

Universitat Politècnica de Catalunya
Barcelona Tech
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona
Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental
Institut Flumen UPC-CIMNE

TESIS DOCTORAL

DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA Y VELOCIDAD EN EMBALSES

*Análisis numérico-experimental aplicado a los embalses de Sau (Ter) y
Ribarroja (Ebro)*

Marina Arbat-Bofill

ID: L-5361-2013

ORCID ID: 0000-0003-3081-3099

Directores:

Martí Sánchez-Juny

Ernest Bladé i Castellet

Memoria presentada para obtener el grado de:
Doctora por la Universitat Politècnica de Catalunya
Programa de doctorado en Ingeniería Civil

Barcelona, junio de 2015

No regrets

*“Carry me to the shoreline
Bury me in the sand
Walk me across the water
And maybe you’ll understand*

*Once the stone
You’re crawling under
Is lifted off your shoulders
Once the cloud that’s raining
Over your head disappears
The noise that you’ll hear
Is the crashing down of hollow years”*

Dream Theater – Hollow Years

Abstract

Besides having an important social impact, the presence of a reservoir and its construction generate a direct impact in the rivers and in the surrounding landscape. The effects of the presence of reservoirs, plus the combination of these with power plants (that use river water for cooling) or with the effects of the Climate Change, can cause significant changes in the thermal behavior of the river and, consequently, in the inhabiting communities.

Water temperature is one of the most important variables of limnology studies: changes in the vertical temperature profile of a system modify the density of water and hence the stratification patterns. Most of the physical, chemical and biological processes that take place in a reservoir are controlled by the hydrodynamic and thermal evolution. The water temperature is the protagonist of this thesis because it is the key factor in most of the physical, chemical and biological processes occurring in aquatic ecosystems.

The hydrodynamic model of a reservoir has to provide information about its complexity, for example, water stratification, mixing processes and water velocities. The initial knowledge of the system hydrodynamics is also necessary to carry out studies of water quality. The hydrodynamic performance is critical in terms of suspended sediment transport, dissolved contaminants or biological processes. In summary, the study of the hydrodynamic evolution of a reservoir is useful to know the quality of the stored water.

This thesis has also furthered the knowledge of the hydrodynamic and thermal behavior of reservoirs. First of all a field data has been gathered, showing the hydrodynamic and thermal behavior of two catalonian reservoirs: Ribarroja Reservoir (Ebro River) and Sau Reservoir (Ter River). Both reservoirs are similar but differ in morphology, hidrology, water level, management criteria, sediment transport or in the presence of invasive species.

Besides experimentally studying Ribarroja and Sau reservoirs by taking field data, in both cases the study has been supported by 2D and 3D numerical modeling. Numerical models of reservoirs are a useful tool for studying the behavior of the reservoirs as well as for predicting water quality and for managing the dam. After studying the thermal and hydrodynamic behavior of the reservoirs, numerical models have been applied to determine the thermal evolution in the length and depth of the studied reservoirs. For doing this CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008) model has been used, presenting good data fit to the data field campaigns.

Noting that the 2D simulation using CE-QUAL-W2 was not capturing the complex 3D hydrodynamics of the Ebro-Segre Rivers confluence in the tail of Ribarroja reservoir, it has been studied using a 3D model. FreeFlow (Cea et al., 2008) is the 3D hydrodynamic model used in which, in the context of this thesis, a surface heat module has been added in order to compute the surface heat balance based on meteorological data.

Key words: quality modelling; reservoirs; numerical model.

Resum

A més a més de tenir un gran impacte social, la presència i la construcció d'embassaments genera un impacte directe en els rius i sobre el paisatge sobre el qual flueixen. Els efectes de la presència d'embassaments, a més a més de la combinació d'aquests amb les centrals tèrmiques que utilitzen l'aigua del riu per a refrigeració o els efectes del Canvi Climàtic poden provocar canvis importants en el comportament tèrmic del riu i conseqüentment en les comunitats que d'ell depenen.

La temperatura de l'aigua és una de les variables més importants des del punt de vista de la limnologia: els canvis en el perfil vertical de temperatura d'un sistema modifiquen la densitat de l'aigua i per tant, els patrons d'estratificació. La major part dels processos físics, químics i biològics que tenen lloc en un embassament vénen controlats per la hidrodinàmica i l'evolució tèrmica. La temperatura de l'aigua és la protagonista de la present tesi per ser el factor clau en la majoria dels processos físics, químics i biològics que tenen lloc en els ecosistemes aquàtics.

El model hidrodinàmic d'un embassament ha de proporcionar informació sobre aquesta complexitat, per exemple: l'estratificació de l'aigua, mescla i velocitats. El coneixement de la hidrodinàmica inicial del sistema és necessari també per dur a terme estudis de la qualitat de l'aigua. El funcionament hidrodinàmic és crític en termes de transport de sediments en suspensió, contaminants dissolts o processos biològics. En resum, l'estudi de l'evolució hidrodinàmica d'un embassament és útil per conèixer la qualitat de l'aigua emmagatzemada.

En aquesta tesi doctoral s'ha avançat en el coneixement del comportament hidrodinàmic i tèrmic dels embassaments. Per a això s'ha realitzat una primera campanya d'obtenció de dades de camp que mostra el comportament de dos embassaments catalans: l'embassament de Riba-roja (al riu Ebre) i l'embassament de Sau (al riu Ter). Tots dos embassaments són similars però difereixen en característiques morfològiques, hidrològiques, variació de nivell, criteris de gestió, aportació de sediments o presència d'espècies invasores.

A més d'estudiar els embassaments de Riba-roja i Sau experimentalment mitjançant la presa de dades de camp, en ambdós casos l'estudi s'ha recolzat en la modelització numèrica 2D i 3D. Els models numèrics orientats a la hidrodinàmica d'embassaments són una eina útil tant per a l'estudi del comportament dels embassaments com per a les prediccions i la gestió sostenible dels mateixos. Després d'estudiar el comportament tèrmic i hidrodinàmic dels embassaments, s'han aplicat models numèrics per conèixer l'evolució tèrmica al llarg de la longitud i la profunditat dels embassaments d'estudi. Per a això s'ha utilitzat el model CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008) presentat un bon ajust a les dades de les campanyes de camp.

En notar que la simulació 2D mitjançant CE-QUAL-W2 resultava massa simplificada per representar alguns dels fenòmens que tenen lloc en un embassament, com és el cas de la hidrodinàmica de la cua de l'embassament de Riba-roja d'Ebre (confluència entre els rius Segre i Ebre), s'ha estudiat la zona mitjançant un model 3D. El model hidrodinàmic 3D utilitzat és el FreeFlow (Cea et al., 2008), al qual en el context d'aquesta tesi se li afegit un mòdul que realitza el balanç tèrmic superficial en funció de les dades meteorològiques.

Paraules clau: *embassament, qualitat de l'aigua, models numèrics*

Resumen

Además de tener un gran impacto social, la presencia y la construcción de embalses genera un impacto directo en los ríos y sobre el paisaje sobre el cual fluyen. Los efectos de la presencia de embalses, además de la combinación de éstos con las centrales térmicas que utilizan el agua del río para refrigeración o los efectos del Cambio Climático pueden provocar cambios importantes en el comportamiento térmico del río y consecuentemente en las comunidades que de él dependen.

La temperatura del agua es una de las variables más importantes desde el punto de vista de la limnología: los cambios en el perfil vertical de temperatura de un sistema modifican la densidad del agua y por lo tanto, los patrones de estratificación. La mayor parte de los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en un embalse vienen controlados por la hidrodinámica y la evolución térmica. La temperatura del agua es la protagonista de la presente tesis por ser el factor clave en la mayoría de los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los ecosistemas acuáticos. El modelo hidrodinámico de un embalse debe proporcionar información acerca de esta complejidad, por ejemplo: la estratificación del agua, mezcla y velocidades. El conocimiento inicial de la hidrodinámica del sistema es necesario también para llevar a cabo estudios de la calidad del agua. El funcionamiento hidrodinámico es crítico en términos de transporte de sedimentos en suspensión, contaminantes disueltos o procesos biológicos. En resumen, el estudio de la evolución hidrodinámica de un embalse es útil para conocer la calidad del agua almacenada.

En esta tesis doctoral se ha avanzado en el conocimiento de comportamiento hidrodinámico y térmico de los embalses. Para ello se ha realizado una primera campaña de obtención de datos de campo que muestra el comportamiento de dos embalses catalanes: el embalse de Ribarroja (en el río Ebro) y el embalse de Sau (en el río Ter). Ambos embalses son similares pero difieren en características morfológicas, hidrológicas, variación de nivel, criterios de gestión, aporte de sedimentos o presencia de especies invasoras.

Además de estudiar los embalses de Ribarroja y Sau experimentalmente mediante la toma de datos de campo, en ambos casos el estudio se ha apoyado en la modelización numérica 2D y 3D. Los modelos numéricos orientados a la hidrodinámica de embalses son una herramienta útil tanto para el estudio del comportamiento de los embalses como para las predicciones y la gestión sostenible de los mismos. Después de estudiar el comportamiento térmico e hidrodinámico de los embalses, se han aplicado modelos numéricos para conocer la evolución térmica en la longitud y la profundidad de los embalses de estudio. Para ello se ha utilizado el modelo CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008) presentado un buen ajuste a los datos de las campañas de campo.

Al notar que la simulación 2D mediante CE-QUAL-W2 resultaba demasiado simplificada para representar algunos de los fenómenos que tienen lugar en un embalse, como es el caso de la hidrodinámica de la cola del embalse de Ribarroja de Ebro (confluencia entre los ríos Segre y Ebro), se ha estudiado la zona mediante un modelo 3D. El modelo hidrodinámico 3D utilizado es el FreeFlow (Cea et al., 2008), al que en el contexto de esta tesis se le añadió un módulo que realiza el balance térmico superficial en función de los datos meteorológicos.

Palabras clave: *embalse, calidad del agua, modelos numéricos*

Agradecimientos

Primer de tot agrair als meus dos directors: Martí Sánchez-Juny i Ernest Bladé la seva dedicació, moltes gràcies per guiar-me, aconsellar-me i ajudar-me en tot moment (la millor unió de tutors que podria tenir); sense ells no ho hauria aconseguit i m'hauria ensorrat més d'un cop. Agrair també molt especialment a en Josep Dolz la confiança, els consells i els projectes que m'han ajudat a avançar pas a pas. Un altre pilar molt important en tot aquest procés ha estat en Daniel Niñerola, des del començament, pels consells paternals, per confiar sempre en mi i deixar-me fer de professora any rere any.

Aquesta tesi s'ha subvencionat amb les beques AGAUR-FI per a personal novell A (número d'expedient: 2009FI_A 00336) i B (número d'expedient: 2010FI_B 01113). Gràcies també a tot el personal de l'Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca (AGAUR) per fer-ho possible. També vull agrair a l'Institut Flumen el suport econòmic que he rebut.

També vaig tenir l'oportunitat de fer una estada a Estats Units d'Amèrica, amb la beca BE DGR (número d'expedient: 2011 BE1_00951) dividida en dues estades de tres mesos a dos centres de recerca americans que han estat molt importants en aquest treball. Primer de tot agrair als professors Geoffrey Schladow i Alex Forrest del Tahoe Research Environmental Center (university of California, Davis). També vaig fer una estada de tres mesos al Water Quality Research Group de la Portland State University, sota la tutela de Scott Wells i Chris Berger. Durant aquestes estades he pogut aprendre molt del coneixement i l'experiència dels professors mencionats.

Vull dedicar aquest treball a tots els meus companys de doctorat: els que han marxat, els que es queden i els que arriben! Gràcies pels moments compartits, pel que he après de vosaltres, per l'amistat, per la companyia, els consells i... fins i tot les discussions...

A en Quim Rabadà per la feinada que vas tenir amb tot el merder de la instrumentació, pels viatges (sempre escoltant bona música) a Riba-roja i Sau, pels concerts compartits i pels cafès! A la Georgina per fer-me decidir a fer el doctorat, pels viatges BCN-Olot i Olot-BCN! A en Hans per les consultes informàtiques i xafarderes! A l'Arnau per l'ajuda amb el projecte de Sau, A la Klaudia i la Irene per les correccions del meu anglès! A la Sole per les xerrades, els cafès (te echo mucho de menos! jejejej); a la súper-Belén perquè de tant en tant ens desfoguem juntes, d'aquí uns anys vull ser com tu! (però amb independentista ja

saps ;) jeje). A en Jordi Prats i l'Anaïs per tota l'ajuda amb els models de temperatura i de transferència de calor. A en José Luis, el meu veí, per l'ajuda amb el Fortran! A en Rodrigo (pels consells i la música, DT power!) i la Utu (pels riures), en Carlos, en Beniamino, la Jannette, en Gonzalo, l'Edu, l'Eduard, l'altre Eduard, Esteban, Virginia, Andrés, en Jackson, la Chiara, ... a la resta de companys de Flumen: Cèlia, Cesca, Juan, Xavi, Jaume,... i també a tots els doctorands tant de la secció com de tot el departament, per les xerrades DEHMA i pels bons moments.

A les meves amigues: Anna Reixach, Sílvia Cortada, Neus Gràcia, als "Penyates", ... Als companys d'Enginyeria Geològica i als meus companys/es dels pisos d'aquests anys (Aina, Núria, Ari, Zina, Medir, Elena, Ger, Marta B., Marta H.).

A Sants3ràdio, Ràdio Palafrugell i als Tallers Radiofònics. A Rac1 per totes les hores que m'han acompanyat, especialment a "La Segona Hora", a "la Competència", a "El Món a Rac1" (Bon dia Basté!!!) i al "Versió Rac1".

Als meus companys de tren i AVE amb qui hem compartit moltes estones.

A la Música, que m'ha ajudat sempre en els moments durs i m'ha ajudat a celebrar els bons.

Dedico el projecte als avis, als meus pares, a la meva germana Núria, a tota la meva família i sobretot... a les dues persones que més m'han animat (i aguantat) cada dia durant aquests anys: en Jordi Carles durant la primera part de tesi i en Jordi Sarrinat durant la segona!!

I finalment moltes gràcies a tu, per llegir aquesta tesi.

Marina

Índice

Abstract	i
Resum	iii
Resumen	v
Agradecimientos	vii
Índice	ix
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tablas	xxi
Capítulo 1 OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS	23
1.1 CONTEXTO, ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	24
1.2 OBJETIVOS	25
1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS	25
1.4 AGRADECIMIENTOS	26
1.5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27
Capítulo 2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO	29
2.1 INTRODUCCIÓN	29
2.1.1 Binomio agua-energía	29
2.1.2 Marco Legal	30
2.1.3 Perspectivas de futuro	31
2.2 HIDRODINÁMICA DE EMBALSES	31
2.2.1 Limnología de embalses	32
2.2.2 Agentes dinámicos	32
2.2.3 Estratificación	33
2.3 TEMPERATURA DEL AGUA	34
2.3.1 La temperatura en embalses	35
2.3.2 Alteraciones térmicas	37
2.3.3 Estratificación térmica	37
2.3.4 Procesos de mezcla	40
2.3.5 Ciclo diario	40
2.3.6 Transporte de temperatura en el agua	41
2.3.7 Intercambio de calor agua-atmósfera	41
2.3.8 Flujos de entrada y salida	46
2.3.9 Intercambio de calor masa de agua – sedimento del sustrato	47
2.4 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	49
2.4.1 Sedimentos en suspensión y transporte de fondo	49
2.4.2 Sedimentos depositados en embalses	50
2.5 CALIDAD DEL AGUA	51
2.5.1 Eutrofización	51
2.6 MODELIZACIÓN NUMÉRICA	52
2.6.1 Modelización de embalses	52
2.6.2 Modelización de la temperatura en embalses	54
2.6.3 Modelización tridimensional	55
2.6.4 Esquemas numéricos	56
2.6.5 Ecuaciones 3D	57
2.6.6 Herramientas numéricas existentes	60
2.6.7 Discusión	66
2.7 BIBLIOGRAFÍA	67
Capítulo 3 CASOS DE ESTUDIO	79

3.1	INTRODUCCIÓN	79
3.2	TIPOLOGÍAS DE EMBALSE.....	82
3.2.1	Características de los embalses	82
3.2.2	Embalse largo y estrecho, poca variación de nivel	83
3.2.3	Embalse de geometría irregular, variaciones de nivel importantes	84
3.3	CASO 1: EMBALSE DE RIBARROJA DE EBRO (RÍO EBRO).....	84
3.3.1	Zona de estudio	84
3.3.2	Embalse de Ribarroja	85
3.3.3	Geología/Topografía	87
3.3.4	Climatología	89
3.3.5	Hidrología	89
3.3.6	Antecedentes	90
3.4	CASO 2: EMBALSE DE SAU (RÍO TER).....	94
3.4.1	Zona de Estudio	94
3.4.2	Embalse de Sau	95
3.4.3	Geología/Topografía	98
3.4.4	Climatología	99
3.4.5	Hidrología	99
3.4.6	Antecedentes	100
3.5	CONCLUSIONES.....	101
3.6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
Capítulo 4 INSTRUMENTACIÓN Y TRABAJO DE CAMPO		111
4.1	INTRODUCCIÓN	111
4.2	CASO 1: EMBALSE DE RIBARROJA DE EBRO (RÍO EBRO).....	112
4.2.1	Antecedentes de estudios del Instituto Flumen	112
4.2.2	Localización de los puntos de medida	114
4.2.3	Descripción de la instrumentación	115
4.2.4	Análisis de los datos de Ribarroja (campaña 2009-2010)	122
4.2.5	Otras fuentes de datos de campo	127
4.3	CASO 2: EMBALSE DE SAU (RÍO TER).....	129
4.3.1	Antecedentes de estudios del Instituto Flumen	129
4.3.2	Localización de los puntos de medida	130
4.3.3	Descripción de la instrumentación	131
4.3.4	Análisis de los datos de Sau (Campaña 2011)	133
4.4	TRATAMIENTO Y ALMACENAMIENTO DE DATOS DE CAMPO.....	134
4.4.1	Control de calidad	134
4.4.2	Tratamiento de los datos	134
4.5	CONCLUSIONES.....	136
4.6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136
Capítulo 5 HIDRODINÁMICA DE LOS CASOS DE ESTUDIO.....		139
5.1	INTRODUCCIÓN	139
5.2	CASO 1: EMBALSE DE RIBARROJA DE EBRO.....	140
5.2.1	Campaña 2009-2010	140
5.2.2	Evolución térmica del embalse	161
5.2.3	Tiempo de tránsito en el embalse	170
5.2.4	Discusión	171
5.3	CASO 2: EMBALSE DE SAU (RÍO TER).....	172
5.3.1	Campaña 2011	173
5.3.2	Evolución térmica del embalse	182
5.4	CONCLUSIONES.....	183

5.5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	184
Capítulo 6	MODELIZACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL.....	187
6.1	INTRODUCCIÓN.....	187
6.2	EL MODELO CE-QUAL-W2.....	187
6.2.1	Ficheros de entrada	188
6.2.2	Discretización de la batimetría	189
6.2.3	Condiciones iniciales	190
6.2.4	Condiciones de contorno	190
6.2.5	Datos meteorológicos	191
6.3	METODOLOGÍA.....	191
6.3.1	Puesta a punto del modelo	193
6.4	CASO 1: EMBALSE DE RIBARROJA DE EBRO (RÍO EBRO).....	194
6.4.1	Discretización de la geometría	194
6.4.2	Calibración del modelo	196
6.4.3	Validación del modelo	204
6.4.4	Evolución temporal de la hidrodinámica del embalse	211
6.4.5	Tiempo de permanencia	222
6.4.6	Discusión	226
6.5	CASO 2: EMBALSE DE SAU (RÍO TER).....	230
6.5.1	Malla de cálculo	230
6.5.2	Análisis de sensibilidad	232
6.5.3	Validación del modelo	232
6.5.4	Evolución temporal de la hidrodinámica: año 2011	235
6.5.5	Discusión	239
6.6	CONCLUSIONES.....	241
6.6.1	Utilización del modelo	241
6.6.2	Aplicación del modelo CE-QUAL-W2	241
6.6.3	Casos de estudio	242
6.6.4	Limitaciones del modelo CE-QUAL-W2	242
6.7	BIBLIOGRAFÍA.....	243
Capítulo 7	MODELIZACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL.....	245
7.1	INTRODUCCIÓN.....	245
7.2	EL MODELO FREE FLOW.....	247
7.2.1	Mallade de la geometría	248
7.2.2	Módulo hidrodinámico	250
7.2.3	Módulos de salinidad y temperatura	250
7.2.4	Condiciones iniciales y condiciones de contorno	251
7.3	BALANCE TÉRMICO SUPERFCIAL.....	252
7.4	VALIDACIÓN.....	253
7.4.1	Datos de Laboratorio: depósito de agua en el exterior	253
7.4.2	Datos de campo: Lago Tahoe (USA)	256
7.5	APLICACIÓN A LA CONFLUENCIA EBRO-SEGRE.....	260
7.5.1	Malla de estudio	260
7.5.2	Día 31-03-11	262
7.5.3	Día 11-10-11	274
7.6	EFFECTO DE UNA INSTALACIÓN DE REFRIGERACIÓN EN LA TEMPERATURA DE UN RÍO.....	284
7.7	CONCLUSIONES.....	286
7.7.1	Capacidades del modelo	286
7.7.2	Limitaciones del modelo	287
7.7.3	Futuros desarrollos	288

7.8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	289
Capítulo 8	CONCLUSIONES.....	293
8.1	INTRODUCCIÓN	293
8.2	CONCLUSIONES GENERALES	294
8.2.1	Casos de estudio	294
8.2.2	Instrumentación y trabajo de campo	295
8.2.3	Hidrodinámica de los casos de estudio	296
8.2.4	Modelización numérica bidimensional	300
8.2.5	Modelización numérica tridimensional	304
8.3	POSIBLES APLICACIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	307
8.4	FUTUROS TRABAJOS.....	308
8.4.1	Modelación numérica bidimensional	308
8.4.2	Modelización numérica tridimensional	309
8.5	RECOMENDACIONES	310
8.6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	312

Anejos

Anejo 1: Lista de publicaciones, comunicaciones en congresos, participación en proyectos y otras contribuciones

Anejo 2: Calendario juliano

Anejo 3: Condición de contorno de temperatura del agua de entrada al embalse de Ribarroja de Ebro

Anejo 4: Análisis y modelización numérica bidimensional de la dinámica del sedimento en Ribarroja de Ebro.

