115	-	-	0.02371	0.015	17.9	15.50	1.53	0.0087	0.1050	0.0242
116	-	-	0.02602	0.015	17.9	16.50	2.18	0.0110	0.1360	0.0266
117	-	-	0.02855	0.015	17.9	17.50	2.96	0.0135	0.1690	0.0292
118	-	-	0.03127	0.015	17.9	18.50	3.90	0.0163	0.2030	0.0320
119	-	-	0.03419	0.015	17.9	19.50	5.00	0.0192	0.2380	0.0351
120	-	-	0.03731	0.015	17.9	20.50	6.26	0.0223	0.2730	0.0383
121	-	-	0.04060	0.015	17.9	21.50	7.70	0.0256	0.3080	0.0417
122	-	-	0.04408	0.015	17.9	22.50	9.32	0.0291	0.3430	0.0452
123	-	-	0.02410	0.020	17.9	13.10	0.49	0.0041	0.0340	0.0244
124	-	-	0.02549	0.020	17.9	13.90	0.76	0.0055	0.0490	0.0258
125	-	-	0.02663	0.020	17.9	14.50	1.01	0.0066	0.0630	0.0270
126	-	-	0.02871	0.020	17.9	15.50	1.53	0.0087	0.0870	0.0292
127	-	-	0.03102	0.020	17.9	16.50	2.18	0.0110	0.1150	0.0316
128	-	-	0.03355	0.020	17.9	17.50	2.96	0.0135	0.1440	0.0342
129	-	-	0.03627	0.020	17.9	18.50	3.90	0.0163	0.1760	0.0370
130	-	-	0.03919	0.020	17.9	19.50	5.00	0.0192	0.2080	0.0401
131	-	-	0.04231	0.020	17.9	20.50	6.26	0.0223	0.2410	0.0433
132	-	-	0.04560	0.020	17.9	21.50	7.70	0.0256	0.2750	0.0467
133	-	-	0.02910	0.025	17.9	13.10	0.49	0.0041	0.0280	0.0294
134	-	-	0.03049	0.025	17.9	13.90	0.76	0.0055	0.0410	0.0308
135	-	-	0.03163	0.025	17.9	14.50	1.01	0.0066	0.0530	0.0320
136	-	-	0.03371	0.025	17.9	15.50	1.53	0.0087	0.0750	0.0342
137	-	-	0.03602	0.025	17.9	16.50	2.18	0.0110	0.0990	0.0366
138	-	-	0.03855	0.025	17.9	17.50	2.96	0.0135	0.1260	0.0392
139	-	-	0.04127	0.025	17.9	18.50	3.90	0.0163	0.1550	0.0420
140	-	-	0.04419	0.025	17.9	19.50	5.00	0.0192	0.1850	0.0451
141	-	-	0.03410	0.030	17.9	13.10	0.49	0.0041	0.0240	0.0344
142	-	-	0.03549	0.030	17.9	13.90	0.76	0.0055	0.0360	0.0358
143	-	-	0.03663	0.030	17.9	14.50	1.01	0.0066	0.0460	0.0370
144	-	-	0.03871	0.030	17.9	15.50	1.53	0.0087	0.0650	0.0392
145	-	-	0.04102	0.030	17.9	16.50	2.18	0.0110	0.0870	0.0416
146	-	-	0.04355	0.030	17.9	17.50	2.96	0.0135	0.1120	0.0442
147	-	-	0.04627	0.030	17.9	18.50	3.90	0.0163	0.1380	0.0470
148	-	-	0.03910	0.035	17.9	13.10	0.49	0.0041	0.0210	0.0394
149	-	-	0.04049	0.035	17.9	13.90	0.76	0.0055	0.0310	0.0408
150	-	-	0.04163	0.035	17.9	14.50	1.01	0.0066	0.0400	0.0420
151	-	-	0.04371	0.035	17.9	15.50	1.53	0.0087	0.0580	0.0442
152	-	-	0.04602	0.035	17.9	16.50	2.18	0.0110	0.0780	0.0466

\*Valores obtenidos numéricamente

\*\*Posición de la sección de cálculo



---

**Anejo D.**  
**Inundaciones en entorno urbano. Casos reales**

---





## NIMES (FRANCIA) – 3 OCTUBRE 1988

“Seis muertos y cientos de heridos por inundaciones”

Al menos **seis personas resultaron muertas, decenas heridas y unas cien tuvieron que ser evacuadas por helicóptero** en el departamento del Gard, en el sureste francés, debido a la tormenta desatada en la región. Fuentes de los servicios de socorro franceses agregaron que este balance era sólo provisional y señalaron que el número de víctimas podría aumentar.