Anejo 5: Modelización numérica de la hidrodinámica en el entorno de la confluencia Ebro-Segre en 2D y 3D

Anejo 6: Módulo “temp_sup”

Índice de Figuras

Figura 1. Agentes dinámicos actuando en un embalse: A) Mezcla superficial; B) Oscilaciones, C) Intrusión del/los flujo/s de aporte (caudales principales y o efluentes), D) Punto de inmersión; E) Efectos de la extracción.	33
Figura 2. Esquema de embalse estratificado. Se distinguen las tres capas: epilimnion, metalimnion (termoclina) e hipolimnion (modificado de González, 2007).	34
Figura 3. Estratificación térmica a lo largo del año, a) Primavera, b) Verano, c) Otoño y d) Invierno.	38
Figura 4. El intercambio de energía en el agua y la atmósfera. Esquema modificado (Salençon & Thebault, 1997).	43
Figura 5. Evolución del número de presas. Fuente: datos del Comité Español de Grandes Presas hasta 2010 (www.spancold.es) actualizado por la autora.	80
Figura 6. Embalses de Catalunya. Fuente: Agència Catalana de l'Aigua © 2000-2014.	80
Figura 7. Sistema de embalses Mequinzenza – Ribarroja - Flix en el curso medio bajo del río Ebro. Fuente: ICC, imagen de satélite 1:250.000 (25m/píxel), modificado por la autora.	85
Figura 8. Esquema de la presa de Ribarroja. Autor: Óscar González modificado por la autora (Ó. González, 2007).	86
Figura 9. Imagen de satélite de la zona de estudio. Fuente: ICC, Imagen de satélite 1:250.000 (25 m/píxel).	88
Figura 10. Geología de la zona de estudio. Fuente: ICC-IGC, Imagen de satélite 1:250.000.	88
Figura 11. Sistema de embalses Sau - Susqueda . Fuente: ICC, Topográfico 1:250.000, modificado por la autora.	95
Figura 12. Embalse de Sau. Fuente: ICC, mapa topográfico 1:50.000, modificado por la autora.	95
Figura 13. Embalse de Sau. Fuente: Fuente: ICC, ortofoto 1:50.000 (2.5 m/píxel).	96
Figura 14. Esquema de las compuertas en el embalse de Sau y cotas de operación. Datos de ATLL-ACA, elaboración propia.	97
Figura 15. Imagen de satélite de la zona de estudio. Fuente: ICC, Imagen de satélite 1:250.000 (25 m/píxel).	98
Figura 16. Puntos de medida del Instituto Flumen en el tramo final del río Ebro, desde aguas arriba del embalse de Mequinzenza hasta Xerta. Sistema de embalses Mequinzenza-Ribarroja-Flix y curso bajo del río Ebro.	113
Figura 17. Zoom correspondiente al embalse de Ribarroja.	113
Figura 18. Localización de los puntos de medida en la campaña realizada en 2009-2010 para el estudio térmico del embalse de Ribarroja de Ebro: puntos de medida de temperatura (2 y 5), boya con cadena de termistores situada en Almatret (6) y Plataforma Flumen (7).	115
Figura 19. Plataforma multiparamétrica Flumen; situada en el embalse de Ribarroja de Ebro.	116
Figura 20. Sonda multiparamétrica AANDERAA RCM-9 instalada en la plataforma Flumen. Se pueden apreciar algunos de los sensores montados en la sonda.	118
Figura 21. Boya Flumen instalada en el embalse de Ribarroja de Ebro (años 2009-2010). La boya se situó delante del embarcadero de Almatret (Punto 7 de la Figura 18).	120
Figura 22. Esquema de montaje de la boya de termistores situada en Almatret. Diseño: Instituto Flumen UPC-CIMNE.	121
Figura 23. Disponibilidad de datos 2009. Verde: datos correctos. Naranja: disponibilidad de datos con ciertos errores que precisan de tratamiento. Rojo: existencia de datos con errores importantes. Gris: no existen datos.	123
Figura 24. Disponibilidad de datos 2010. Verde: datos correctos. Naranja: disponibilidad de datos con ciertos errores que precisan de tratamiento. Rojo: existencia de datos con errores importantes. Gris: no existen datos.	124
Figura 25 Caudales medios diarios de entrada/salida al embalse de Ribarroja de Ebro. Año 2009. Fuente: ENDESA.	125
Figura 26 Caudales medios diarios de entrada/salida al embalse de Ribarroja de Ebro. Año 2010. Fuente: ENDESA.	125
Figura 27 Niveles del embalse de Ribarroja de Ebro (año 2009). Fuente: ENDESA.	126
Figura 28 Niveles del embalse de Ribarroja de Ebro (año 2010). Fuente: ENDESA.	126
Figura 29 Definición del periodo de estudio 2009 y disponibilidad/calidad de los datos. Naranja: disponibilidad de datos con ciertos errores que precisan de tratamiento. Rojo: existencia de datos con errores importantes. Gris: no existen datos.	126

Figura 30. Definición del periodo de estudio 2010 y disponibilidad/calidad de los datos. Naranja: disponibilidad de datos con ciertos errores que precisan de tratamiento. Rojo: existencia de datos con errores importantes. Gris: no existen datos.	127
Figura 31. Área observada por el sensor TASI en las tres pasadas del vuelo.	128
Figura 32. Radiancia registrada en la banda 9 del sensor TASI.	128
Figura 33. Imagen térmica superficial obtenida mediante el sensor TASI a 31 de marzo.	128
Figura 34. Imagen térmica superficial obtenida mediante el sensor TASI a 31 de marzo.	128
Figura 35. Localización de los puntos de medida de temperatura del agua en el embalse de Sau (río Ter).	130
Figura 36. Detalle del termistor PT100 (marca Desin Instruments, modelo: PT100 SR-NXH-1/10 DIN de 3 hilos).	131
Figura 37. Boya Flumen instalada en el embalse de Sau, siguiendo la línea de boyas que limita la zona de navegación (junto a la presa de Sau). Verano de 2011.	131
Figura 38. Detalle de la instrumentación meteorológica situada en el embalse de Sau.	132
Figura 39. Caudales medios diarios de entrada y salida al embalse de Ribarroja de Ebro entre el 145 (25 de mayo) y 295 (22 de octubre de 2009).	140
Figura 40. Caudales medios diarios de entrada y salida al embalse de Ribarroja de Ebro entre el 145 (25 de mayo) y 295 (22 de octubre) de 2010.	141
Figura 41. Evolución del nivel medio diario de embalse para el periodo de estudio del año 2009.	142
Figura 42. Evolución del nivel medio diario del embalse para el periodo de estudio del año 2010.	142
Figura 43. Evolución de la temperatura media diaria del aire para el periodo de estudio del año 2009 en la plataforma Flumen.	143
Figura 44. Evolución de la temperatura media diaria del aire para el periodo de estudio del año 2010 en la plataforma Flumen.	144
Figura 45. Evolución de la humedad relativa media diaria del aire para el periodo de estudio del año 2009, en la plataforma Flumen.	145
Figura 46. Evolución de la humedad relativa media diaria del aire para el periodo de estudio del año 2010, en la plataforma Flumen.	145
Figura 47. Evolución de la radiación solar neta media diaria para el periodo de estudio del año 2009, en la estación meteorológica XAC situada en la presa de Ribarroja de Ebro.	146
Figura 48. Evolución de la radiación solar neta media diaria para el periodo de estudio 2010, en la estación meteorológica XAC situada en la presa de Ribarroja de Ebro, medias diarias.	147
Figura 49. Evolución de la precipitación acumulada en 24 horas para el periodo de estudio del año 2009 en la plataforma Flumen, embalse de Ribarroja de Ebro.	148
Figura 50. Evolución de la precipitación acumulada en 24 horas para el periodo de estudio del año 2010 en la plataforma Flumen, embalse de Ribarroja de Ebro).	148
Figura 51. Rosas del viento mensuales (de mayo a octubre) para el periodo de estudio correspondiente al año 2009.	149
Figura 52. Rosas del viento mensuales (de mayo a octubre) para el periodo de estudio correspondiente al año 2010.	149
Figura 53. Temperatura promedio semanal a partir de los datos de los años 1998 y 1999. Entrada del río Ebro (azul), entrada del río Segre (rojo) y temperatura del agua promediada según los caudales medios diarios de 2009 (verde) y en lila según los caudales medios diarios de 2010 (lila).	151
Figura 54. Evolución de la temperatura media diaria del agua a 2, 4, 8 y 12 m de profundidad, en la cadena de termistores de la boya de Almatret.	152
Figura 55. Evolución de la temperatura media diaria del agua (medias diarias) a distintas profundidades, en la cadena de termistores de la Boya de Almatret.	154
Figura 56. Evolución del perfil vertical de temperatura medido en la plataforma Flumen, para el periodo 145- 295 del año 2009. Plataforma situada aproximadamente a un kilómetro de la presa de Ribarroja. Medidas cada 6h. Se han interpolado los periodos con falta de datos.	156
Figura 57. Evolución del perfil vertical de temperatura medido en la plataforma Flumen, para el periodo 145-295 del año 2010. Plataforma situada aproximadamente a un kilómetro de la presa de Ribarroja. Medidas cada 6h. Se han interpolado los periodos con falta de datos.	157
Figura 58. Evolución del perfil vertical de velocidades horizontales del agua medido en la plataforma Flumen, para el periodo 145 al 295 del año 2009. Medidas cada 6h. Se han interpolado los periodos con falta de datos.	159

Figura 59. Evolución del perfil vertical de velocidades horizontales medido en la plataforma Flumen, para el periodo 145-295 del año 2010. Medidas cada 6h. Se han interpolado los vacíos y periodos con falta de datos.	159
Figura 60. Evolución térmica del río Ebro, del río Segre y de la mezcla de ambos (temperatura promediada en función el caudal medio diario de cada entrada). Periodo de estudio del año 2009. Valores medios semanales.	161
Figura 61. Correlación de la evolución térmica del agua a diferentes profundidades en la boya Almatret con los caudales de entrada al embalse de Ribarroja de Ebro (río Ebro en azul, río Segre en naranja y mezcla en verde). Periodo de estudio del año 2009. Valores medios diarios.	162
Figura 62. Correlación de las entradas de caudales medios diarios (río Ebro en azul y río Segre en rojo) con la evolución térmica de la columna de agua medida por la sonda multiparamétrica Flumen (medidas cada 6 h). Periodo de estudio del año 2009. Pico de caudal (línea discontinua gruesa), respuesta en la columna de agua (línea discontinua fina).	163
Figura 63. Suposición de la circulación de los caudales de entrada del río ebro (azul) y del río Segre (rojo) al embalse de Ribarroja en función de su temperatura en la zona de la plataforma Flumen Posición de la temperatura de los caudales de entrada al embalse en función de su temperatura (línea continua), agua de entrada con temperatura inferior a las del gráfico (línea discontinua).Periodo de estudio del año 2009.	164
Figura 64. Comparación de la temperatura del agua medida en la boya de almatret con la temperatura del agua medida en la Plataforma Flumen (a unos 300 m aguas arriba de la presa de Ribarroja). Periodo de estudio del año 2009.	165
Figura 65. Evolución térmica del río Ebro, del río Segre y de la mezcla de ambos (temperatura promediada en función el caudal medio diario de cada entrada). Periodo de estudio del año 2010. Valores medios semanales.	166
Figura 66. Correlación de la evolución térmica del agua a diferentes profundidades (boya de Almatret) con los caudales de entrada al embalse de Ribarroja de Ebro. Periodo de estudio del año 2010.	167
Figura 67. Correlación de las entradas de caudales medios diarios (río Ebro en azul y río Segre en rojo) con la evolución térmica de la columna de agua medida por la sonda multiparamétrica Flumen (medidas cada 6 h). Periodo de estudio del año 2010.	167
Figura 68. Suposición de la circulación de los caudales de entrada del río ebro (azul) y del río Segre (rojo) al embalse de Ribarroja en función de su temperatura en la zona de la plataforma Flumen Posición de la temperatura de los caudales de entrada al embalse en función de su temperatura (línea continua), agua de entrada con temperatura inferior a las del gráfico (línea discontinua).Periodo de estudio del año 2009 2010.	168
Figura 69. Comparación de la temperatura del agua medida en la boya de Almatret con la temperatura del agua medida en la Plataforma Flumen (a unos 300 m aguas arriba de la presa de Ribarroja). Periodo de estudio del año 2010.	169
Figura 70. Incrementos de tiempo (Δt) del avance de los picos de caudal seleccionados, para el estudio de los años 2009 y 2010.	170
Figura 71. Serie de caudales medios diarios de entrada y salida del embalse de Sau. Periodo de estudio del día juliano 55 (24 de febrero) al 273 (30 de septiembre de 2011).	174
Figura 72. Evolución dea nivel del embalse de Sau y cota de extracción de las compuertas. Periodo de estudio del día juliano 55 (24 de febrero) al 273 (30 de septiembre de 2011).	175
Figura 73. Temperatura media diaria del aire medida en la estación meteorológica de Sau. Periodo de estudio del día juliano 55 (24 de febrero) al 273 (30 de septiembre de 2011).	176
Figura 74. Humedad relativa (medias diarias) medida en la estación meteorológica de Sau. Periodo de estudio del día juliano 55 (24 de febrero) al 273 (30 de septiembre de 2011).	176
Figura 75. Velocidad media diaria del vient medida en la estación meteorológica de Sau. Periodo de estudio del día juliano 55 (24 de febrero) al 273 (30 de septiembre de 2011).	177
Figura 76. Radiación solar incidente medida en la estación meteorológica de Gurb. Periodo de estudio del día juliano 55 (24 de febrero) al 273 (30 de septiembre de 2011).	177
Figura 77. Evolución de la temperatura del agua de entrada al embalse de Sau. Periodo de estudio del día juliano 55 (24 de febrero) al 273 (30 de septiembre de 2011).Registro obtenido en la EDAR de Roda de Ter (fuente: ACA).	178
Figura 78. Evolución de la temperatura del agua en la boya pequeña (punto 2). Frecuencia diezminutal. Periodo de estudio del día juliano 55 (24 de febrero) al 273 (30 de septiembre de 2011).	179
Figura 79. Evolución de la temperatura del agua en la boya grande (punto 3). Frecuencia diezminutal. Periodo de estudio del día juliano 55 (24 de febrero) al 273 (30 de septiembre de 2011).	179

Figura 80. Perfiles periódicos registrados durante la campaña 2011; Punto 2 (boya pequeña, Figura 35).	180
Figura 81. Perfiles periódicos registrados durante la campaña 2011; Punto 3 (boya grande, Figura 35).	180
Figura 82. Perfiles de temperatura registrados durante el periodo de estudio (2011) por el Departamento de Ecología de laUB y Aigües del Ter del Llobregat. El punto de medida es cercano a la posición del punto 3 (Figura 35).	181
Figura 83. Discretización en capas y segmentos según CE-QUAL-W2.	189
Figura 84. Esquema de los pasos a seguir a la hora de hacer una simulación mediante CE-QUAL-W2. En azul oscuro los datos de partida, en azul claro los archivos input (.npt), en amarillo los programas utilizados (Pre-procesador, Water balance Utility, CE-QUAL-W2 y Post-Procesador), en rosa los resultados del modelo (.opt).	193
Figura 85. a) Batimetría de precisión del embalse de Ribarroja de Ebro. b) Discretización de la batimetría del embalse de Ribarroja de Ebro en 60 segmentos de 500 m de longitud.	195
Figura 86. Perfil longitudinal de la malla del embalse de Ribarroja de Ebro. Elementos rectangulares de 0.5 Km de longitud (segmentos) por 0.5 m de alto (capas). En amarillo se muestra el segmento 3.	196
Figura 87. Comparación de la evolución térmica del agua a diferentes profundidades (2, 4, 8 y 12 m) en la boya de Almatret (segmento 29). Las líneas continuas muestran la temperatura media diaria medida y las líneas punteadas muestran la temperatura calculada. Año 2009.	197
Figura 88. Diferencia de la evolución térmica del agua entre los datos medidos y calculados a diferentes profundidades (2, 4, 8, y 12 m) en la boya de Almatret (segmento 29). Año 2009.	198
Figura 89. Comparación de la evolución térmica del agua a diferentes profundidades. La figura del fondo muestra la evolución térmica del agua medida por la sonda multiparamétrica (plataforma Flumen, datos cada 6h) y el gráfico de líneas superpuesto muestra la evolución de la temperatura del agua calculada por el programa CE-QUAL-W2 (segmento 58; promedio diario). Año 2009.	199
Figura 90. Año 2009. Gráfico superior: evolución térmica del embalse a 2 m de profundidad en la plataforma Flumen (datos cada 6 h, interpolados). Gráfico inferior: evolución térmica del embalse a 2 m de profundidad simulados por el modelo CE-QUAL-W2 (segmento 58, capa a 2 m de profundidad).	200
Figura 91. Año 2009. Gráfico superior: Evolución térmica del embalse a 5 m de profundidad en la plataforma Flumen (datos cada 6 h, interpolados). Gráfico inferior: Evolución térmica del embalse a 5 m de profundidad simulados por el modelo CE-QUAL-W2 (segmento 58, capa a 5 m de profundidad).	200
Figura 92. Año 2009. Gráfico superior: evolución térmica del embalse a 10 m de profundidad en la plataforma Flumen (datos cada 6 h, interpolados). Gráfico inferior: evolución térmica del embalse a 10 m de profundidad simulados por el modelo CE-QUAL-W2 (segmento 58, capa a 10 m de profundidad).	201
Figura 93. Año 2009. Gráfico superior: evolución térmica del embalse a 15 m de profundidad en la plataforma Flumen (datos cada 6 h, interpolados). Gráfico inferior: evolución térmica del embalse a 15 m de profundidad simulados por el modelo CE-QUAL-W2 (segmento 58, capa a 15 m de profundidad).	201
Figura 94. Año 2009. Gráfico superior: evolución térmica del embalse a 20 m de profundidad en la plataforma Flumen (datos cada 6 h, interpolados). Gráfico inferior: evolución térmica del embalse a 20 m de profundidad simulados por el modelo CE-QUAL-W2 (segmento 58, capa a 20 m de profundidad).	201
Figura 95. Comparación de la componente horizontal del vector velocidad del agua en dirección del segmento y a diferentes profundidades. Datos medidos en la figura superior (sonda multiparamétrica situada en la plataforma Flumen, datos cada 6h) y datos calculados en el gráfico inferior (segmento 58, modelo CE-QUAL-W2, medias diarias). Año 2009.	202
Figura 96. Comparación de la evolución térmica del agua a diferentes profundidades (2, 4, 8, y 12 m) en la boya de Almatret (líneas continuas, promedio diario) y los resultados calculados por el modelo CE-QUAL-W2 (líneas punteadas, segmento 29). Año 2010.	205
Figura 97. Diferencia de la evolución térmica del agua a diferentes profundidades (2, 4, 8 y 12 m) de los datos medidos (boya de Almatret) y calculados mediante CE-QUAL-W2 (segmento 29). Año 2010.	206
Figura 98. Comparación de la evolución térmica del agua a diferentes profundidades por la sonda multiparamétrica en la plataforma Flumen (gráfico de fondo, datos cada 6h) y calculada por el programa CE-QUAL-W2 (líneas punteadas, segmento 58, promedio diario). Año 2010.	207

Figura 99. Año 2010. Gráfico superior: evolución térmica del embalse a 2 m de profundidad en la plataforma Flumen (datos cada 6 h, interpolados). Gráfico inferior: evolución térmica del embalse a 2 m de profundidad simulados por el modelo CE-QUAL-W2 (segmento 58, capa a 2 m de profundidad).	208
Figura 100. Año 2010. Gráfico superior: evolución térmica del embalse a 5 m de profundidad en la plataforma Flumen (datos cada 6 h, interpolados). Gráfico inferior: evolución térmica del embalse a 5 m de profundidad simulados por el modelo CE-QUAL-W2 (segmento 58, capa a 5 m de profundidad).	208
Figura 101. Año 2010. Gráfico superior: evolución térmica del embalse a 10 m de profundidad en la plataforma Flumen (datos cada 6 h, interpolados). Gráfico inferior: evolución térmica del embalse a 10 m de profundidad simulados por el modelo CE-QUAL-W2 (segmento 58, capa a 10 m de profundidad).	209
Figura 102. Año 2010. Gráfico superior: evolución térmica del embalse a 15 m de profundidad en la plataforma Flumen (datos cada 6 h, interpolados). Gráfico inferior: evolución térmica del embalse a 15 m de profundidad simulados por el modelo CE-QUAL-W2 (segmento 58, capa a 15 m de profundidad).	209
Figura 103. Año 2010. Gráfico superior: evolución térmica del embalse a 20 m de profundidad en la plataforma Flumen (datos cada 6 h, interpolados). Gráfico inferior: evolución térmica del embalse a 20 m de profundidad simulados por el modelo CE-QUAL-W2 (segmento 58, capa a 20 m de profundidad).	209
Figura 104. Comparación de la componente horizontal del vector velocidad del agua a diferentes profundidades entre los datos medidos en la plataforma Flumen (gráfico superior, datos cada 6h) y los calculados por el programa CE-QUAL-W2 (segmento 58, medias diarias). Año 2010.	210
Figura 105 Resultados de la simulación mediante CE-QUAL-W2. Perfiles longitudinales de temperaturas del agua a lo largo del embalse de Ribarroja de Ebro, en los días julianos 147, 150, 165, 181, 186 y 230.	213
Figura 106 Perfiles longitudinales de temperaturas del agua a lo largo del embalse de Ribarroja de Ebro mediante CE-QUAL-W2, en los días julianos 251, 265, 283 y 295.	214
Figura 107 Perfiles longitudinales de la componente horizontal del vector de velocidad del agua en dirección del eje del cauce, en el embalse de Ribarroja de Ebro, mediante CE-QUAL-W2, para los días julianos 150, 183, 210, 246 y 283.	215
Figura 108 Perfiles longitudinales de temperaturas del agua a lo largo del embalse de Ribarroja de Ebro, mediante CE-QUAL-W2, para los días julianos 155, 160, 167, 170, 180 y 195.	217
Figura 109 Perfiles longitudinales de temperaturas del agua a lo largo del embalse de Ribarroja de Ebro, mediante CE-QUAL-W2, para los días julianos 210, 230, 240, 254, 275 y 295.	218
Figura 110 Perfiles longitudinales de la componente horizontal del vector de velocidad del agua a lo largo del embalse de Ribarroja de Ebro, obtenidos con CE-QUAL-W2, para los días julianos 156, 162, 170, 172, 185 y 200.	220
Figura 111 Perfiles longitudinales de la componente horizontal del vector de velocidad del agua a lo largo del embalse de Ribarroja de Ebro, obtenidos con CE-QUAL-W2, para los días julianos 230, 274 y 295.	221
Figura 112 Perfil longitudinal del tiempo de permanencia del agua a lo largo del embalse de Ribarroja de Ebro, para los días julianos 180, 196, 255 y 295.	223
Figura 113 Perfil longitudinal del tiempo de permanencia del agua a lo largo del embalse de Ribarroja de Ebro, para los días julianos 160, 165, 170, 185, 200 y 221.	225
Figura 114 Perfil longitudinal del tiempo de permanencia del agua a lo largo del embalse de Ribarroja de Ebro para los días julianos 251, 270 y 294.	226
Figura 115 Discretización del embalse de Sau por segmentos.	231
Figura 116. Discretización de la batimetría del embalse de Ribarroja para CE-QUAL-W2.	231
Figura 117. Comparación de los perfiles de temperatura obtenidos a partir de la simulación mediante CE-QUAL-W2 (rojo) y los perfiles de temperatura registrados en campo (negro) en el entorno del punto 2 (Figura 35) durante la campaña 2011.	233
Figura 118. Comparación de los perfiles de temperatura obtenidos a partir de la simulación mediante CE-QUAL-W2 (rojo) y los perfiles de temperatura registrados en campo (negro) en el entorno del punto 3 (Figura 35) durante la campaña 2011.	234
Figura 119. Comparación de los perfiles de temperatura obtenidos a partir de la simulación mediante CE-QUAL-W2 (rojo) y los perfiles de temperatura registrados en campo (negro) en el entorno del punto 3 (Figura 35) durante la campaña 2011 por el equipo de la Universidad de Barcelona.	235

Figura 120 Perfiles longitudinales de temperaturas del agua a lo largo del embalse de Sau, simulados mediante CE-QUAL-2D. Días julianos 85, 95, 125, 135, 145 y 155.	238
Figura 121 Perfiles longitudinales de temperaturas del agua a lo largo del embalse de Sau, simulados mediante CE QUAL-2D. Días julianos 195, 235, 245, 255, 265 y 273.	239
Figura 122. Confluencia Ebro-Segre. Fuente: Google maps modificado por la autora	246
Figura 123. jemplo de malla no estructurada en el plano (izquierda) y de malla estructurada en la vertical (derecha).	249
Figura 124. Esquema del depósito situado en el edificio D1 de la Universitat Politècnica de Catalunya (Esquema de J. Prats).	253
Figura 125. Malla y discretización de la columna de cálculo (2.5 m de diámetro por 1 m de alto).	254
Figura 126. Resultados (CI = 28.5 °C). Comparación de los resultados de la simulación mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial en superficie (rojo) y fondo (naranja) con los datos medidos en la parte central del depósito (a 2, 4, 8, 16 y 32 cm de la superficie).	255
Figura 127. Malla y discretización de la columna de cálculo (3 m x 3 m x 100 m).	257
Figura 128. Resultados del test mediante FreeFlow con el módulo temp_sup. Compración de los datos medidos en campo (Goldman & Carter, 1965) con los resultados de la simulación (días 44, 85 y 116).	258
Figura 129. Error cuadrático medio y desviación estándar de la temperatura para los perfiles de comparación (de 0 a -60 m de profundidad), unidades en °C.	258
Figura 130. Resultados del test mediante FreeFlow con el módulo temp_sup. a) Condición inicial 6 °C instante t=0 días, b) t= 44 días; c) t= 85 días y d) t= 116 días.	259
Figura 131. Vista general de la batimetría del la confluencia entre río Segre y el río Ebro. Tramo aguas arriba del embalse de Ribarroja de Ebro en el entorno de Mequienenza (unión de las batimetrías 2007 y 2008).	261
Figura 132. Malla 3D de la confluencia Ebro-Segre en la cola del embalse de Ribarroja. La relación de escala entre X-Y es 1-1 pero la dimensión z está exagerada 200%.	262
Figura 133. Imagen térmica superficial (mm superficiales) obtenida mediante el sensor TASI el 31-0-2011 al mediodía.	263
Figura 134. Resultados del modelo FreeFlow (capa superficial) con el módulo de temperatura superficial (día 31-03-2011 a las 12 h).	263
Figura 135. Situación de los puntos en que se comparan los perfiles verticales de temperatura medidos en campo con la sonda CTD y los resultados del modelo FreeFlow con el módulo de temperatura superficial (día 31-03-2011).	264
Figura 136. Comparación de los perfiles muestreados en campo con los resultados del modelo FreeFlow con el módulo de temperatura superficial.	265
Figura 137. Evolución de la temperatura del agua en la zona de la confluencia Ebro-Segre (31-03-2015). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje Z cada 4 h.	268
Figura 138. Temperatura del agua en la confluencia Ebro-Segre (31-03-2015). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje Z a las 12 h.	269
Figura 139. Evolución de la temperatura del agua en la zona de la confluencia Ebro-Segre (31-03-2015). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados verticales perpendiculares al eje X a las a) 4 h, b) 8 h, c) 12 h, d) 16 h, e) 20 h y f) 24 h.	270
Figura 140. Evolución de la temperatura del agua en la zona de la confluencia Ebro-Segre (31-03-2015, 12 h). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje Y.	271
Figura 141. Evolución de la temperatura del agua en la zona de la confluencia Ebro-Segre (31-03-2015, 14 h). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje Y.	271
Figura 142. Magnitud de los vectores velocidad (x-y-x) del agua en la confluencia Ebro-Segre (31-03-2015). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje Z. Valores en m/s.	272
Figura 143. Magnitud de los vectores velocidad (x-y-x) del agua en la confluencia Ebro-Segre (31-03-2015). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje X. Valores en m/s.	272
Figura 144. Componente x de la velocidad (31-03-2011). Capas a las cotas: 71, 69, 65 y 63 m. Valores en m/s.	273

Figura 145. Componente y de la velocidad (31-03-2011). Capas a las cotas: 71, 69, 65 y 63 m. Valores en m/s.	273
Figura 146. Densidad del agua (Kg/m ³). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados a las 12:00 del día 31-03-2011.	273
Figura 147. Imagen térmica superficial (mm superficiales) obtenida mediante el sensor TASI el 11-10-2011 al mediodía.	275
Figura 148. Resultados del modelo FreeFlow (capa superficial) con el módulo de temperatura superficial (día 11-10-2011 a las 12 h).	275
Figura 149. Situación de los puntos en que se comparan los perfiles verticales de temperatura medidos en campo con la sonda CTD y los resultados del modelo FreeFlow con el módulo de temperatura superficial (día 11-10-2011).	276
Figura 150. Comparación de los perfiles muestreados en camoo con los resultados del modelo FreeFlow con el módulo de temperatura superficial (día 11-10-2011).	277
Figura 151. Evolución de la temperatura del agua en la zona de la confluencia Ebro-Segre (31-03-2015). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje Z cada 4 h.	278
Figura 152. Temperatura del agua en la confluencia Ebro-Segre (31-03-2015). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje Z. a las a) 12 h.	279
Figura 153. Evolución de la temperatura del agua en la zona de la confluencia Ebro-Segre (11-10-2015). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados verticales perpendiculares al eje X a las a) 4 h, b) 8 h, c) 12 h, d) 16 h, e) 20 h y f) 24 h.	280
Figura 154. Evolución de la temperatura del agua en la zona de la confluencia Ebro-Segre (11-10-2015, 12 h). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje Y.	281
Figura 155. Evolución de la temperatura del agua en la zona de la confluencia Ebro-Segre (11-10-2015, 14 h). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje Y.	281
Figura 156. Magnitud de los vectores velocidad (x-y-x) del agua en la confluencia Ebro-Segre (11-10-2015). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje Z. Valores en m/s.	282
Figura 157. Magnitud de los vectores velocidad (x-y-x) del agua en la confluencia Ebro-Segre (31-03-2015). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje X. Valores en m/s.	282
Figura 158. Componente x de la velocidad (11-10-2011). Capas a las cotas: 71, 69, 65 y 63 m. Valores en m/s.	283
Figura 159. Componente y de la velocidad (11-10-2011). Capas a las cotas: 71, 69, 65 y 63 m. Valores en m/s.	283
Figura 160. Densidad del agua (Kg/m ³). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados a las 12:00 del día 11-10-2011.	283
Figura 161. Discretización de la malla 3D del caso de estudio.	285
Figura 162. Condiciones iniciales de estratificación térmica (18 °C en profundidad y 27 °C en superficie).	285
Figura 163. Mapa de temperaturas 3D que se forma con la descarga de agua a 30 °C. Pantalla del 70%.	286
Figura 164. Detalle de las secciones transversales de toma (pantalla del 70%) y descarga lateral de caudal a 30 °C. Temperatura y vectores de velocidad.	286

Índice de Tablas

Tabla 1. Principales características morfométricas e hidrológicas del embalse de Ribarroja de Ebro.	87
Tabla 2. Principales características morfométricas e hidrológicas del embalse de Sau.	96
Tabla 3. Detalle de los puntos de medida del Instituto Flumen en el tramo medio-final del río Ebro (sistema de embalses Mequinzenza-Ribarroja-Flix, confluencia Ebro-Segre y aguas abajo del sistema de embalses).	114
Tabla 4. Características técnicas de los sensores (meteorológicos y de calidad del agua) instalados en la plataforma del embalse de Ribarroja de Ebro.	117

Capítulo 1 **OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS**

Los embalses son ecosistemas acuáticos complejos. No es de extrañar, que Margalef los defina como los sistemas híbridos entre los lagos y ríos (Margalef, 1983) y eso sin tener en cuenta las características de la presa como condición de contorno aguas abajo.

Un modelo hidrodinámico de un embalse debe proporcionar información acerca de esta complejidad, por ejemplo: la estratificación del agua, mezcla y velocidades. El conocimiento inicial de la hidrodinámica del sistema es necesario también para llevar a cabo estudios de la calidad del agua. El funcionamiento hidrodinámico es crítico en términos de transporte de sedimentos en suspensión, contaminantes disueltos o procesos biológicos. En resumen, el estudio de la evolución hidrodinámica de un embalse es útil para conocer la calidad del agua almacenada.

La temperatura del agua es una de las variables más importantes desde el punto de vista de la limnología: los cambios en el perfil vertical de temperatura de un sistema modifican la densidad del agua y por lo tanto, los patrones de estratificación. La mayor parte de los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en un embalse vienen controlados por la hidrodinámica y la evolución térmica.

En esta tesis doctoral se ha querido avanzar en el conocimiento hidrodinámico y en especial el comportamiento térmico de los embalses. Para ello se ha realizado una primera campaña de obtención de datos de campo para mostrar el comportamiento de dos embalses catalanes: el embalse de Ribarroja (en el río Ebro) y el embalse de Sau (en el río Ter). Después de estudiar el comportamiento térmico e hidrodinámico de los embalses se han

aplicado modelos numéricos para conocer la evolución térmica en su longitud y profundidad. Para ello se ha utilizado principalmente el modelo CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008).

Al notar que la simulación 2D mediante CE-QUAL-W2 resultaba demasiado simplificada para representar algunos de los fenómenos que tienen lugar en un embalse, como los ocurrientes en la cola del embalse de Ribarroja de Ebro (confluencia entre los ríos Segre y Ebro), se decidió estudiar la zona mediante un modelo 3D. El modelo hidrodinámico 3D utilizado es el FreeFlow (Cea et al., 2008), al que en el contexto de esta tesis se le añadió un módulo que realiza el balance térmico superficial.

1.1 CONTEXTO, ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

El Instituto de Investigación Flumen UPC-CIMNE ha estado estudiando la hidrodinámica de los embalses del tramo final del Ebro o el sistema de embalses del río Ter (Sau y Susqueda) desde la década de los noventa. Se dispone de una valiosa colección histórica de datos de campo registrados a lo largo de años, tanto de variables meteorológicas como de calidad del agua.

Durante los años 2007-2011 se realizaron diferentes estudios de la hidrodinámica, de la evolución térmica y del transporte de sedimentos en suspensión centrados en el ámbito del embalse de Ribarroja (río Ebro), basados en el trabajo experimental y la toma de datos de campo. Más recientemente, en campañas de campo durante el periodo 2011-2012, se caracterizó la hidrodinámica, y en particular el comportamiento térmico, del embalse de Sau (río Ter) que presenta características significativamente diferentes al embalse de Ribarroja (río Ebro). Por este motivo se ha considerado interesante comparar los resultados de ambos embalses.

Además de estudiar los embalses de Ribarroja y Sau experimentalmente mediante la toma de datos de campo, en ambos casos el estudio se ha apoyado en la modelización numérica. Los modelos numéricos orientados a la hidrodinámica de embalses son una herramienta útil tanto para el estudio del comportamiento de los embalses como para las predicciones y la gestión sostenible de los mismos. El Instituto de Investigación Flumen también tiene una dilatada experiencia en la modelización numérica del flujo en lámina libre desde hace varias décadas.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo fundamental de esta tesis es **estudiar la evolución hidrodinámica de embalses, con especial énfasis en el comportamiento térmico de los mismos en función de las características meteorológicas y de los flujos de entrada/salida.**

Dicho objetivo básico se ha desarrollado a partir de los siguientes sub-objetivos:

Diseño e implementación de redes de instrumentación para la toma de medidas de campo en los embalses de Ribarroja de Ebro y Sau (Capítulo 4).

Análisis de las series de datos registradas con el fin de describir el funcionamiento hidrodinámico de los embalses de estudio (Capítulo 5).

Descripción del comportamiento hidrodinámico y térmico de los embalses de Ribarroja de Ebro y Sau mediante el estudio y análisis de datos de campo (Capítulo 5).

Modelización numérica en 2D mediante CE-QUAL-W2 de los procesos de estratificación y mezcla de los embalses (Capítulo 6). Ello permite evaluar las distintas propiedades que caracterizan los dos casos de estudio.

Modelización numérica en 3D, programación e implementación de las ecuaciones de fuentes de calor a un modelo numérico tridimensional en volúmenes finitos existente. Desarrollo de un modelo numérico capaz de predecir el comportamiento térmico de un embalse (balance superficial) en las tres dimensiones del espacio, en función de las entradas/salidas de caudales y de la información meteorológica (Capítulo 7).

1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta tesis se compone de ocho Capítulos agrupados en tres partes:

La primera parte, de carácter introductorio y descriptivo, comprende los Capítulos del 1 al 3. El **Capítulo 1** presenta los objetivos y la estructura del documento de la tesis. En el **Capítulo 2** se define el estado actual del conocimiento repasando bibliografía imprescindible utilizada y planteando la definición de las variables de estudio y sus formulaciones. Igualmente, en el **Capítulo 2** se presenta un resumen bibliográfico de los principales modelos

numéricos de estudio hidrodinámico de embalses, enumerando las principales características y limitaciones. El **Capítulo 3** presenta las características y los antecedentes de los embalses a estudiar y los casos ejemplo de Ribarroja en el río Ebro (caso de estudio 1) y Sau (caso de estudio 2) en el Río Ter.

La segunda parte ya se centra en el **trabajo experimental de las campañas de campo** y el análisis de los mismos explicando el comportamiento hidráulico de los embalses de estudio (Capítulos 4 y 5). En el **Capítulo 4** se define la red de medidas experimentales de campo con una descripción detallada de la instrumentación instalada; también se describe la campaña batimétrica de precisión realizada en el embalse de Ribarroja de Ebro y la instrumentación utilizada. En el mismo Capítulo 4 se resume el tratamiento y almacenamiento de los datos de campo en ambos casos de estudio. En el **Capítulo 5** se describe el funcionamiento de los embalses estudiados detallando las características hidrodinámicas y térmicas de cada uno de los casos de estudio y el efecto que tiene la variabilidad de caudales y la meteorología en la respuesta de los mismos.

El tercer bloque lo conforman los Capítulos 6 y 7 en que se engloba la **modelización numérica realizada**. El **Capítulo 6** engloba el estudio hidrodinámico y térmico mediante CE-QUAL-W2 para los dos embalses de estudio. Finalmente el **Capítulo 7** se centra en la aplicación y modificación del modelo tridimensional FreeFlow (Cea et al., 2008) con tal de adaptarlo el estudio de la evolución térmica de embalses y, en especial, a la zona de la confluencia Ebro-Segre. Se ha tenido que desarrollar un módulo capaz de calcular el balance térmico superficial y se ha añadido al ya existente FreeFlow.