A consecuencia de **las fuertes precipitaciones, que duraron tres horas**, la ciudad de Nimes quedó aislada, y algunas de sus principales calles, cubiertas por **más de dos metros de agua, cuya fuerza arrastraba en algunas callejuelas vehículos y demás enseres**.

Por otro lado la circulación por carretera y ferrocarril fue interrumpida y las comunicaciones telefónicas se vieron cortadas en toda la región, por lo que las autoridades del departamento proclamaron el estado de alarma. (...)



Fuente:

ABC Martes 4-10-88

Link:

<http://hemeroteca.abc.es/nav/Navigate.exe/hemeroteca/madrid/abc/1988/10/04/083.html>

## VAISON LA ROMAINE (FRANCIA) – 21 y 22 SEPTIEMBRE 1992

“Diluvio de agua sobre Vaison la Romaine”



Los días 21 y 22 de Septiembre de 1992, las regiones meridionales fueron afectadas por un episodio lluvioso muy activo.

Durante varios días los socorristas se dedicaron a encontrar a las víctimas. **La crecida del 22 de Septiembre de 1992 se caracteriza por su corta duración y su intensidad**. De hecho, en las 4 horas de duración, cayó según los lugares, entre 300 mm. y 143 mm. (179 mm. en Vaison). Además, pasó apenas 5 horas entre la inundación y el esbozo del descenso. Esta devastadora riada seguirá recordándose por las **pérdidas humanas: 32 muertes** cuyos 3 fallecieron en Séguret; los 4 desaparecidos (un cuerpo fue encontrado en Noviembre de 1993). Las pérdidas materiales se calcularon en 500 millones de Francos.

Fuente:

Meteo France

Link:

<http://pluiesextremes.meteo.fr/1992-09-22/catastrophe-de-vaision-la-romaine-.html>

## ATARFE (GRANADA) – 2 OCTUBRE 2014

“Atarfe se lleva la peor parte de la tormenta con más de 50 incidencias”

*Numerosos bajos, garajes y comercios han resultado afectados por la lluvia caída este jueves sobre este municipio.*

La localidad metropolitana de Atarfe se ha llevado la peor parte de la tormenta caída este jueves sobre Granada y el ‘Citurón’, con unas 50 incidencias desde las 18.00 horas, según ha informado a *ahoraGranada* un portavoz del Centro Coordinador de Emergencias 112.

La mayoría de ellas obedecen a la **inundación de bajos y garajes** que han resultado dañados por la tormenta por acumulación de agua, lo que ha provocado la intervención de los servicios de emergencias.

Además, algunos desagües han quedado saturados por la situación (...). Asimismo ha dicho que **en unos 30 minutos han caído en torno a 40 o 50 litros por metro cuadrado** y con el granizo ha quedado “todo” obstruido.



**Fuente:**

*Ahora Granada, 2/10/2014*

**Link:**

<http://www.ahoragranada.com/noticia/atarfe-se-lleva-la-peor-parte-de-la-tormenta-con-mas-de-50-incidencias/>

## BENIDORM (ALICANTE) – 6 OCTUBRE 2014

“Una tormenta descarga casi 30 litros en Benidorm y provoca inundaciones”



Una tormenta que ha recorrido de norte a sur la provincia de Alicante se ha cebado a primera hora de la tarde del domingo con Benidorm y ha provocado las habituales inundaciones en algunos puntos de la ciudad, como la Avenida Alfonso Puchades. (...).

En Serra Gelada, donde se han recogido casi **30 litros por metro cuadrado en menos de una hora y media** (...).

**Fuente:**

*La Marina Plaza, 6/10/2014*

**Link:**

<http://lamarinaplaza.com/2014/10/05/una-tormenta-descarga-en-benidorm-y-provoca-inundaciones/>

---

**PONTEVEDRA – 16 OCTUBRE 2014**
**“Pontevedra, en alerta roja por fuertes lluvias”**
*Vigo registra hasta 40 litros por metro cuadrado, según apunta Meteogalicia.*


---

Las fuertes lluvias caídas a lo largo de esta mañana en las Rías Baixas han **anegado calles y multitud de bajos**. Según indica Meteogalicia, se han registrado hasta **40 litros por metro cuadrado en Vigo, 47 en Sanxenxo, 35 en Salceda, 42 en Cotobade y 31 en Avión.** (...)

Según previsiones de la *AEMET*, a través de la Delegación Territorial de Galicia, para hoy se esperan lluvias de **hasta 120 milímetros de precipitación acumulada en doce horas**, lo que significa nivel rojo, aunque está previsto que por la tarde pase a naranja.