El **Capítulo 8** cierra la tesis resumiendo y conectando los trabajos realizados, estableciendo las principales conclusiones del trabajo desarrollado a lo largo de la tesis doctoral y enumerando una lista con las posibles líneas y propuestas de trabajos futuros.

1.4 AGRADECIMIENTOS

La realización de esta tesis ha sido posible gracias a las becas AGAUR FI-A (2009) y FI-B (2010) de la Generalitat de Catalunya asociada al proyecto CGL2004 -05503-C02-01/02-HID “Comportamiento térmico de los embalses y su efecto en el estado ecológico. Aplicación a los

embalses de los ríos Ter y tramo inferior del Ebro” del Programa de Recursos Hídricos del Plan Nacional de Investigación y Desarrollo.

También se ha financiado una estancia de seis meses a Estados Unidos gracias a la beca AGAUR BE-DGR 2011 (Modalidad A) dividida en dos periodos: tres meses en la University of California Davis y tres meses en la Portland State University de Oregon.

1.5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cea, Stelling, & Zijlema, 2008. Non-hydrostatic 3D free surface layer-structured finite volume model for short wave propagation m, 382–410. doi:10.1002/fld

Cole, & Wells, 2008. CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model. Version 3.6 User Manual, Version 3. ed. Water Quality Group - Portland State University, Portland.

Margalef, 1983. Limnologia. Barcelona.

Capítulo 2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se sintetiza el conocimiento acerca de la hidrodinámica de grandes masas de agua haciendo hincapié especialmente a la evolución térmica de las mismas. Cabe mencionar que se ha enfocado desde la perspectiva de los embalses.

Para ello se introducen los conceptos de hidrodinámica y sus procesos (apartado 2.2), tomando especial atención a la evolución térmica (apartado 2.3) y sus efectos en la dinámica de embalses. También se enumeran los efectos del transporte de sedimentos que tanto suele afectar a los embalses (apartado 2.4) y la calidad del agua de los mismos (apartado 2.5) que, aunque no son objeto directo de esta tesis, están relacionados con los temas que se tratan.

El otro gran bloque de este capítulo se centra en la modelización numérica de los procesos hidrodinámicos en grandes masas de agua (apartado 2.6) tanto en los avances en la modelación numérica de la hidrodinámica como la evolución térmica de embalses.

2.1.1 Binomio agua-energía

El agua y la energía están inextricablemente unidos (UNESCO, 2014). El agua es esencial para la producción, distribución y uso de la energía, que es fundamental para la extracción, depuración y distribución de agua potable. El agua dulce y la energía son cruciales para el bienestar humano y el desarrollo socio-económico sostenible y la humanidad depende totalmente de ambas.

Según el informe de la UNESCO 2014 "*Water and Energy. Volume 1*" (UNESCO, 2014), a nivel mundial, se estima que 768 millones de personas siguen sin tener acceso a una fuente de agua potable y 2,5 mil millones se quedan sin acceso a saneamiento de calidad. Más de 1,3 millones de personas aún carecen de acceso a la electricidad, y aproximadamente 2,6 mil millones usan combustibles sólidos (principalmente biomasa) para cocinar (UNESCO, 2014). Según este mismo estudio, se prevé que la demanda mundial de agua (en términos de extracción) aumente en un 55% hasta 2050, principalmente debido a las crecientes demandas de la industria manufacturera, la generación térmica de electricidad o al uso doméstico. Como resultado, la disponibilidad de agua dulce se reduce cada vez más durante este periodo de tiempo. Por el otro lado, se espera que la demanda mundial de energía crezca en más de un tercio durante el periodo 2015-2035 y que la demanda de electricidad crezca en aproximadamente un 70% (UNESCO, 2014).

2.1.2 Marco Legal

A nivel europeo la Directiva Marco del Agua de 2000 (Unión Europea, 2000) dicta que se debe promover la mejora de los sistemas acuáticos y, con respecto a sus necesidades de agua, de los ecosistemas terrestres y humedales directamente dependientes de los ecosistemas acuáticos. Entre los objetivos principales destacan la promoción de los usos sostenibles, la protección de los sistemas mediante medidas específicas y asegurar unos mínimos de calidad del agua (Prats, 2011).

En cuanto a rangos de modificación de la temperatura del agua, ésta directiva se complementa con la de protección de aguas continentales de 2006 (Unión Europea, 2006) donde se establece que el incremento de la temperatura media aguas debajo de una presa no puede superar los 1.5 °C en aguas salmonícolas ni los 3 °C en aguas ciprinícolas, además de indicar que hay que evitar variaciones demasiado bruscas de la temperatura y no superar nunca los 21.5 °C en aguas salmonícolas ni los 28 °C en ciprinícolas. Sin embargo, se reconoce la posibilidad de superar estos límites durante un 2% del tiempo o de no aplicar este punto en caso de circunstancias meteorológicas excepcionales o condiciones geográficas particulares. En la cuenca del Ebro, el *Plan Hidrológico de Cuenca* establece como objetivo de calidad para el tramo inferior del Ebro, desde Mequinzenza hasta la desembocadura, una temperatura máxima de 25 °C (BOE, 1999).

La actividad humana ha hecho uso de los sistemas fluviales a lo largo de los años, modificando sus regímenes hidrodinámicos y térmicos. Dos de las afecciones más importantes en la temperatura son la presencia de una presa o embalse o el uso del agua para refrigeración, que implica el calentamiento del agua (Hellawell, 1986). El término “*polución térmica*” (Alberto & Arrúe, 1986; Goel, 2006; Hellawell, 1986) se utiliza para describir el deterioro de la calidad del agua causado por entradas de agua sobrecalentada, comúnmente fruto de procesos de refrigeración industrial (Prats, 2011). Los efectos del sobrecalentamiento del agua pueden ser críticos para la ecología, puesto que localmente genera niveles de oxígeno disuelto bajos, causa eutrofización, afecta los procesos de los organismos acuáticos y puede afectar la calidad del agua tanto para consumo como para uso recreativo.

2.1.3 Perspectivas de futuro

Se necesita un enfoque sostenible para la gestión de los recursos de agua dulce y de la energía, con el fin de proporcionar energía de calidad, de acuerdo con las necesidades actuales, asequible y con respeto al medio ambiente. Las decisiones tomadas para el uso y gestión del agua y la producción de energía pueden tener impactos significativos, de diferentes características y de amplio alcance una sobre la otra; y estos impactos conllevan una serie de repercusiones en el futuro tanto positivas como negativas.

Los efectos de la presencia de embalses, además de la combinación de éstos con las centrales térmicas que utilizan el agua del río para refrigeración o los efectos del Cambio Climático (Iglesias *et al.*, 2005; Marcé *et al.*, 2009), pueden provocar cambios importantes en el comportamiento térmico del río y en las comunidades que de él dependen.

2.2 HIDRODINÁMICA DE EMBALSES

“*Limnología*” (del griego: limnee λίμνη, "lago", y λόγος, logos, "conocimiento") es una disciplina científica relativamente joven, con las raíces en el siglo XVIII pero, aún en pleno desarrollo (Dodson, 2005).

Aunque la limnología suele considerarse como una división de la ecología o de las ciencias ambientales, tiene un marcado carácter multidisciplinar incluyendo diferentes áreas de la

ciencia como son la geografía, la geología, la química, la física, las matemáticas, la estadística e incluye varias disciplinas de la biología como la taxonomía o la ecología. Abarca el estudio de todas las aguas continentales tanto quietas como en movimiento, tanto dulces como saladas, naturales o artificiales. Esto incluye el estudio de los lagos y estanques, ríos, arroyos, manantiales y humedales (Dodson, 2005).

Es importante entender la hidrodinámica de un lago o embalse, porque tanto la mezcla como los procesos de transporte y de calidad del agua dependen de las condiciones meteorológicas y de los caudales de entrada y salida al embalse (Fischer *et al.*, 1979; Gómez-Giraldo *et al.*, 2006; Imberger, 1994; Ogihara *et al.*, 1996).

2.2.1 Limnología de embalses

Los embalses son grandes masas de agua continental originadas artificialmente y su estudio entra de lleno en el campo de la limnología en una categoría propia (Margalef, 1983). Las características morfológicas, hidrológicas y ecológicas, así como los procesos que tienen lugar en un embalse no son las de un lago natural y por tanto deben recibir un tratamiento diferenciado (Horne & Goldman, 1994).

Los embalses se comporta como “*híbrido entre río y lago*” (Margalef, 1983): tiene el flujo de un río ya la vez una profundidad suficiente para que se desarrollen procesos propios de los lagos. En ellos se pueden distinguir hasta tres zonas diferenciadas por los efectos de los gradientes físicos y químicos presentes: en su tramo superior es habitual que entre un cierto caudal variable haciendo que sus condiciones se parezcan más a las de un río, mientras que el agua en el tramo más cercano a la presa se mueve más lentamente (como en un lago natural). Entre ambas zonas hay una fase de transición (Margalef, 1983). No es posible equiparar directamente un embalse con un lago, pues el régimen de extracciones de caudal y el punto de las mismas suele ser totalmente diferente al de un lago, y esto influye en el comportamiento hidrodinámico y térmico de toda la gran masa de agua (Marcé *et al.*, 2009).

2.2.2 Agentes dinámicos

Las grandes masas de agua embalsadas sufren acciones dinámicas, de fuerzas, aplicadas por agentes diversos como el viento o la radiación solar que se traducen en una serie de

fenómenos complejos. Estas acciones dinámicas motivan procesos físicos como movimientos y corrientes agua o, contrariamente, los dificultan (Dodson, 2005; Horne & Goldman, 1994; Thornton *et al.*, 1990; Wetzel, 2001).

Los principales agentes dinámicos que influyen sobre la hidrodinámica del embalse son la radiación solar, el viento, la salinidad y la viscosidad. Algunos de estos intervienen en el transporte de energía térmica y otros en el transporte de masa y de momento. En cualquier caso, todos ellos tienen influencia en la estructuración de las capas. En la Figura 1 se muestran algunos de los procesos hidrodinámicos más conocidos y más influyentes en la caracterización del embalse (González, 2007).

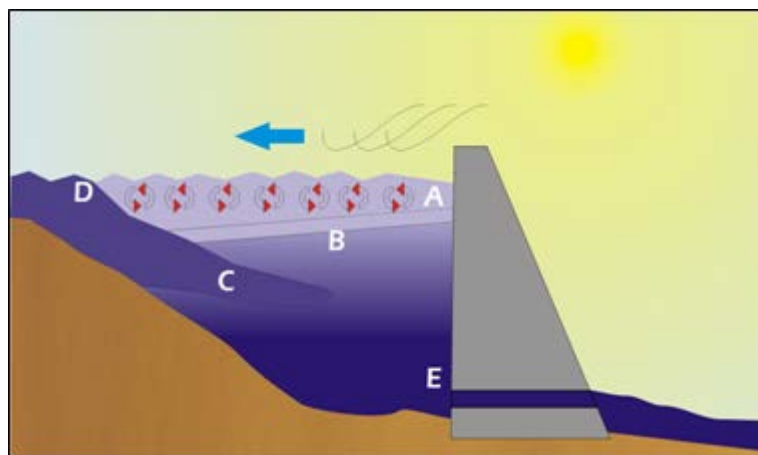


Figura 1. Agentes dinámicos actuando en un embalse: A) Mezcla superficial; B) Oscilaciones, C) Intrusión del/los flujo/s de aporte (caudales principales y o efluentes), D) Punto de inmersión; E) Efectos de la extracción.

2.2.3 Estratificación

La estratificación del agua es el fenómeno por el cual se forman capas horizontales debido a diferencias de densidad que actúan como barreras y no dejan mezclar el agua en la vertical. La estratificación no tiene que ser únicamente debida a la diferencia térmica, también puede ser debida a cambios de salinidad (la capa límite se apoda haloclina), niveles de oxigenación, diferencias de densidad (piconclina) y diferencias de temperatura (termoclina).

En el caso de la estratificación térmica la distribución por capas de diferentes temperaturas y, por lo tanto, diferentes densidades permite distinguir habitualmente tres zonas con unas características muy diferenciadas que se resumen a continuación (Figura 2).

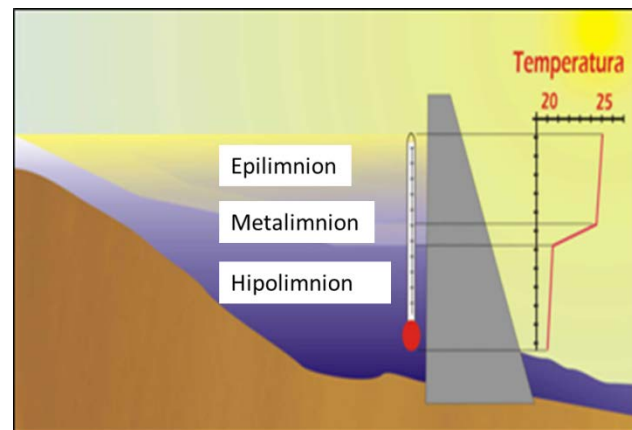


Figura 2. Esquema de embalse estratificado. Se distinguen las tres capas: epilimnion, metalimnion (termoclina) e hipolimnion (modificado de González, 2007).

Epilimnion: conjunto de capas superficial de espesor variable (habitualmente entre los 5 y 15 metros). Predominan los procesos fotosintéticos sobre el consumo de oxígeno. La temperatura en época de estratificación suele ser elevada y homogénea, es la que recibe los efectos de los cambios meteorológicos diarios o a corto plazo. La estabilidad de esta capa depende también de la proximidad de la toma de la presa y nivel al que se realizan las extracciones de agua.

Metalimnion: conjunto de capas intermedio que presenta un gradiente importante (normalmente superior a 1 °C por metro). Puede suponer una barrera para el intercambio de agua o partículas en el sentido de circulación vertical del hipolimnion al epilimnion. La termoclina es, por definición, el punto donde el gradiente de temperatura es máximo.

Hipolimnion: conjunto de capas más profundo en el que se mantiene una temperatura menor y en el que predominan los procesos oxidativos sobre los fotosintéticos o productivos. Suele verse menos afectada por la meteorología y los efectos superficiales.

2.3 TEMPERATURA DEL AGUA

El régimen térmico de un ecosistema fluvial determina las especies que se pueden encontrar en el mismo (Dodson, 2005), por lo que cambios en el régimen térmico de un embalse pueden afectar significativamente a la estructura de la comunidad ecológica (Prats *et al.*, 2010) y a la calidad del agua que se extraiga del mismo.

La temperatura del agua (apartado 2.3.1) es la protagonista de la presente tesis por ser el factor clave en la mayoría de los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los ecosistemas acuáticos (Allan, 1995) y en especial en la hidrodinámica de las grandes masas de agua, ya sean lagos, embalses u océanos. Las variaciones de temperatura (apartado 2.3.2) son responsables de inducir cambios en los niveles de oxígeno disuelto y en las reacciones bioquímicas y tasas cinéticas que por lo tanto tienen fuertes impactos en la productividad biológica (Kim & Kim, 2006).

También se describen los procesos y los efectos del proceso de estratificación térmica (apartado 2.3.3) y de la mezcla (apartado 2.3.4) de los embalses a lo largo del año así como las variaciones térmicas diarias (apartado 2.3.5).

A continuación se citan los factores más influyentes en la variación térmica de los embalses: el transporte de temperatura a lo largo de la masa de agua (apartado 2.3.6), el intercambio de calor agua-atmosfera (apartado 2.3.7) y por otro lado los caudales de entrada y salida (apartado 2.3.8). Finalmente cabe mencionar otros factores como la transferencia de calor entre el sustrato y el agua (apartado 2.3.9) que en casos de embalses de cierta profundidad suele ser poco importante y puede ser prescindible.

2.3.1 La temperatura en embalses

Estudiar la temperatura significa estudiar el contenido de calor de un cuerpo físico, que indica el promedio de la energía cinética de las moléculas de la sustancia. Cuanto mayor sea la energía cinética de las partículas mayor será la temperatura. La temperatura del agua representa una de las características más importantes de las aguas superficiales (Cushman-Roisin & Beckers, 2011, 2009) y es un factor crucial en los estudios hidrodinámicos y de calidad del agua debido a varias razones.

A continuación se enumeran algunos de los efectos dominados o afectados en mayor o menor medida por la evolución térmica de un embalse:

1. El perfil vertical de temperatura de un sistema afecta la **estratificación** (2.2.3), un elemento crítico para la mezcla vertical (Boehrer *et al.*, 2008; Dake & Harleman, 1969; Strang *et al.*, 2001; Yu *et al.*, 2010).

2. La **solubilidad** de las partículas y elementos viene determinada básicamente por la temperatura del agua. La temperatura afecta a la solubilidad (normalmente incrementándola), por lo tanto afecta la toxicidad de muchos otros parámetros. Mientras que los gases tienden a ser más solubles en aguas frías, los sólidos aumentan su solubilidad en aguas más calientes. Si hay un aumento de temperatura aumenta la tasa metabólica de los organismos mientras la cantidad de oxígeno que necesitan para realizarla disminuye. Es de especial interés la solubilidad del oxígeno disuelto, generalmente cuanto más cálida sea el agua menor cantidad de oxígeno disuelto va a tener (Elçi, 2008; Rangel-Peraza *et al.*, 2012). Por lo tanto, si aumenta la temperatura del agua hay mayor demanda de oxígeno pero, debido al incremento térmico, el oxígeno disuelto disminuye.
3. La mayoría de los **procesos físicos, químicos y biológicos** están gobernados por la temperatura. Por ejemplo, un aumento de temperatura aumenta procesos metabólicos y reproductivos (Horne & Goldman, 1994; Real *et al.*, 2003; Wetzel, 1975). Algunos procesos químicos como la re-aireación, la volatilización o la adsorción de elementos químicos pueden verse afectados por la temperatura. Incrementos de temperatura pueden aumentar la capacidad de disolución de componentes químicos (Stumm, 1985; Wang *et al.*, 2013).
4. La temperatura del agua también afecta la **tasa fotosintética** de algas y plantas, las **tasas metabólicas de organismos** acuáticos y la sensibilidad de ciertos organismos a la toxicidad de parásitos, residuos o enfermedades.
5. La mayoría de las **especies acuáticas** pueden tolerar solamente un determinado rango de temperaturas, un cambio brusco o duradero de temperaturas pueden tener efectos importantes. El estudio de las alteraciones del régimen térmico es importante ya que la temperatura del agua es un aspecto fundamental de la biología de los organismos acuáticos (Prats, 2011).
6. Además, la temperatura del agua también afecta económicamente la **gestión**, sea para consumo o para otros usos (Armengol & Dolz, 2004; Prats Rodríguez *et al.*, 2014).

2.3.2 Alteraciones térmicas

En Prats (2011) se distinguen y detallan los tipos de alteraciones térmicas en ríos en dos grupos: directas e indirectas. Las alteraciones directas serían aquellas en las que hay una alteración directa de la temperatura del agua (principalmente mediante entradas de agua a una temperatura diferente de aquella que sería de esperar en estado natural). Las indirectas serían aquellas en las que se producen alteraciones sobre factores que afectan a los procesos de intercambio de calor del agua con el ambiente (Prats, 2011).

En las alteraciones directas se encuentran: vertidos de agua caliente más conocidas como “polución térmica” (Alberto & Arrúe, 1986; Arrúe & Alberto, 1986; Goel, 2006; Hellawell, 1986), vertidos de agua fría normalmente procedentes de minería y otros tipos de agua subterránea (Hellawell, 1986) y el efecto de los propios embalses entre los que hay gran variabilidad en función de su geometría y características interanuales definidos por gran variedad de autores y publicaciones (Bonnet *et al.*, 2000; Caissie, 2006; Prats, 2011).

La presencia de embalses también altera indirectamente la temperatura del agua del río, la gestión de los caudales modifica la evolución térmica del río aguas abajo. En este mismo grupo de alteraciones indirectas destacan los trasvases (Reichert *et al.*, 2003), la extracción de agua, la tala de bosques aguas arriba, las actuaciones de ingeniería en el río o los efectos del cambio climático (Iglesias *et al.*, 2005; Komatsu *et al.*, 2007; Marcé *et al.*, 2009; Null *et al.*, 2013).

A menudo sobre una determinada masa de agua inciden más de un tipo de alteraciones que hacen que sea difícil determinar el resultado final de las mismas (Prats, 2011), pero afectará a la masa de agua en términos físicos, químicos, biológicos (Wotton, 1995),...