**Fuente:**
*Faro de Vigo, 16/10/2014*
**Link:**
<http://www.farodevigo.es/sociedad-cultura/2014/10/16/nivel-rojo-temporal-lluvia-interior/1113169.html>


---

**TENERIFE – 19 OCTUBRE 2014**
**“Las fuertes lluvias colapsan Tenerife”**


Santa Cruz de Tenerife ha sufrido este domingo uno de los temporales más devastadores de los últimos años. De hecho, hasta las 15:20 horas habían caído **139.2 litros por metro cuadrado** sobre la ciudad. Estos datos solo se vieron superados el 22 de marzo de 2002 en los últimos 70 años.(...)



A los daños materiales hay que sumarle el **fallecimiento de una mujer de 56 años. El agua le arrastró cuando se disponía a cruzar la calle Venezuela junto a su marido.** La mujer acabó debajo de un coche que estaba estacionado y sufrió un infarto. También dos personas sufrieron heridas leves en un

incendio producido por la caída de un rayo en una embarcación atracada en la dársena pesquera de Santa Cruz de Tenerife. Además, 4.000 usuarios se quedaron sin suministro eléctrico por inundaciones en dos estaciones transformadoras.

**Fuente:**
*www.eltiempo.es noticias, 19/10/2014*
**Link:**
<http://noticias.eltiempo.es/2014/10/19/las-fuertes-lluvias-colapsan-tenerife/>


---

## BUJALANCE (CÓRDOBA) – 15 ABRIL 2015

**“La lluvia y el granizo provoca una intensa riada en calles cercanas a la plaza Soriana”**

*En cinco minutos cayeron 25 litros y trozos de hielo de hasta un centímetro de diámetro.*

Algunas calles de Bujalance se convirtieron en auténticos ríos por la riada. Una intensa lluvia de hasta **25 litros caídos en cinco minutos**, acompañada de granizo de un grosor considerable, de hasta un centímetro de diámetro, provocaron esta tarde una auténtica riada en las calles centrales de Bujalance que **arrastró un vehículo durante varios metros** en las inmediaciones de la plaza Soriana y causaron la alarma entre el vecindario al ver que **el agua entraba también en sus viviendas**.



Las inundaciones fueron causadas por la imposibilidad de los sumideros de evacuar tal cantidad de agua acumulada en tan poco tiempo, además de que el granizo y el barro arrastrado desde una obra cercana a la citada plaza también sirvieron para taponar las alcantarillas, según ha informado a este periódico la alcaldesa bujalanceña, Elena Alba. (...).

*Fuente:*

*Diario ABC, 16/04/2015*

*Link:*

*<http://sevilla.abc.es/andalucia/cordoba/20150415/sevi-agua-bujalance-riada-201504152135.html>*

## FRESNO Y VALLEY (CALIFORNIA) 14 MAYO 2015

**“Storm drenches fresno ad valley; lightning, flooding reported”**

*Flooding buries cars at underpass*



A heavy thunderstorm drenched much of Fresno and other Valley cities on Thursday, stranding cars in a Fresno underpass and dampening a northwest Fresno ice cream parlor. (...)

The National Weather Service reported at 8 p.m. that **two-tenths of an inch of rain had fallen in the Fresno area**, raising the seasonal total to 6.15 inches. The average rainfall total for this time of year is 10.91 inches. (...)

As of 8 p.m., Wishon Avenue south of the Shields Avenue underpass was closed down by maintenance crews. Standriff said that although normal drainage systems carry away most of the rain water, the excessive amounts that fell on most areas would take a couple hours to dissipate. (...)

Because of heavy flooding at Palm and Shields avenues, water damaged a Baskin-Robbins ice cream store at the intersection, employee Alma Jimenez said. With the entire parking lot flooded, Jimenez said, water seeped through the front door causing damage to the interior.

*Fuente:*

*The Fresno Bee*

*Link:*

*<http://www.fresnobee.com/news/local/article21061089.html>*

## YECLA (MURCIA) – 1 JUNIO 2015

### “Una tromba de agua y granizo anega Yecla”

*El presidente de Fecoam confirma que la tormenta sólo ha afectado al casco urbano – Acompañada de abundante aparato eléctrico, ha provocado numerosas inundaciones en viviendas y sótanos – Es “lluvia beneficiosa” para Jumilla.*

La piedra, que cayó con fuerza en Yecla, llegó en forma de "lluvia beneficiosa a Jumilla". Así lo apuntó Pedro Lencina, presidente de la Denominación de Origen Protegida de Jumilla, que dijo que las precipitaciones, que cayeron sobre el paraje del Argal y el de la Hoya Torres, dejaron una media de entre 10 y 12 litros por metro cuadrado. (...)

No obstante, la tormenta, acompañada de abundante aparato eléctrico, ha provocado en Yecla numerosas inundaciones en viviendas y sótanos, según las mismas fuentes.

Además, han saltado tapas de alcantarillado. (...)



#### Fuente:

*La opinión de Murcia, 1/06/2015*

#### Link:

<http://www.laopiniondemurcia.es/municipios/2015/05/31/brutal-granzada-yecla/651724.html>

## BENIDORM (ALICANTE) – 6 OCTUBRE 2014

### “Un diluvio deja 75 litros por metro cuadrado en media hora en Olot”

*Los servicios de emergencias han atendido 138 llamadas en la capital de la Garrotxa hasta las 20.30*



Los Bombers de la Generalitat han hecho este miércoles por la tarde una treintena de salidas a causa de las fuertes lluvias. (...). **Dos guarderías han sido evacuadas** en la localidad gerundense de Olot a causa de una tormenta de lluvia que ha dejado **115 litros por metro cuadrado, 75 de ellos en solo media hora**, según informa Protecció Civil. Ante esta situación, la Generalitat de Catalunya ha activado la alerta Inuncat de emergencias por inundaciones y ha solicitado a la población que extreme las precauciones mientras dure el temporal. (...)

**Bajos y subterráneos se han visto afectados por el agua, así como el sistema de alcantarillado y algunas vías urbanas que están inundadas.** La Policía Local ha evacuado además esas dos guarderías de manera preventiva y ha informado de que la ausencia de daños personales, aunque sí a viviendas y naves industriales. (...)

#### Fuente:

*El periodico, 10 /06/2015*

#### Link:

<http://www.elperiodico.com/es/noticias/sociedad/los-bombers-realizan-una-treintena-salidas-causa-las-fuertes-lluvias-4263541>

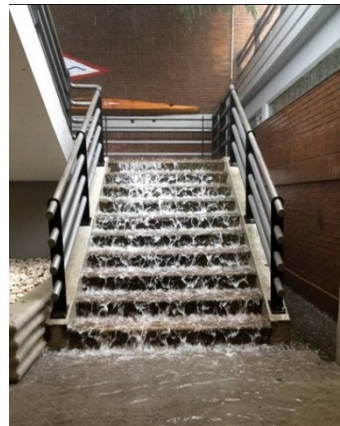
## GIJÓN (ASTURIAS) – 13 JUNIO 2015

### “Colapso de tráfico e inundaciones por la tromba de agua”

Una tormenta ha sorprendido esta tarde a los asturianos en la zona centro de la región. La intensa granizada ralentizó el tráfico en la autopista, y en las proximidades del nudo de Serín. Gijón ha sufrido importantes inundaciones en numerosas zonas.

Una intensa granizada ha sorprendido hoy en la zona central de la provincia a los asturianos. Tras una mañana estable o un poco cubierta en función de la ciudad, sobre las 17.00 comenzó una tormenta que causó graves inundaciones en algunas partes y provocó el caos en la autopista, en donde el tráfico se vio paralizado por la fuerte lluvia. (...)

Asimismo, la tromba de agua que se desató en la comarca de Avilés en torno a las cuatro de la tarde ha causado **fuertes inundaciones en calles, carreteras, garajes, bajos comerciales y también en lugares como la residencia geriátrica Larrañaga**, junto a la ría. La calle de Llano Ponte, uno de los principales accesos a la ciudad, ha sido cortada al tráfico por los propios comerciantes de la zona, dada la cantidad de agua acumulada. También **se han formado importantes balsas** en la Plaza del Vaticano, Valdés Salas, El Muelle, Avenida de Cervantes, el 'puentín' de Llaranes', la estación de ferrocarril de Villalegre y la calle Pruneda y otros muchos puntos de la comarca. (...)



**Fuente:**

*El comercio, 13/06/2015*

**Link:**

<http://www.elcomercio.es/asturias/201506/13/granizo-junio-20150613174033.html>

## FIGUERES (GIRONA) – 15 JUNIO 2015



Segundo episodio de fuertes lluvias en Figueres en solo cuatro días. Imágenes de la subida del castillo con el agua saliendo de los imbornales. En media hora han caído unos 30 litros por metro cuadrado.

**Fuente:**

*tramuntanatv, 15 /06/2015*

**Link:**

<http://www.tramuntanatv.com/news/cauen-30-litres-m2-en-mitja-hora-a-figueres/>