2.3.3 Estratificación térmica

Ya se ha introducido el concepto de estratificación (apartado 2.2.3) que presentan la gran mayoría de los embalses de la zona templada del planeta. Aunque la estratificación puede ser debida a varios factores y efectos, en esta tesis haremos referencia a la estratificación térmica. Junto con el viento, los gradientes de densidad, habitualmente debidos a la distribución espacial de la temperatura, son los responsables de cualquier movimiento de

agua que ocurra en sistemas en los que el flujo hidráulico es pequeño como es el caso de la mayoría de los embalses.

En las regiones templadas, donde el agua del lago o embalse se calienta en verano y se enfría en invierno, se produce un patrón cíclico de vuelco que se repite año tras año.

La densidad del agua es un parámetro fuertemente dependiente de la temperatura, el agua fría es más densa que el agua caliente por lo que tiende a colocarse en el fondo (hipolimnion) y el agua más caliente tiende a flotar por encima (epilimnion).

En la Figura 3 se esquematiza el proceso de estratificación térmica típico en un lago o embalse de zona templada (con estaciones cálida y fría).

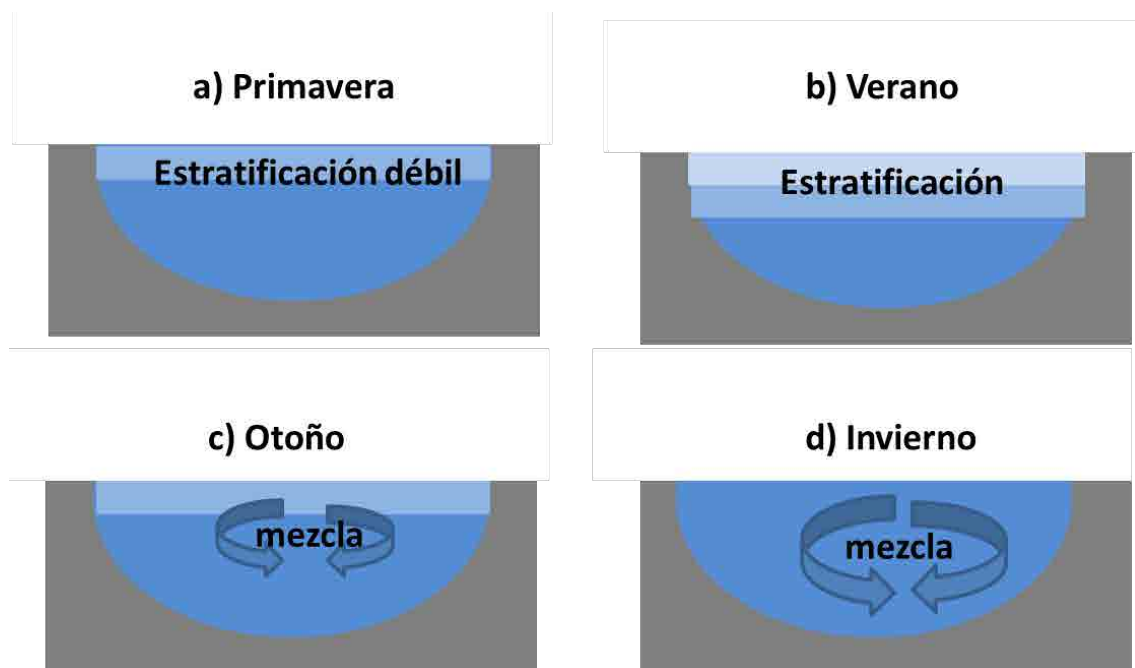


Figura 3. Estratificación térmica a lo largo del año, a) Primavera, b) Verano, c) Otoño y d) Invierno.

En invierno (Figura 3 d) la gran masa de agua suele encontrarse totalmente mezclada, esto suele ser debido a las condiciones de temperatura y a los eventos meteorológicos y de caudales que entran.

A principios de primavera (Figura 3 a) el día empieza a ser más largo, hay más horas de insolación, la temperatura aumenta y esto provoca un calentamiento superficial de la gran masa de agua. A medida que transcurre el tiempo la capa más superficial se va calentando y al

tener menor densidad que el agua más fría las capas se van diferenciando, dividiendo el embalse en epilimnion e hipolimnion.

A medida que se acerca el verano las capas superiores están cada vez más expuestas a la radiación y por tanto están más calientes mientras que en el fondo encontramos el agua más fría, que al ser más fría es más densa. El calentamiento diferencial de las grandes masas de agua, debido a la estrecha relación entre temperatura y densidad, provoca la presencia de gradientes térmicos importantes.

Si no están regulados, en verano los ríos tributarios al embalse también suelen tener temperatura superior a la del fondo (de acuerdo con la temperatura del aire) y suelen circular superficialmente. En casos de regulación aguas arriba por parte de presas en las que la estratificación sea importante y la toma se haga en profundidad, el agua del río entrante puede ser más fría que las capas superficiales de la gran masa de agua por lo que el agua se situará por densidad y se posicionará en capas inferiores.

Debido a la diferencia de densidades las grandes masas de agua presentan una fuerte inercia térmica, por lo que a finales de verano es cuando el epilimnion suele ser más grueso y más estable (Figura 3 b).

A principios de otoño la gran masa de agua conserva una temperatura alta y si el agua de los ríos llega más fría se hunde produciéndose una circulación de fondo. A medida que disminuyen la temperatura del aire y las horas de radiación solar directa la capa superficial se va debilitando (Figura 3 c), disminuyendo su temperatura, mientras que la capa inferior no sufre modificaciones importantes.

A medida que avanza el otoño el epilimnion se ha ido debilitando, por lo que pequeñas fluctuaciones de caudales entrantes o eventos meteorológicos de lluvias importantes o tormentas pueden provocar la mezcla de la gran masa de agua. Cuando se produce la mezcla prácticamente todo el perfil del embalse queda a la misma temperatura y en invierno se mantiene mezclado (Figura 3 d).

En algunos momentos del invierno puede darse una “estratificación inversa” que consiste en que debido a las bajas temperaturas del aire y a la menor incidencia de radiación la capa más superficial en contacto con la atmosfera queda más fría que el agua que tiene por debajo. También sería el caso de las formaciones de placas de hielo en la superficie.

En los lagos y embalses estratificados las tasas de transporte horizontal son varios órdenes de magnitud mayores que las tasas de transporte vertical (Imboden & Wüest, 1995; Yeates & Imberger, 2003), lo que explica por qué la mayoría de los lagos y embalses son lateralmente homogéneos pero verticalmente estratificados térmicamente. Como consecuencia de esta estratificación térmica, la distribución de las especies biogeoquímicas, tales como nutrientes, oxígeno disuelto y los productores primarios son controlados, en gran medida, por los mecanismos de flujo vertical (Dodson, 2005; Nishiri *et al.*, 2000).

La estratificación dificulta el movimiento y la circulación del agua entre el epilimnion y el hipolimnion (Figura 2). De esta forma, cuando el embalse se encuentra estratificado, los principales intercambios que se producen son de partículas que van del epilimnion al hipolimnion y por el mecanismo de sedimentación. Este impedimento de la circulación interna del agua provoca una serie de problemas en las capas profundas asociados a la calidad del agua.

2.3.4 Procesos de mezcla

La mezcla tiene lugar cuando las fuerzas motrices ganan a las de la estratificación por densidad. La columna vertical pierde su estabilidad térmica y hay circulación en la vertical. Los procesos de mezcla de las grandes masas de agua (Figura 3 c y d), están regulados básicamente por factores generadores de energía cinética y la energía térmica (Wetzel, 2001). En lagos y embalses, dichos factores son principalmente el viento y la radiación solar. Sin embargo, los caudales de salida y entrada, la forma de la cubeta, el volumen de agua almacenada, el área superficial y el clima lumínico, también pueden ser factores importantes en la mezcla (Han *et al.*, 2000).

2.3.5 Ciclo diario

La interfaz agua-aire es la base de intercambios permanentes de energía: aportes de calor por radiación solar y atmosférica, aportes turbulentos por la fricción del viento, pérdidas de calor por evaporación, conducción térmica y radiación de la superficie del agua.

Debido a la radiación solar la temperatura del agua tiene fuertes variaciones diurnas, normalmente el embalse tendrá las temperaturas máximas por la tarde; y las mínimas a primera hora de la mañana.

2.3.6 Transporte de temperatura en el agua

El movimiento y la dispersión de la temperatura en un cuerpo de agua se describen por la ecuación de convección-difusión. La ecuación es en general la misma, con algunas modificaciones en sus términos fuente, para casi todos los parámetros de calidad del agua ya sean contaminantes, salinidad, sedimentos en suspensión (Olsen *et al.*, 2000).

Los efectos de los cambios térmicos a lo largo de ríos españoles han sido estudiados en general y revisados por García de Jalón *et al.* (García de Jalón *et al.*, 1992, 1988). En el caso de los embalses de Cataluña también se publicó una caracterización de los embalses (Agència Catalana de l'Aigua, 2003). En el caso particular de la cuenca del Ebro, Alberto y Arrúe estudiaron las características térmicas de la cuenca al completo (Alberto & Arrúe, 1986; Arrúe & Alberto, 1986), cuando se empezaron a estudiar las características térmicas encontrando una relación lineal entre la temperatura y la altitud. En 2011, Prats estudió el tramo final del río Ebro y lo simuló numéricamente (Prats, 2011).

2.3.7 Intercambio de calor agua-atmósfera

El balance térmico superficial determina los regímenes de radiación y temperatura, el transporte del agua, el crecimiento vegetal y la productividad de sus ecosistemas (Wetzel, 1975).

El Sol y la atmósfera transmiten calor a la masa de agua por radiación. Al mismo tiempo esta masa de agua también emite radiación hacia la atmósfera. Se establece un intercambio que se puede traducir en un calentamiento de la masa de agua si el balance vence en favor de los primeros o en un enfriamiento de ésta si por el contrario la masa de agua emite más que recibe.

El balance térmico superficial sobre la masa de agua se define por los flujos térmicos que lo componen (cantidades de calor que atraviesan una superficie unitaria por unidad de

tiempo). Las unidades típicas en el Sistema Internacional utilizadas son J/s (joules por segundo) o W/m² (vatios por metro cuadrado).

Los intercambios de energía en la interfaz agua-aire han sido estudiados por innumerables autores (Hartman, 1994; Henderson-Sellers, 1986; Salençon & Thebault, 1997; Salençon *et al.*, 1976; Walter O. Wunderlich, 1972) y en caso de no disponer de mediciones de la variable en cuestión se pueden estimar aceptablemente a partir de los parámetros meteorológicos.

Los intercambios de energía agua-atmósfera, esquematizados gráficamente en la Figura 4, ponen en juego gran cantidad de mecanismos, de características muy diferentes. Se resumen y definen en el libro *“Modélisation d'écosystème lacustre”* (Salençon & Thebault, 1997) y en el artículo de referencia mundial *“Calculating the Surface Energy Balance for Lake and Reservoir Modeling - A review”* de Henderson-Sellers (Henderson-Sellers, 1986). Otro buen artículo de resumen aplicado a lagos es *“Numerical modeling of thermal Stratification in a lake reservoir. Methodology and case study”* de Bonnet, Poulin y Devaux (Bonnet *et al.*, 2000).

De manera resumida este intercambio de calor agua-atmósfera se divide en dos mecanismos diferentes, la radiación y la turbulencia (Salençon & Thebault, 1997):

Transferencia de energía por *radiación*:

- Radiación de origen solar que penetra dentro de la masa de agua (RS)
- Radiación de origen atmosférico (RA)
- Radiación emitida por la masa de agua (RE)

Transferencia de energía por turbulencia:

- Transporte turbulento de calor debido a la *evaporación* (CE)
- Transporte turbulento de calor debido a la *convección térmica* (CV)

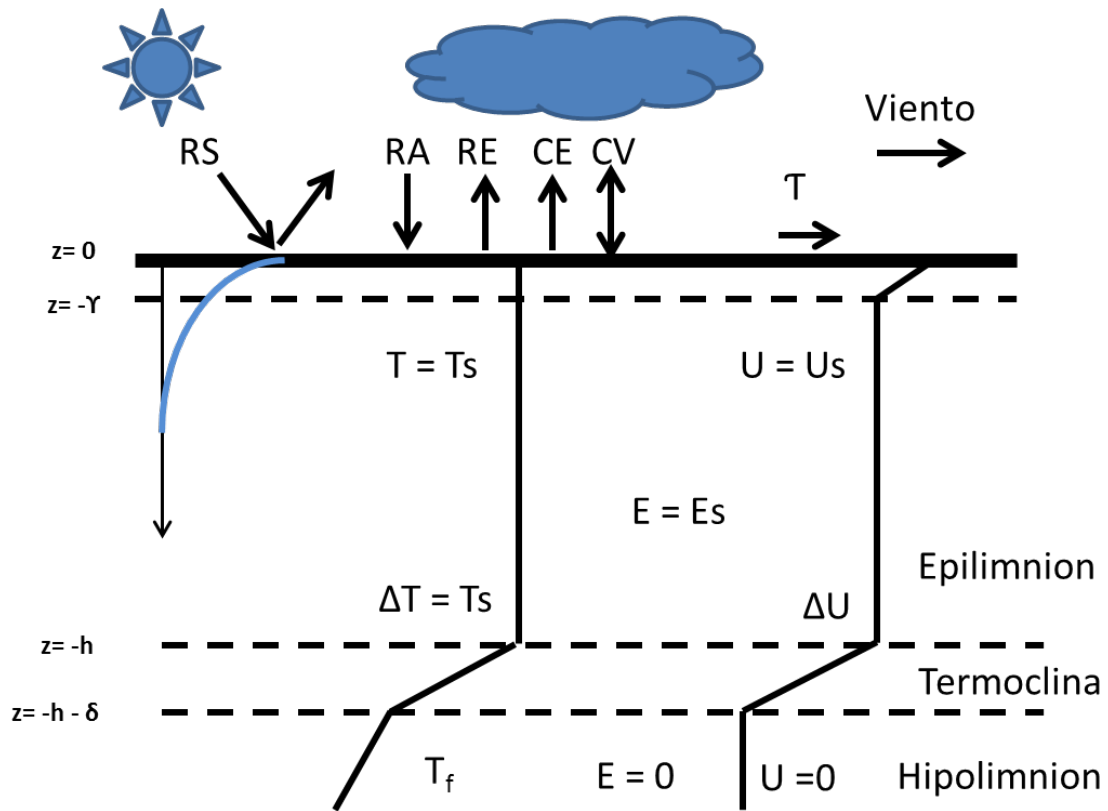


Figura 4. El intercambio de energía en el agua y la atmósfera. Esquema modificado (Salençon & Thebault, 1997).

En “Calculating the Surface energy balance for lake and reservoir modeling: a review” (Henderson-Sellers, 1986) se analizan y comparan distintas fórmulas utilizadas para el cálculo del balance térmico superficial de embalses.

El intercambio de calor superficial (H_A) se puede formular también como un proceso término a término además del proceso de transporte por conducción entre elementos adyacentes (Prats, 2011).

$$H_A = H_{sn} + H_{an} - H_w - H_e + H_c + H_l + H_f$$

Ecuación 1

Donde H_{sn} es la radiación solar absorbida por el agua H_{an} es la radiación atmosférica de onda larga absorbida por el agua, H_w es la radiación de onda larga emitida por el agua, H_e es la pérdida de calor por evaporación, H_c el intercambio de calor sensible, H_l tendrá en cuenta las variaciones de temperatura debidas al agua de lluvia y H_f es el término fuente de calor debido a la fricción.

Más detalladamente:

- **H_{sn}** es la radiación solar absorbida por el agua ($W \cdot m^{-2}$). Se puede medir o calcular como la suma de H_{sd} (radiación directa) y H_{si} (radiación incidente) en función del ángulo de incidencia (Prats, 2011). Hay varios métodos de cálculo, y formulaciones en función de las características de la zona (Hartman, 1994; Henderson-Sellers, 1986; Prats, 2011; Salençon & Thebault, 1997). Además si se consideran los efectos de la sombra (topográfica, árboles,...) se pueden añadir otras variables (Cole & Wells, 2008), la nubosidad, albedo...
- **H_{an}** es la radiación atmosférica de onda larga absorbida por el agua ($W \cdot m^{-2}$) también se pueden encontrar gran cantidad de formulaciones empíricas que permiten calcularla (en función del albedo, coeficiente de emisividad atmosférica).
- **H_w** es la radiación de onda larga emitida por el agua ($W \cdot m^{-2}$). Normalmente se puede calcular como:

$$H_w = \varepsilon_w \sigma T_w^4$$

Ecuación 2

En que ε_w es la emisividad del agua para la que se suele tomar el valor de 0.96-0.97 (Bonnet et al., 2000; Henderson-Sellers, 1986; Prats, 2011) y T_w es la temperatura del agua (K).

- **H_e** es la pérdida de calor por evaporación ($W \cdot m^{-2}$): se pueden encontrar formulaciones empíricas que suelen depender principalmente del viento (apartado 2.3.7.1). Las formulaciones más sencillas suelen ser relaciones lineales calibradas en cada caso de estudio (Prats, 2011). También hay formulaciones teóricas que dependen de coeficientes empíricos que añaden parámetros como la estabilidad atmosférica o los coeficientes convectivos de la atmósfera. Aquí también se pueden dar complicaciones en el estudio por zonas (debidas al coeficiente de protección del viento, que puede ser muy diferente para dos puntos relativamente cercanos), la influencia de la topografía, corrientes del viento variables en la zona de estudio,...
- **H_c** es el intercambio de calor sensible ($W \cdot m^{-2}$). Esta variable está altamente relacionada con la evaporación; en función de las características del agua y la capa de

atmósfera en contacto con la masa de agua. H_e y H_c se relacionan mediante la relación de Bowen (Prats, 2011).

- H_i es la variación de temperatura debido al agua de lluvia a diferente temperatura (Henderson-Sellers, 1986). Se podría tener en cuenta pero debido a su reducido volumen respecto los caudales se desprecia para estos casos de estudio (Arbat-Bofill *et al.*, 2009; Cole & Wells, 2008).
- H_f es el incremento de calor debido a la fricción. Se desprecia por no ser importante en el presente caso de estudio (Prats, 2011).

Se debe tomar especial atención en la consideración de los signos, normalmente se suele considerar positivo cuando se trata de entradas de calor a la masa de agua; y valores negativos cuando se trata de pérdidas de calor.

En la literatura especializada se pueden encontrar gran número de ecuaciones empíricas que permiten calcular estas variables (Bonnet *et al.*, 2000; Cole & Wells, 2008; Henderson-Sellers, 1986; Hodges, 1998; Prats, 2011; Ramos Fuertes, 2012; Walter O. Wunderlich, 1972; Webb & Nobilis, 1997) así como instrumentos que permiten medirlas de manera directa o indirecta.

2.3.7.1 Efectos del viento

El viento juega un papel importante como motor de la hidrodinámica de lagos y embalses (Huber *et al.*, 2008; Morillo *et al.*, 2008; Rubbert *et al.*, 2005) y aunque se suele introducir como un parámetro del apartado de turbulencia anterior, en este apartado se destacan sus efectos. Es poco probable que en un entorno natural el campo de vientos sea homogéneo (Stevens & Lawrence, 1997). En la literatura se pueden encontrar casos de estudio de embalses en los que la distribución espacial del viento no es uniforme ya sea por términos de corrientes, de topografía o de escala (Rubbert *et al.*, 2005).

Cuando el viento sopla cerca de la masa de agua transmite unos esfuerzos tangenciales a la superficie que generan olas o corrientes. Habitualmente se generan al mismo tiempo pero son fenómenos distintos. Los efectos del viento pueden afectar solamente a las capas superficiales o a toda la vertical alimentando la mezcla.

La importancia relativa de la protección o refugio por parte de la topografía circundante así como los cambios de rugosidad de la superficie del agua también se deben tener en cuenta (Huber *et al.*, 2008). Además, se pueden dar casos más complejos en los que haya más de una entrada de viento procedente de diferentes direcciones (Morillo *et al.*, 2008).

En la bibliografía se pueden encontrar gran número de estudios centrados en el estudio de los efectos del viento (concepto de *wind forcing*) en lagos y embalses (Hodges *et al.*, 2000b; Huber *et al.*, 2008; Morillo *et al.*, 2008; Rubbert *et al.*, 2005; Rueda *et al.*, 2003).

2.3.8 Flujos de entrada y salida

En este apartado se comentan los efectos de los flujos de agua entrantes al embalse y los salientes por la presa. En función del régimen y la magnitud de los caudales de entrada y el régimen de las extracciones por turbinado de la presa, las condiciones tanto hidrodinámicas como térmicas del embalse pueden variar de manera importante.

A los anteriores procesos hidrodinámicos internos hay que superponer los efectos de las entradas y salidas del agua al embalse. Las entradas a los embalses, los flujos de entrada, suelen ser ríos y, por tanto, llegan habitualmente por superficie. El río circula superficialmente hasta que llega a un punto donde se hunde y llega a colocarse a la capa del embalse que le corresponde por densidad. Este punto se denomina punto de inmersión (Figura 1 d). Por tanto, la densidad del agua de entrada o, por extensión, su temperatura será muy importante para poder predecir la estructura de capas del embalse.

Los caudales de entrada no necesariamente llegan mezclados ni tampoco con las mismas características, también pueden presentar variaciones en función de la profundidad.

En cuanto a las salidas de caudal los embalses presentan un amplio abanico de configuraciones en función de sus usos. Pueden variar en función de las características de la presa, de la profundidad y la magnitud de la/s extracción/es. Las salidas suelen estar reguladas artificialmente tanto en cantidad (caudal turbinado) como en cota/s. Cuando hay otro embalse aguas arriba, las entradas también están reguladas y su temperatura depende de la cota de las tomas de agua del embalse superior. La explotación hidráulica gobierna la retención de agua y nutrientes a los diferentes estratos y compartimentos, hecho

determinante en la respuesta limnológica del sistema (Fischer *et al.*, 1979; Martin & McCutcheon, 1998).

En función del régimen y la magnitud de los caudales de entrada y el régimen de las extracciones por turbinado de la presa las condiciones tanto hidrodinámicas como térmicas del embalse pueden variar de manera importante.

2.3.9 Intercambio de calor masa de agua – sedimento del sustrato

El interés por la modelación física de la hidrodinámica de lagos y embalses surgió aproximadamente en los años sesenta (Raphael, 1962). En estos primeros intentos de modelación no se estudiaba el fenómeno de la conducción de calor entre sustrato y la masa de agua debido a su pequeña influencia en el balance total de temperatura y la atención se centraba sobretodo en el intercambio de calor agua-atmosfera (Edinger *et al.*, 1968). Estudios posteriores pusieron de manifiesto la importancia de considerar la transferencia de calor entre agua y sustrato, especialmente en los casos de cuerpos de agua de poca profundidad (puesto que la radiación solar directa influye más directamente a la temperatura del sedimento del fondo).

Actualmente el cálculo del intercambio de calor con el sustrato se suele tener en cuenta en cualquier modelo de balance de flujo de calor para ríos (Jobson, 1977; Likens & Johnson, 1969) y también se considera en la mayoría de modelos de hidrodinámica de ríos (Fang & Stefan, 1998; Tsay *et al.*, 1992).

Muchos estudios del balance térmico de masas de agua continentales se centran en lagos de zonas templadas, cuyo balance se define en primer lugar por los flujos de energía en superficie y, en menor medida, por intercambios en el límite agua-sedimento y la energía asociada a entradas o salidas de agua en el sistema (Henderson-Sellers, 1986). Ello ha conducido generalmente a excluir el intercambio de calor con el lecho ante el efecto atenuante de una columna de agua profunda que impide a los flujos atmosféricos dominantes alcanzar la base del sistema.

El intercambio de calor entre el sustrato y el agua puede tener lugar mediante diferentes procesos (por conducción, por convección y por advección). En modelos sencillos se utiliza una expresión similar a la del intercambio de calor superficial (Prats *et al.*, 2011):

$$H_{sw} = -K_{sw}(T_w - T_{sed}) \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde H_{sw} es la tasa de intercambio de calor entre el sedimento y el agua, K_{sw} es un coeficiente de intercambio de calor sedimento-agua; y T_w y T_{sed} son las temperaturas del agua y del sedimento respectivamente (para simplificar se suele utilizar una temperatura constante para el sedimento, y se propone utilizar el promedio anual).

Típicamente se suele calcular como si fuera únicamente conductivo (Ecuación 4) utilizando la ecuación de conducción del calor (Fang & Stefan, 1998; Hondzo & Stefan, 1994):

$$\frac{\partial T_b}{\partial t} = \alpha_b \frac{\partial^2 T_b}{\partial z^2} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde $T_b(z,t)$ es la temperatura del sustrato a la profundidad z en el tiempo t , y α_b es la difusividad térmica del sedimento (una función de su conductividad, densidad y la capacidad calórica volumétrica del sedimento).

En casos especiales, si se dispone de suficiente información de la temperatura del sedimento, el intercambio de calor entre el agua y el sedimento del sustrato se puede calcular mediante su ratio de intercambio (Fang & Stefan, 1998; Hondzo & Stefan, 1994; Tsay *et al.*, 1992).

En la literatura se pueden encontrar gran variedad de ecuaciones (la mayoría de ellas empíricas) que relacionan el intercambio de calor entre sustrato y agua (mediante correlaciones o parámetros físicos conocidos). En embalses el efecto del intercambio de temperatura entre el sedimento del fondo y el agua se puede considerar nulo en muchos casos, especialmente cuando se trata de zonas o embalses de con profundidades importantes; aun así, para estos casos se podría considerar el efecto de las zonas más cercanas a las márgenes.

2.4 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

El transporte de sedimentos en grandes masas de agua (desde los ríos a los océanos y pasando por los lagos y embalses) representa una vía importante en el ciclo geoquímico global (Cushman-Roisin & Beckers, 2011), además de ser una medida importante de la degradación del suelo y la consiguiente reducción de los recursos mundiales de suelos (Walling & Fang, 2003).

Los flujos de sedimentos en un río son sensibles a gran variedad de influencias: desde la construcción de embalses, los movimientos de tierras, los cambios en los usos del suelo, la actividad minera, las trampas de sedimento, las condiciones meteorológicas, los regímenes de caudales, la deforestación, así como los efectos del cambio climático global (Walling & Fang, 2003). Algunos de estos efectos hacen que el transporte de sedimentos aumente, mientras que en otros casos, como por ejemplo la construcción de embalses, hace que ésta disminuya drásticamente. Además algunas tienen efectos a corto plazo otras a lo largo del tiempo, por lo que es difícil calcular y cuantificar los valores absolutos de los balances de transporte de sedimentos.

2.4.1 Sedimentos en suspensión y transporte de fondo

El movimiento de los sedimentos en las corrientes y ríos presenta dos formas. Los sedimentos en suspensión están constituidos por las partículas más finas mantenidas en suspensión por los remolinos de la corriente y sólo se depositan cuando la velocidad de la corriente disminuye, o bien cuando la corriente descarga en un embalse o lago. Las partículas sólidas de mayor tamaño son arrastradas a lo largo del lecho de la corriente y se designan con el nombre de arrastre de fondo. Existe un tipo intermedio de movimiento, la saltación, en el que las partículas se mueven aguas abajo dando rebotes o saltos, a veces tocando el fondo y a veces avanzando en suspensión hasta que vuelven a caer al fondo.

Las cantidades relativas que avanzan en suspensión y el arrastre de fondo pueden variar considerablemente. Cuando el sedimento procede de un suelo de grano fino como el limo, o una arcilla aluvial, el sedimento puede estar casi totalmente en suspensión. Por el otro lado, una corriente de montaña limpia y rápida puede tener cantidades insignificantes de materia

en suspensión y casi la totalidad del movimiento de la grava, los guijarros y las piedras se produce por el lecho.

2.4.2 Sedimentos depositados en embalses

Las presas interrumpen la continuidad de la transferencia de sedimentos en los sistemas fluviales atrapando toda carga de fondo y una parte importante de la carga suspendida. Las altas concentraciones de sedimentos en suspensión que se depositan en un embalse pueden reducir considerablemente el volumen disponible para el almacenamiento de agua, especialmente a lo largo de los años (Han *et al.*, 2000; Roura, 2004; Roura *et al.*, 2008).

Los sedimentos en suspensión en la columna de agua es un componente natural de lagos y ríos (Toniolo & Schultz, 2005). Concentraciones excesivas de sedimentos en suspensión, sin embargo, pueden deteriorar ciertos usos. Por ejemplo, las altas cargas de sedimentos pueden enterrar gravas y reducir la penetración de la luz en la columna de agua. Los sedimentos en el agua utilizada para abastecimiento de agua potable pueden causar problemas de sabor y olor pero también afectan a la gestión, puesto que ponen en peligro la eficiencia y el funcionamiento de los sistemas de tratamiento (Roura, 2004).

Los sedimentos en suspensión también pueden contribuir en el intercambio iónico y adsorción entre las fases disueltas y partículas de diferentes constituyentes (Horne & Goldman, 1994) y actuar como un medio de almacenamiento y transporte de nutrientes, contaminantes orgánicos, y concentración de metales traza. Las concentraciones de sedimentos en suspensión están controladas por factores tales como la hidrodinámica, la propia fuente del sedimento, la densidad del sedimento, y las tasas de sedimentación. La sedimentación en los embalses provoca una reducción progresiva de la capacidad de embalse y crea serios problemas para la gestión del agua, especialmente cerca de puntos cerca de la presa. Para cuantificar las magnitudes sedimentadas en un embalse es necesario realizar levantamientos topográficos de las cuencas de los embalses naturales o artificiales, precisos y a intervalos, para calcular la producción de sedimentos de la cuenca (Roura, 2004). Además, las presas disminuyen el transporte de gran parte de los sedimentos reduciendo el suministro de arena a la costa y a los deltas (Vericat & Batalla, 2004).

2.5 CALIDAD DEL AGUA

Las propiedades físicas, químicas y biológicas de un embalse varían análogamente a las características hidrodinámicas y térmicas, por lo que no son homogéneas. Como se ha comentado en los apartados anteriores se producen gradientes muy marcados. Estos gradientes determinan los organismos presentes en cada una de las zonas del embalse y su estado, puesto que la biología viene muy condicionada por los procesos físicos y químicos que tienen lugar (Wotton, 1995).

La calidad del agua, importante para el medio ambiente y también para los diferentes usos que se haga de ella, depende también de los procesos físicos, químicos y biológicos. Es importante llevar a cabo una gestión de la gran masa de agua de tal modo que tenga en cuenta la combinación de estas tres tipologías de procesos combinando la ingeniería con la biología. En esta dependencia recae la importancia de conocer detalladamente el comportamiento y el funcionamiento de los movimientos y corrientes del agua (2.2), el comportamiento térmico (2.3), el transporte y deposición de sedimentos (2.4) y por lo tanto el conjunto del funcionamiento de la gran masa de agua. Éste comportamiento físico, químico y biológico del agua viene determinado por los varios agentes dinámicos (2.2.2) y su evolución en el tiempo.

2.5.1 Eutrofización

La eutrofización de lagos y embalses y el crecimiento de algas asociado al proceso es un problema importante en cuanto a la calidad del agua de los embalses de todo el mundo. La eutrofización es el proceso natural por el cual la gran masa de agua pasa a tener más nutrientes, es decir de estado oligotrófico a eutrófico (Bayly & Williams, 1973). Este enriquecimiento de nutrientes se junta con un aumento en el crecimiento del fitoplancton (Ordóñez, 2010). Los factores más importantes que controlan el crecimiento son la disponibilidad de los nutrientes, la luz y las condiciones de mezclado. Una abundancia excesiva de fitoplancton en general tiene efectos perjudiciales sobre los usos domésticos, industriales y recreativos de los cuerpos de agua. Durante los periodos de agotamiento de floraciones de algas se produce oxígeno en la columna de agua inferior, a menudo resultando en la muerte de peces (Dodson, 2005; Ordóñez, 2010). Además, como las algas crecen y se descomponen, surgen problemas, no únicamente estéticos sino también de olor, debido a la

acumulación de escoria en la superficie del agua y orillas (Soranno, 1997). Potencialmente, el fitoplancton tóxico puede ser un riesgo grave tanto para la gestión de la gran masa de agua como para la salud de los seres humanos y los animales. Sus efectos han estado implicados en incidentes de envenenamiento numerosos en todo el mundo (Carmichael et al. 2001).

Los criterios para determinar el grado de eutrofización son diversos (Ordóñez, 2010). Generalmente se miden tres parámetros relacionados como son el fósforo total, la clorofila o la transparencia del agua mediante el disco de Secchi (Dodson, 2005). Se puede hacer una clasificación del embalse en función de cada parámetro por separado o también existen índices que engloban los tres. En cualquier caso, las categorías de embalse según el grado de eutrofización, y de menos a más, son: ultraoligotrófico, oligotrófico, mesotrófico y eutrófico (Carol *et al.*, 2006; Ordóñez, 2010).

2.6 MODELIZACIÓN NUMÉRICA

En las últimas décadas se han ido desarrollando modelos numéricos que permiten calcular la hidrodinámica y la evolución térmica de ríos y embalses. El objetivo de los modelos es determinar la evolución física y térmica del embalse y, en algunos casos, la calidad del agua en función de los procesos meteorológicos, entradas y salidas de caudal además de otros procesos que tienen lugar en el mismo.

En el apartado 2.6.1 se citan los procesos más importantes que se deben tener en cuenta cuando se modela la hidrodinámica de un embalse, haciendo especial hincapié en los modelos que contemplan la temperatura (apartado 2.6.2).

También se enumera rápidamente la situación actual de los modelos (apartado 2.6.3) y esquemas numéricos (apartado 2.6.4) para resolver las ecuaciones 3D (apartado 2.6.5). Finalmente se listan algunas de las herramientas numéricas existentes más conocidas y utilizadas (apartado 2.6.6).

2.6.1 Modelización de embalses

Los flujos geofísicos se rigen por un conjunto de ecuaciones acopladas no lineales. Las ecuaciones que rigen son las expresiones matemáticas de las dos leyes de conservación física:

la masa y la cantidad de movimiento, dando lugar a las ecuaciones de Navier-Stokes (Cushman-Roisin & Beckers, 2011; Dodson, 2005), pero la descripción del sistema de fluido no queda completa hasta que se proporciona una relación entre la densidad y la presión que constituye la ecuación de estado, que define la naturaleza del fluido.

A los efectos de la dinámica de fluidos geofísicos se suelen aplicar ciertas simplificaciones, como la aproximación de Boussinesq, o la suposición de aguas someras, lo que puede provocar una pérdida apreciable de precisión. Una característica fundamental del comportamiento hidrodinámico de grandes masas de agua es la posibilidad de estratificación térmica por los cambios de densidad del agua en función de los ciclos de temperatura anual. Así, en la modelización de estos procesos es importante tener en cuenta tanto la turbulencia como la inestabilidad de la mezcla vertical del flujo y la convección (Cushman-Roisin & Beckers, 2011).

Los modelos numéricos centrados en la hidrodinámica de flujos estratificados son una herramienta útil para estudiar el comportamiento de los embalses, tanto para hacer predicciones como para llevar a cabo una gestión sostenible. La predicción del comportamiento de un embalse sobre la base de diferentes escenarios estará condicionada por la calidad de los datos disponibles y la exactitud del sistema numérico (Cushman-Roisin & Beckers, 2011; Hodges *et al.*, 2000a). La modelización numérica se ha utilizado para simular con éxito la estratificación y la temperatura del agua, las distribuciones térmicas en numerosos estudios sobre el cambio ecológico y climático y en diferentes masas de agua (Komatsu *et al.*, 2007; Schertzer *et al.*, 2003) aunque se encuentra en constante evolución y desarrollo.

Los modelos utilizados en el campo de estudio hidrodinámico se dividen de varias formas, a grandes rasgos pueden ser:

- **Unidimensionales**, permiten la predicción de la distribución de la temperatura, la salinidad y la densidad en un perfil vertical.
- **Bidimensionales**, plantean un análisis en un plano definido o bien en X-Y (direcciones longitudinal y transversal del embalse) o bien en X-Z (direcciones longitudinal y vertical).

- **Tridimensional**, el análisis se realiza en las tres dimensiones del espacio. En este caso se incrementa notablemente el tiempo de cálculo y la cantidad de información necesaria para conseguir resultados realistas.

Normalmente los modelos numéricos centrados en calcular la evolución térmica de un embalse contemplan un módulo que realiza un balance superficial de temperatura entre agua y aire (atmósfera); otro que contempla las entradas y salidas de caudales (módulo hidrodinámico) y finalmente otro que modela la transferencia de calor entre agua-sustrato (éste último se puede omitir en algunos casos).

2.6.2 Modelización de la temperatura en embalses

A finales de los años 70 y a durante los 80 se desarrollaron los primeros modelos que introdujeron el cálculo de la temperatura del agua. Los primeros intentos de modelización de la estructura interna de un embalse iban encaminados a predecir la temperatura de los caudales de salida. En 1962, Raphael describió un primer modelo de capas horizontales (Raphael, 1962), éste modelo fue la base de la mayoría de modelos numéricos que emergieron en los años 60's (Fischer et al., 1979). Se han utilizado gran cantidad de modelos con esta teoría inicial obteniendo resultados aceptables en la predicción de la temperatura del agua extraída del embalse.

En 1972 se publica un estudio de las relaciones de intercambio agua-atmosfera por TVA y revisado por Lowney (Lowney, 2000). La referencia estándar para el balance se da en Oke en 1984 (Oke, 1987).

La mayoría de modelos de temperatura están limitados en cuanto el uso empírico de la difusividad y la turbulencia. Puesto que la mayor entrada de energía calórica proviene de la radiación en la superficie del agua en algunos casos se han obteniendo resultados aceptables aun sin conocer exactamente los procesos dinámicos que tienen lugar dentro del embalse (Fischer et al., 1979; Rutherford, 1994).

A partir de los noventa los estudios se han encaminado a mejorar el amplio rango de fenómenos difusivos y de mezcla que tienen lugar en el interior del embalse. Es necesario conocer el funcionamiento hidrodinámico del interior del embalse para poder estudiar su

influencia en los patrones de reacciones bioquímicas que tienen lugar en el mismo, para estudios de calidad del agua en general y a varias escalas.

Hasta hace poco los modelos numéricos centrados en modelizar la evolución térmica de un embalse calculaban separadamente la hidrodinámica por un lado y después utilizaban esta base para calcular el transporte de calor. Actualmente existen algunos modelos que acoplan los módulos.

Actualmente la limitación de los modelos numéricos es la calidad y la cantidad de los datos de entrada (Hamilton & Schladow, 1997; Schladow & Hamilton, 1997). En muchos casos los datos de entrada para los balances superficiales son los procedentes de estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio; en otros casos (cuando hay falta de datos) se pueden utilizar datos empíricos para estimar la temperatura superficial en función de la latitud (Colomer, 1993; Salençon et al., 1976; Thébault & Salençon, 1993).

2.6.3 Modelización tridimensional

Los procesos de transporte en un embalse son intrínsecamente tridimensionales (3D) por lo que se tiene que definir exactamente la geometría y las características del embalse en todo el conjunto (Laval *et al.*, 2000).

La aplicación de modelos hidrodinámicos tridimensionales para estudios de circulación y mezcla en embalses, estuarios y zonas costeras es un desarrollo relativamente reciente. Durante el último cuarto de siglo, los avances en el diseño de métodos numéricos y la disponibilidad de ordenadores más potentes han estimulado un aumento en el uso y desarrollo de modelos en 3D.

Existe una considerable variabilidad tanto temporal como espacial de las corrientes y las propiedades del agua a lo largo de la longitud de los embalses. Las medidas de campo en tres dimensiones rara vez son lo suficientemente densas en el espacio y el tiempo para describir todos los patrones de circulación y procesos de mezcla. Otra tendencia evolutiva significativa ha tenido lugar en el muestreo de campo así como en el desarrollo de instrumentos de campo capaces de medir las corrientes y los parámetros de calidad del agua en embalses (perfiladores de corriente acústicos Doppler, sondas multiparamétricas, cadenas de termistores, sensores de oxígeno disuelto o temperatura entre otras variables). Junto con los

ordenadores ha aumentado la capacidad de los instrumentos a la hora de medir y almacenar series de datos temporales para largos periodos de tiempo. Aunque todos estos avances en las medidas de campo permiten hoy cubrir la necesidad crítica de datos apropiados para la evaluación de las capacidades de los modelos 3D, muchos de los desarrollos y aplicaciones existentes en modelos 3D se han basado en pocos datos, insuficientes para dar confianza razonable en la capacidad predictiva del modelo.

Los avances en la potencia de los ordenadores han permitido modelizar en 3D proporcionando una mejor consideración de los efectos topográficos y una mejor resolución de las ondas internas, la mezcla y de los gradientes espaciales. Aun así, es difícil realizar modelos simples que reflejen todos los efectos de transporte de temperatura y evolución térmica en 3D con gran exactitud y si lo hacen tienen altos costos computacionales.

Por desgracia, las simulaciones tridimensionales a largo plazo (por ejemplo a escala 50-100 años) y para mallas de embalses con gran resolución (debido a las dimensiones de los embalses las mallas 3D tienen muchos elementos) aún siguen siendo muy costosas a nivel de cálculo. Actualmente los modelos de embalses 3D se pueden aplicar o bien en zonas concretas del embalse o bien a estudios en que simulan cortos periodos de tiempo.

2.6.4 Esquemas numéricos

Las ecuaciones de Navier-Stokes, son ecuaciones en derivadas parciales que no tienen solución analítica. En la actualidad existen diferentes programas de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), comerciales y libres, que implementan varios métodos para su resolución. En el campo de la modelización de embalses hay algunas herramientas de uso general, con esquemas en diferencias finitas, la mayoría de ellas con simplificaciones importantes y por lo tanto con falta de precisión para describir algunos de los procesos que tienen lugar en los embalses.

El método de los elementos finitos no ha sido demasiado popular a la hora de resolver las ecuaciones de Saint Venant debido a su complejidad y coste computacional (Bladé, 2005). Sin embargo, los avances en la potencia de los ordenadores y escalas de tiempo anuales al alcance de las estaciones de trabajo de escritorio han permitido realizar gran número de estudios numéricos aplicados a embalses (Casulli, 1997; Hodges *et al.*, 2000b; Schwab & Bedford, 1995).

Los modelos tridimensionales proporcionan una mayor resolución de los efectos topográficos, las ondas internas, la mezcla, y los gradientes espaciales. Por desgracia, en la práctica simulaciones con mallas de alta resolución espacial y largos periodos de tiempo, que pueden suponer simulaciones de varios meses con incrementos de tiempo pequeños, requieren aumentar la velocidad de cómputo disponible y la memoria por lo menos dos órdenes de magnitud en comparación con los modelos 2D.

Los modelos de aguas someras ya se utilizan normalmente para la simulación de avenidas, respuestas de cuenca, etc. e incluso se han utilizado en algunas ocasiones para el caso de embalses donde los efectos 3D se pueden simplificar a 2D (Arbat-Bofill *et al.*, 2010a). Incluso las ecuaciones de aguas someras en 3D (3D-SWE), que son una versión simplificada de las *Reynolds Averaged Navier-Stokes* 3D (RANS 3D), no son capaces de calcular la propagación de las ondas de profundidad, debido principalmente a la consideración de una distribución de la presión no hidrostática (Hodges *et al.*, 2000a).

Una diferencia fundamental entre los diferentes esquemas numéricos radica en la forma en que se calculan los flujos entre celdas, especialmente el flujo convectivo, que como se verá a continuación es el que plantea mayores problemas de estabilidad numérica

2.6.5 Ecuaciones 3D

Los procesos de transporte en embalses son intrínsecamente fenómenos tridimensionales (3D), especialmente cerca de la presa. En la superficie libre tampoco se dan fenómenos homogéneos, la radiación no incide de la misma manera en toda la superficie, los efectos del viento pueden ser distintos y la topografía o la historia térmica interna del embalse también juega un papel importante.

2.6.5.1 Ecuaciones de balance de masas y momento en 3D

Las ecuaciones hidrodinámicas que gobiernan el movimiento del agua provienen de la ley de conservación de la masa (o continuidad) y la segunda ley de Newton, de las que se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes. Se puede encontrar gran cantidad de bibliografía al respecto con diferentes aproximaciones y simplificaciones para los cálculos (Cushman-Roisin & Beckers, 2011; Vreugdenhill, 1994).

Las ecuaciones de Navier-Stokes son un sistema de ecuaciones altamente no-lineal e inestable (Cea *et al.*, 2008). Esta fuerte no-linealidad de las ecuaciones produce oscilaciones de alta frecuencia cuando el número de Reynolds aumenta, y ello produce que el flujo se vuelva inestable y turbulento.

Las ecuaciones de Navier-Stokes, para flujo no-hidrostático en lámina libre derivan en las ecuaciones RANS 3D (*Reynolds Averaged Navier Stokes*). Para fluido Newtoniano incompresible de densidad constante, se pueden expresar como:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_t}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{T_{ij}^v}{\rho} - \overline{u_i u_j} \right] - \delta_{i3} g \quad \text{Ecuación 6}$$

$$T_{ij}^v = \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde U_i es la velocidad, P_t la presión total, T_{ij}^v el tensor de fuerzas viscosas, ρ la densidad del fluido, g la aceleración de la gravedad, μ la viscosidad dinámica del fluido, y $\rho \overline{u_i u_j}$ las fuerzas de Reynolds.

La presión total (P_t) se puede descomponer en las contribuciones hidrostática (P_h) y dinámica (P_d):

$$P_t = P_h + P_d \quad \text{Ecuación 8}$$

La presión hidrostática, que balancea la fuerza de gravedad, se define como:

$$\frac{\partial P_h}{\partial z} = -\rho g, P_h(z = z_s) = 0 \quad \text{Ecuación 9}$$

La integración vertical de la ecuación anterior desde una elevación arbitraria (z) a la superficie libre (z_s) da:

$$P_h = \rho g(z_s - z) \quad \text{Ecuación 10}$$

Aplicando las relaciones mencionadas a las ecuaciones RANS 3D se obtiene:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -g \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_t}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{T_{ij}^v}{\rho} - \overline{u_i u_j} \right] - \delta_{i3} g \quad i=1,2 \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\frac{\partial U_3}{\partial t} + \frac{\partial U_3 U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_t}{\partial x_3} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{T_{3j}^v}{\rho} - \overline{u_3 u_j} \right] \quad \text{Ecuación 13}$$

Para simplificar, la turbulencia y las fuerzas viscosas se pueden considerar negligibles, y las ecuaciones se simplifican, quedando:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad \text{Ecuación 14}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -g \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_d}{\partial x_i} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\frac{\partial U_3}{\partial t} + \frac{\partial U_3 U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_d}{\partial x_3} \quad \text{Ecuación 16}$$

La principal ventaja de los modelos RANS-3D respecto a modelos de aguas someras es que no realizan ninguna hipótesis respecto a la distribución de presiones o de velocidades en el fluido. Los errores cometidos se reducen a la modelización de la turbulencia, a errores numéricos de resolución de las ecuaciones, o a otros errores debidos a una falta de definición de la geometría del problema.

2.6.5.2 Transporte de la temperatura

Normalmente se considera que el transporte de temperatura en un embalse se comporta como un escalar. El transporte de un determinado escalar (densidad, cantidad de movimiento, temperatura, salinidad, concentración de solutos) en el seno de un fluido se produce, en general, tanto por advección con el campo de velocidad media como por difusión molecular y turbulenta. La ecuación de conservación del escalar (Φ) es la siguiente:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial \phi u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S \quad \text{Ecuación 17}$$

Dónde Γ es el coeficiente de difusión (molecular y turbulenta) y S es un término fuente.

2.6.6 Herramientas numéricas existentes

A continuación se enumeran y describen brevemente algunas de las herramientas numéricas existentes (comerciales y libres) que se están utilizando en la actualidad para la simulación hidrodinámica y, especialmente, térmica de grandes masas de agua. Se ponen de manifiesto sus características principales, sus puntos fuertes y sus debilidades en cuanto a su aplicación a la modelación de embalses. No se utilizan únicamente modelos para lagos adaptados a embalses, puesto que en los últimos años ya se ha puesto de manifiesto que las características de la hidrodinámica de los embalses difieren mucho del concepto teórico de “lago” ideal (Marcé *et al.*, 2008).

DYRESM (1D)

DYRESM (*DY*namical *RE*Servoir *SI*mulation *MO*del) del *Centre for Water Research (University of Western Australia)* es un modelo hidrodinámico unidimensional que predice la distribución

vertical de temperatura, salinidad y densidad en lagos y embalses que cumplan la aproximación unidimensional (Antenucci & Imerito, 2003). La aproximación unidimensional es válida cuando las variaciones en el espacio no son significativas (embalses o lagos cortos, geometría regular,...). Las escalas de tiempo simuladas por el modelo pueden ir desde varias semanas a decenas de años. DYRESM modelo permite predecir la variabilidad estacional e interanual de los lagos y embalses así como los efectos de los cambios a largo plazo.

DYRESM se puede ejecutar de forma aislada para estudios puramente hidrodinámicos o bien junto a CAEDYM (*Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model*) para investigaciones que involucran procesos biológicos y/o químicos (Antenucci *et al.*, 2003; Hipsey *et al.*, 2004).

CE-QUAL-W2 (2D)

CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008) es un modelo de calidad del agua en dos dimensiones (longitudinal y vertical) que simula la evolución hidrodinámica de una gran masa de agua. Debido a que el modelo supone homogeneidad lateral, es adecuado para masas de agua relativamente largas y estrechas que tienen gradientes de calidad de agua longitudinales y verticales. El modelo se ha aplicado a los ríos, lagos, embalses, estuarios, y combinaciones de ellos. Además permite simular más de 60 parámetros bioquímicos de calidad del agua adicionales, si se dispone de los datos de entrada correspondientes, como oxígeno disuelto, salinidad, concentraciones de elementos traza, blooms de algas, macrófitos,... se ha utilizado en estudios de hidrodinámica y de calidad del agua. Es el modelo libre más utilizado actualmente en modelación de la evolución térmica de embalses, testado en gran cantidad de casos.

El esquema numérico se basa en la discretización mediante diferencias finitas y la lámina de agua se resuelve de forma implícita. El modelo representa un cuerpo de agua como una rejilla de celdas formadas por segmentos longitudinales y capas verticales que tiene en cuenta el ancho (versión simplificada de la batimetría).

ELCOM (3D)

ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model) del Centre for Water Research (University of Western Australia) es un modelo tridimensional para hidrodinámica de lagos y embalses (Casulli & Cheng, 1992; Hodges & Dallimore, 2010), y se utiliza para predecir la

variación de la temperatura y salinidad del agua en el espacio y el tiempo. Análogamente a DYRESM (Antenucci & Imerito, 2003), ELCOM se puede acoplar al modelo CAEDYM (Hipsey et al., 2004) para modelizar la calidad del agua. El esquema numérico fundamental de ELCOM es una adaptación del esquema fundamental TRIM (Casulli & Cheng, 1992) con modificaciones en la conservación de las variables de cálculo, la difusión numérica y la aplicación de un modelo de capa mixta (estratificación y turbulencia).

Las ecuaciones de transporte son las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en la profundidad y las ecuaciones de transporte de escalares utilizan la aproximación de Boussinesq (sin incluir los términos de presión). La evolución de superficie libre se rige por la integración vertical de la ecuación de continuidad para el flujo incompresible desde la parte inferior de la columna de agua hasta la superficie libre a la que se aplica una condición de contorno cinemática.

GOTM (3D)

GOTM es la abreviatura de "*General Ocean Turbulence Model*" (Umlauf et al., 2007). Es un modelo de columna de agua de una sola dimensión de los procesos más importantes hidrodinámicos y termodinámicos relacionados con la mezcla vertical de las aguas naturales, pensado para grandes masas de agua. Aunque está pensado para estudios en el océano también se puede aplicar a embalses. El núcleo del modelo calcula las ecuaciones de transporte de cantidad de movimiento, la salinidad y el calor en una dimensión.

Además de la clásica combinación de la parte hidrodinámica y turbulenta del modelo, se han desarrollado e implementado nuevas subrutinas como el transporte de sedimentos. Se sigue trabajando en módulos que se pueden acoplar a GOTM (componentes biológicos y biogeoquímicos, los módulos de interacción aire-mar, trazando las rutinas, etc) que no son estrictamente parte de la estructura de la base de GOTM. GOTM es un sistema integrado, la comunidad entorno basados en software se traduzca en un rango casi ilimitado de aplicaciones en modelos de la turbulencia geofísica, por lo que alguno de sus módulos puede ser utilizado para el estudio de embalses.

Iber (2D, en el plano)

Iber (desarrollado conjuntamente por el CIMNE, el GEAMA de la UdC y el Grupo de Investigación Flumen UPC) con la colaboración del CEDEX es un modelo numérico

bidimensional integrado en la vertical para la simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial (Bladé *et al.*, 2014, 2009).

El modelo Iber consta de 3 módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos (Bladé *et al.*, 2014). Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros. En el módulo hidrodinámico se resuelven las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad (ecuaciones de Saint Venant 2D). También se ha desarrollado un módulo de calidad de agua que contempla el balance térmico superficial entre otros fenómenos.

El módulo de turbulencia permite incluir las tensiones turbulentas en el cálculo hidrodinámico, pudiéndose utilizar para ello diferentes modelos de turbulencia para aguas someras con diferente grado de complejidad. En la versión actual se incluyen un modelo parabólico, un modelo de longitud de mezcla y un modelo k- ϵ .

El módulo de transporte de sedimentos resuelve las ecuaciones de transporte de fondo y transporte turbulento en suspensión, calculando a partir del balance de masa de sedimento la evolución de la cota de fondo. Estas ecuaciones son empíricas, obtenidas para casos particulares, por lo que los resultados obtenidos con ellas serán sólo válidos para el análisis de tendencias (Bladé *et al.*, 2014).

El rango de aplicación de Iber abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios. Aunque es 2D en el plano se ha utilizado para estudios hidrodinámicos y de transporte de sedimentos en suspensión en zonas someras de embalses y los resultados han sido satisfactorios (Arbat-Bofill *et al.*, 2011, 2010b).

TELEMAC (2D y 3D)

El Sistema TELEMAC (TELEMAC-MASCARET) es un programa en elementos finitos del Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE), parte del grupo de investigación EDF (Électricité de France). Después de años de distribución comercial, en 2010 fue lanzado en *open source*.

TELEMAC 2D (Lang & Desombre, 2014) se utiliza para simular flujos en lámina libre en las dos dimensiones horizontales del espacio. Resuelve las ecuaciones de Saint Venant (con la simplificación de aguas someras) utilizando elementos finitos o volúmenes finitos en una malla de elementos triangulares. El régimen puede ser permanente o variable. Relacionados con la distribución de temperatura TELEMAC puede simular los siguientes fenómenos: tiene en cuenta efectos no laminares, influencia de los efectos meteorológicos, turbulencia, gradientes de temperatura y salinidad,... TELEMAC 2D se ha aplicado a varios campos.

Además TELEMAC ha desarrollado un módulo hidrodinámico 3D que utiliza la misma malla 2D no-estructurada del TELEMAC 2D pero resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes. La malla 3D se conforma de varias mallas 2D unas encima de otras (Desombre, 2013).

MOHID (casi-3D)

MOHID es una herramienta de modelización numérica tridimensional, desarrollado por el MANTREC (*Marine and Environmental Technology Research Center*) del Instituto Superior Técnico de la Universidad Técnica de Lisboa en cooperación con Hidromod. El sistema MOHID incluye un módulo hidrodinámico baroclínico para la columna de agua y 3D para los sedimentos y los correspondientes módulos de transporte euleriano y lagrangiano. El módulo de turbulencia utiliza el modelo GOTM (*General Ocean Turbulence Model*).

MOHID permite modelizar variedad de procesos (físicos y bioquímicos) a diferentes escalas temporales o de magnitud, y para diferentes sistemas (estuarios o láminas de agua). El sistema MOHID está basado en la filosofía de modelación integrada y la programación orientada a objetos. MOHID consta de varios módulos: MOHID Water, MOHID Land y MOHID Soil, que permiten el estudio del ciclo del agua en un enfoque integrado. El software MOHID se ha aplicado en diferentes casos de estudio, como son áreas costeras o estuarios, así como para procesos oceánicos y en embalses.

La discretización espacial se realiza mediante la aproximación mediante volúmenes finitos, permitiendo más flexibilidad en la subdivisión de los dominios y en la implementación de coordenadas verticales.

SSIM (casi-3D)

La herramienta numérica SSIM (Nils & Olsen, 2010) se utiliza para el estudio de la dinámica fluvial así como de transporte de sedimentos. El modelo numérico SSIM resuelve las ecuaciones de Reynolds (RANS 3D) mediante el método de los volúmenes finitos y el algoritmo SIMPLE (Baranya & Engineering, 2009; Patankar, 1980; Versteeg & Malalasekera, 2007) en una malla tridimensional, no ortogonal y estructurada. Se ha validado en varios estudios de dinámica fluvial, transporte de sedimentos (Baranya & Engineering, 2009) y otras aplicaciones de ingeniería ambiental (transporte de sedimentos, estudios de ríos, confluencias, ...). Los códigos fuente son accesibles por lo que se pueden utilizar libremente e incluso adaptarlos a la formulación necesaria.

FreeFlow (3D)

FreeFlow es un modelo numérico para el cálculo de flujo no hidrostático en lámina libre (Cea *et al.*, 2008). FreeFlow resuelve las ecuaciones RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) tridimensionales para flujo no compresible. El cálculo de las tensiones turbulentas se realiza mediante el modelo k- ϵ . FreeFlow posee asimismo un módulo de temperatura y otro de salinidad, los cuales permiten calcular las corrientes generadas por diferencias de densidad provocadas por gradientes de temperatura y salinidad, así como los procesos de estratificación de las masas de agua. Todas las ecuaciones se resuelven mediante el método de volúmenes finitos en una malla no-estructurada. El modelo aún se está desarrollando y no está disponible al público.

Tanto la entrada de datos como la salida de resultados se realizan mediante ficheros de texto que se deben generar manualmente o mediante otros programas de pre y postproceso. FreeFlow no posee una interfaz gráfica propia de entrada ni de salida de resultados.

El módulo hidrodinámico incluye las fuerzas de flotación generadas por gradientes de densidad mediante la aproximación de Boussinesq. El flujo convectivo se discretiza mediante un esquema de orden superior, utilizando el algoritmo SIMPLE, un método semi-implícito de presión ligado a las ecuaciones (Versteeg & Malalasekera, 2007) para conseguir un acoplamiento presión-velocidad. Las ecuaciones se resuelven en una cuadrícula no escalonada, con la interpolación Rhie-Chow con el fin de estabilizar el campo de presión (Cea *et al.*, 2008).

Los módulos de salinidad y de temperatura resuelven respectivamente la ecuación de conservación de la masa de sal y la ecuación de conservación del calor. A partir de los valores de concentración de sal y de temperatura se calcula la densidad del fluido en cada elemento de la malla de cálculo a partir de la ecuación de estado del agua de mar de la UNESCO. Dicha densidad se utiliza en el módulo hidrodinámico con el fin de evaluar las fuerzas de flotación mediante la aproximación de Boussinesq.

Los principales campos de aplicación de FreeFlow en el ámbito de la hidráulica fluvial y costera son: cálculo de corrientes en masas de agua 3D como embalses y estuarios, cálculo de corrientes generadas por el oleaje, cálculo de flujo en meandros, cálculo de flujo alrededor de estructuras hidráulicas como pilas, estribos, escalas de peces, aliviaderos, redes de canales y el cálculo de flujo en presión en uniones de tuberías y otros mecanismos hidráulicos.

2.6.7 Discusión

En las tres últimas décadas han mejorado mucho las capacidades de memoria y cálculo de los ordenadores por lo que gracias a esto se ha avanzado en el estudio del movimiento y la mezcla de agua de los lagos y embalses con la ayuda de modelos numéricos. También se ha avanzado en el desarrollo de los mismos, y ya se pueden simular modelos complejos de hidrodinámica y de calidad del agua en dos y tres dimensiones.

Actualmente, en la mayoría de estudios numéricos de embalses se siguen utilizando modelos bidimensionales para el cálculo de la evolución hidrodinámica y térmica de los mismos. En algunos casos se promedian en la dimensión vertical (como es el caso de los lagos someros o estuarios) pero en la mayoría de casos hay una variación térmica importante en la vertical y no es recomendable despreciarla. En la gran mayoría de estudios 2D hidrodinámicos y, especialmente, térmicos de embalses se desprecia la dimensión lateral (promedio en el ancho) como es el caso de CE-QUAL-W2 para tener en cuenta la variación en profundidad. Los modelos bidimensionales promediados en el ancho son típicamente útiles en casos de embalses largos y estrechos con variaciones hidrodinámicas y térmicas importantes en la vertical y a lo largo de su longitud.

Aunque los modelos 2D son útiles para muchas aplicaciones, por lo general, se aplican limitaciones restrictivas que afectan a los cálculos:

- a) Si se promedia en la vertical (como es el caso de Iber) se pueden calcular velocidades, gradientes de densidad y temperatura en el plano pero se desestima el perfil de densidad y temperatura del embalse. Los modelos promediados en la vertical se deben evitar para el estudio de la evolución térmica de un embalse, aunque se pueden utilizar cuando se trate de masas poco estratificadas o de poca profundidad.
- b) Un modelo promediado en el ancho considera homogénea la sección transversal. Esta simplificación tiene sentido en masas de agua que tengan las longitudes transversales muy superiores al ancho o que las variaciones longitudinales y verticales sean mucho más importantes que las laterales. Esta simplificación no funcionaría bien para los casos en que se tengan gradientes de temperatura o densidad a lo ancho (especialmente en casos en que hay variaciones importantes en la batimetría a lo ancho o entradas y salidas laterales de tributarios con características diferentes a las del embalse de estudio).

Los modelos 2D suelen ser más rápidos de programar, no se necesita tanta resolución espacial de datos de entrada ni una batimetría tan precisa y, por supuesto, el tiempo de cálculo es mucho menor. Los estudios que utilizan los modelos 2D también suelen ser más rápidos que los 3D debido a que se evita la necesidad de parametrizar y calibrar bien los procesos de mezcla vertical y horizontal. La parametrización de la difusión vertical, en particular, es uno de los problemas más difíciles en la aplicación de modelos en 3D en casos de estratificación.

2.7 BIBLIOGRAFÍA

AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA, 2003. Caracterització i propostes d'estudi dels embassaments catalans segons la Directiva 2000/60/CE del Parlament Europeu.

ALBERTO, & ARRÚE, 1986. Anomalías térmicas en algunos tramos de la red hidrográfica del Ebro. An. la Estac. Exp. Aula Dei 18, 91–113.

ALLAN, 1995. Stream ecikigy. Structure and function of running waters. London.

ANTENUCCI, ALEXANDER, ROMERO, & IMBERGER, 2003. Management strategies for a eutrophic water supply reservoir - San Roque, Argentina. *Water Sci. Technol.* 47, 149–55.

ANTENUCCI, & IMERITO, 2003. The CWR Dynamic Reservoir Simulation Model DYRESM. User Manual, Water Research. Perth.

ARBAT-BOFILL, BLADÉ, SÁNCHEZ-JUNY, & DOLZ, 2010a. Módulo de transporte de sedimentos en suspensión en el modelo IBER: Calibración y aplicación para el tercio superior del embalse de Ribarroja de Ebro y la confluencia con el río Segre en el entorno de Mequinenza .

ARBAT-BOFILL, BLADÉ, SÁNCHEZ-JUNY, DOLZ, COBOS CAMPOS, & POLANCO, 2011. Study of solid transport digital model in Segre river suspension in the Ribarroja de Ebro reservoir tail end, in: 2nd International Congress on Dam Maintenance and Rehabilitation. pp. 633–641.

ARBAT-BOFILL, BLADÉ, SÁNCHEZ-JUNY, DOLZ, COBOS, & POLANCO, 2010b. Estudio en modelo numérico del transporte sólido en suspensión del río Segre en la cola del embalse de Ribarroja de Ebro, in: Dam Maintenance and Rehabilitation II. Zaragoza.

ARBAT-BOFILL, SÁNCHEZ-JUNY, BLADÉ, & DOLZ, 2009. Modelación bidimensional del Embalse de Ribarroja de Ebro con CE-QUAL-W2, in: Jornadas de Ingeniería del Agua, Madrid. p. 10.

ARMENGOL, & DOLZ, 2004. La gestión a corto plazo del agua de los embalses, in: II Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. pp. 875–889.

ARRÚE, & ALBERTO, 1986. El régimen térmico de las aguas superficiales de la Cuenca del Ebro. *An. la Estac. Exp. Aula Dei* 18, 31–50.

BARANYA, & ENGINEERING, 2009. Three-dimensional analysis of river hydrodynamics and morphology. Budapest University of Technology and Economics.

BAYLY, & WILLIAMS, 1973. *Inland waters and their ecology*. Camberwell, Vic., Longman Australia.

BLADÉ, 2005. Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones. Universitat Politècnica de Catalunya.

BLADÉ, CEA, CORESTEIN, ESCOLANO, PUERTAS, VÁZQUEZ-CENDÓN, DOLZ, & COLL, 2014. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Rev. Int. Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ing.* 30, 1-10. doi:10.1016/j.rimni.2012.07.004

BLADÉ, CORESTEIN, CEA, LARA, DOLZ, PUERTAS, & BALAIRÓN, 2009. Desarrollo de un modelo de simulación de flujo en ríos. *Convenios de colaboración CEDEX-UPC-UdC*, in: *Jornadas de Ingeniería del Agua*, Madrid. IAHR, Madrid, pp. 17-18.

BOE, 1999. Orden, de 13 de agosto, por la que se dispone la publicación de las determinaciones de contenido normativo del Plan Hidrológico de la cuenca del Ebro, aprobado por el Real Decreto 1664/1998, del 24 de julio.

BOEHRER, FUKUYAMA, CHIKITA, & KIKUKAWA, 2008. Deep water stratification in deep caldera lakes Ikeda, Towada, Tazawa, Kuttara, Toya and Shikotsu. *Limnology* 10, 17-24. doi:10.1007/s10201-008-0257-1

BONNET, POULIN, & DEVAUX, 2000. Numerical modeling of thermal stratification in a lake reservoir. *Methodology and case study. Aquat. Sci.* 62, 105. doi:10.1007/s000270050001

CAISSIE, 2006. The thermal regime of rivers: a review. *Freshw. Biol.* 51, 1389-1406. doi:10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x

CAROL, BENEJAM, ALCARAZ, VILA-GISPERS, ZAMORA, NAVARRO, ARMENGOL, & GARCIA-BERTHOU, 2006. The effects of limnological features on fish assemblages of 14 Spanish reservoirs. *Ecol. Freshw. Fish* 15, 66-77. doi:10.1111/j.1600-0633.2005.00123.x

CASULLI, 1997. Numerical simulation of three-dimensional free surface flow in isopycnal co-ordinates. *J. Num. Meth. Fluids* 25, 645-658.

CASULLI, & CHENG, 1992. Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow. *Int. J. Numer. Methods Fluids* 15, 629-648.

CEA, STELLING, & ZIJLEMA, 2008. Non-hydrostatic 3D free surface layer-structured finite volume model for short wave propagation m, 382-410. doi:10.1002/fld

COLE, & WELLS, 2008. CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model. Version 3.6 User Manual, Version 3. ed. Water Quality Group - Portland State University, Portland.

COLOMER, 1993. A model to calculate surface energy fluxes from routine meteorological data. In: Application to Lake Banyoles. Verh. Int. Ver. Limnol 25, 88–90.

CUSHMAN-ROISIN, & BECKERS, 2009. Introduction to Geophysical Fluid Dynamics. Physical and Numerical Aspects, under contract with Academic Press, Academic P. ed, Dartmouth College Hanover, NH.

CUSHMAN-ROISIN, & BECKERS, 2011. Introduction to Geophysical Fluid Dynamics - Physical and Numerical Aspects, 1st. ed. Academic Press.

DAKE, & HARLEMAN, 1969. Thermal Stratification in Lakes: Analytical Studies. Water Resour. Res. 5, 484–495.

DESOMBRE, 2013. 3D Hydrodynamics TELEMAC-3D Software. Release 6.2. Reference Manual.

DODSON, 2005. Introduction to limnology, 1st ed. McGrawHill Higher Education.

EDINGER, DUTTWEILER, & GEYER, 1968. The Response of Water Temperatures to Meteorological Conditions. Water Resour. Res. 4, 1137. doi:10.1029/WR004i005p01137

ELÇİ, 2008. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality. Limnology 9, 135–142. doi:10.1007/s10201-008-0240-x

FANG, & STEFAN, 1998. Temperature variability in lake sediments. Water Resour. Res. 34, 717. doi:10.1029/97WR03517

FISCHER, LIST, KOH, IMBERGER, & BROOKS, 1979. MIXING in inland and Coastal Waters. Academic Press, San Diego, California.

GARCÍA DE JALÓN, GONZÁLEZ DEL TÁNAGO, & CASADO, 1992. Ecology of regulated streams in Spain: an overview. Limnetica 8.

GARCÍA DE JALÓN, MONTES, BARCELÓ, CASADO, & MENES, 1988. Effects of hydroelectric scheme on fluvial ecosystems within the Spanish Pyrenees. Regul. Rivers Res. Manag. 2, 479–491. doi:10.1002/rrr.3450020402

GOEL, 2006. Water Pollution - Causes, Effects and Control. New Age International, New Delhi.

GÓMEZ-GIRALDO, IMBERGER, & ANTENUCCI, 2006. Spatial structure of the dominant basin-scale internal waves in Lake Kinneret. *Limnol. Oceanogr.* 51, 229–246.

GONZÀLEZ, 2007. Modelització de la hidrodinàmica d'un embassament. Aplicació al cas de l'embassament de Riba-roja al riu Ebre. Universitat Politècnica de Catalunya.

HAMILTON, & SCHLADOW, 1997. Prediction of water quality in lakes and reservoirs . Part I - Model description 96, 91–110.

HAN, ARMENGOL, GARCÍA, COMERMA, ROURA, DOLZ, & STRASKRABA, 2000. The thermal structure of Sau Reservoir (NE: Spain): a simulation approach. *Ecol. Modell.* 125, 109–122. doi:10.1016/S0304-3800(99)00176-3

HARTMAN, 1994. The Energy Balance of the Surface, in: *Global Physical Climatology*. Academic Press, San Diego, pp. 81–114.

HELLAWELL, 1986. Biological indicators of freshwater pollution and environment management. Elsevier, London.

HENDERSON-SELLERS, 1986. Calculating the surface energy balance for lake and reservoir modeling: A review. *Rev. Geophys.* doi:10.1029/RG024i003p00625

HIPSEY, ROMERO, ANTENUCCI, HAMILTON, & M.R., 2004. COMPUTATIONAL AQUATIC ECOSYSTEM DYNAMICS MODEL CAEDYM v.2.1, Water Research. Centre for Water Research - University of Western Australia.

HODGES, 1998. Heat Budget and Thermodynamics at a Free Surface: Some Theory and Numerical Implementation. *Univ. West. Aust.* 1–14.

HODGES, & DALLIMORE, 2010. Estuary, Lake and Coastal Ocean Model: ELCOM v2 . 2 User Manual, Water Research.

HODGES, IMBERGER, LAVAL, & APPT, 2000a. Modeling the hydrodynamics of stratified lakes, in: *Proc. Hydroinformatics Conference*. pp. 23–27.

HODGES, IMBERGER, SAGGIO, & WINTERS, 2000b. Modeling basin-scale internal waves in a stratified lake. *Limnol. Oceanogr.* 45, 1603–1620.

HONDZO, & STEFAN, 1994. Riverbed heat conduction prediction. *Water Resour. Res.* 30, 1503. doi:10.1029/93WR03508

HORNE, & GOLDMAN, 1994. *Limnology*, Second Edi. ed. McGraw-Hill, Inc., New York.

HUBER, IVEY, WAKE, & OLDHAM, 2008. Near-Surface Wind-Induced Mixing in a Mine Lake. *J. Hydraul. Eng.* 134, 1464. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:10(1464)

IGLESIAS, ESTRELA, & GALLART, 2005. Impactos sobre los recursos hídricos, in: Moreno (Ed.), *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático*. Ministerio del Medio Ambiente, Madrid, pp. 303–353.

IMBERGER, 1994. Transport processes in lakes, in: Margalef (Ed.), *Limnology Now: A Paradigm of Planetary Problems*. Elsevier Science, New York, p. 553.

IMBODEN, & WÜEST, 1995. Mixing mechanisms in lakes, in: Lerman, Imboden, Gat (Eds.), *Physics and Chemistry of Lakes*. Springer, pp. 83–138.

JOBSON, 1977. Bed Conduction for Thermal Models. *J. Hydraul. Div. Proc. ASCE* 103, 1213–1217.

KIM, & KIM, 2006. Application of a 2-dimensional water quality model (CE-QUAL-W2) to the turbidity interflow in a deep reservoir (Lake Soyang, Korea). *Lake Reserv. Manag.* 22, 213–222.

KOMATSU, FUKUSHIMA, & HARASAWA, 2007. A modeling approach to forecast the effect of long-term climate change on lake water quality. *Ecol. Modell.* 209, 351–366.

LANG, & DESOMBRE, 2014. *TELEMAC Modelling System. 2D Hydrodynamics. TELEMAC-2D Software Release 7.0. Users Manual*.

LAVAL, HODGES, & IMBERGER, 2000. Numerical Diffusion in Stratified Lake Models, in: *proceedings of the Fifth international Symposium in Stratified Flows, Vancouver*.

LIKENS, & JOHNSON, 1969. Measurement and analysis of the annual heat budget for the sediments in two Wisconsin lakes. *Limnol. Oceanogr.* 14, 115–135.

LOWNEY, 2000. Stream temperature variation in regulated rivers: Evidence for a spatial pattern in daily minimum and maximum magnitudes. *Water Resour. Res.* Vol. 36, 2947–2955.

MARCÉ, ARMENGOL, & DOLZ, 2009. Els efectes als embassaments i la seva rellevància en la quantitat i la qualitat de l'aigua per a garantia del recurs, in: Agència Catalana de l'Aigua (Ed.), *Aigua i Canvi climàtic. Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya*. Nova Cultura de l'Aigua. pp. 221–228.

MARCÉ, MORENO-OSTOS, LÓPEZ, & ARMENGOL, 2008. The role of allochthonous inputs of dissolved organic carbon on the hypolimnetic oxygen content of reservoirs. *Ecosystems* 11, 1035–1053. doi:10.1007/s10021-008-9177-5

MARGALEF, 1983. *Limnologia*. Barcelona.

MARTIN, & MCCUTCHEON, 1998. *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*. CRC Press.

MORILLO, IMBERGER, ASCE, ANTENUCCI, & WOODS, 2008. Influence of Wind and Lake Morphometry on the Interaction between Two Rivers Entering a Stratified Lake. *J. Hydraul. Eng.* 134, 1579. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:11(1579)

NILS, & OLSEN, 2010. A Three-Dimensional numerical model for Simulation of Sediment movements In water Intakes with Multiblock option.

NISHIRI, IMBERGER, ECKERT, OSTROWSKY, & GEIFMAN, 2000. The physical regime and the respective biogeochemical processes in lower water mass of Lake Kinneret. *Limnol. Oceanogr.* 45, 972–981.

NULL, LIGARE, & VIERS, 2013. A Method to Consider Whether Dams Mitigate Climate Change Effects on Stream Temperatures. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* 49, 1456–1472. doi:10.1111/jawr.12102

OGIHARA, ZIC, IMBERGER, & ARMPFIELD, 1996. A parametric numerical model for lake hydrodynamics. *Ecol. Modell.* 86, 271–276. doi:10.1016/0304-3800(95)00063-1

OKE, 1987. *Boundary Layer Climates*, Second Edi. ed. Routledge, New York, NY.

OLSEN, NILS, & OLSEN, 2000. *CFD Algorithms for Hydraulic Engineering, Notes*. Department of Hydraulic and Environmental Engineering.

ORDÓÑEZ, 2010. *Limonología del embalse de Sau. Relaciones del zooplancton, la clorofila y los sólidos en suspensión con el clima lumínico del agua*. Universitat de Barcelona.

PATANKAR, 1980. *Numerical heat transfer and fluid flow*. McGraw-Hill, New York.

PRATS, 2011. *El règim tèrmic del tram inferior de l'Ebre i les seues alteracions*. Universitat Politècnica de Catalunya.

PRATS, RAMOS, & DOLZ, 2011. Comparison of Models for Calculation of Diel Sediment-Water Heat Flux from Water Temperatures. *J. Hydraul. Eng.* 137, 1135–1147.

PRATS RODRÍGUEZ, MORALES BAQUERO, DOLZ RIPOLLÉS, & ARMENOL BAQUERO, 2014. Contributions from limnology to reservoir management. *Ing. del agua* 18, 80. doi:10.4995/ia.2014.3145

PRATS, VAL, ARMENGOL, & DOLZ, 2010. Temporal variability in the thermal regime of the lower Ebro River (Spain) and alteration due to anthropogenic factors. *J. Hydrol.* 387, 105–118. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.04.002

RAMOS FUERTES, 2012. *Hidrometeorología y balance térmico de la marisma de Doñana*.

RANGEL-PERAZA, OBREGON, NELSON, WILLIAMS, DE ANDA, GONZÁLEZ-FARÍAS, & MILLER, 2012. Modelling approach for characterizing thermal stratification and assessing water quality for a large tropical reservoir. *Lakes Reserv. Res. Manag.* 17, 119–129. doi:10.1111/j.1440-1770.2012.00503.x

RAPHAEL, 1962. Prediction of temperature in rivers and reservoirs. *J. Power Div. Proced. ASCE* 88, 157–181.

REAL, MUÑOZ, GUASCH, NAVARRO, & SABATER, 2003. The effect of copper exposure on a simple aquatic food chain. *Aquat. Toxicol.* 63, 283–91.

REICHERT, MEIER, BONJOUR, & WU, 2003. Modeling the Effect of Water Diversion on the Temperature of Mountain Streams 755–764.

ROURA, 2004. Incidència de l'embassament de Mequinensa en el transport de sòlids en suspensió i la qualitat del riu Ebre. Universitat Politècnica de Catalunya.

ROURA, ARMENGOL, JAIME, & DOLZ, 2008. Incidencia de los embalses Mequinensa y Ribarroja en el transporte sólido en suspensión del río Ebro. *Ing. del agua* 15, 221–229.

RUBBERT, KONGETER, & KÖNGETER, 2005. Measurements and three-dimensional simulations of flow in a shallow reservoir subject to small-scale wind field inhomogeneities induced by sheltering. *Aquat. Sci.* 67, 104–121. doi:10.1007/s00027-004-0719-4

RUEDA, SCHLADOW, MONISMITH, & STACEY, 2003. Dynamics of Large Polymictic Lake. I: Field Observations. *J. Hydraul. Eng.* 129, 82–91. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:2(82)

RUTHERFORD, 1994. *River Mixing*. John Wiley and Sons, Queensland, Australia.

SALENÇON, BONNEFILLE, & KLEIN, 1976. Variabilité dans le temps des échances océan - atmosphère: Influence des conditions météorologiques. *Elictricité Fr.* 93.

SALENÇON, & THEBAULT, 1997. Les échanges à l'interface eau-atmosphère, in: *Modélisation d'écosystème lacustre*. pp. 56–103.

SCHERTZER, ROUSE, BLANKEN, & WALKER, 2003. Over-lake meteorology and estimated bulk heat exchange of Great Slave Lake in 1998. *J. Hidrometeorol.* 4, 649–659.

SCHLADOW, & HAMILTON, 1997. Prediction of water quality in lakes and reservoirs: Part II - Model calibration , sensitivity analysis and application 96, 111–123.

SCHWAB, & BEDFORD, 1995. Operational Three Dimensional Circulation Modeling in the Great Lakes. *Comput. Model. Seas Coast. Reg.* 387–395.

SORANNO, 1997. Factors affecting the timing of surface scum and epilimnetic blooms of blue-green algae in a eutrophic lake. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 54, 1965–1975. doi:10.1139/cjfas-54-9-1965

STEVENS, & LAWRENCE, 1997. Estimation of wind-forced internal seiche amplitudes in lakes and reservoirs, with data from British Columbia, Canada. *Aquat. Sci.* 59, 115–134. doi:10.1007/BF02523176

STRANG, FERNANDO, FLUID, & PROGRAM, 2001. Entrainment and mixing in stratified shear flows. *J. Fluid Mech.* 428, 349–386. doi:10.1017/S0022112000002706

STUMM, 1985. *Chemical Processes in Lakes*. Wiley-Interscience, New York.

THÉBAULT, & SALENÇON, 1993. Simulation model of a mesotrophic reservoir (Lac de Pareloup, France): biological model. *Ecol. Modell.* 65, 1–30. doi:10.1016/0304-3800(93)90124-B

THORNTON, KIMMEL, & PAYNE, 1990. *Reservoir Limnology: Ecological Perspectives*.

TONIOLO, & SCHULTZ, 2005. Experiments on sediment trap efficiency in reservoirs. *Lakes Reserv. Res. Manag.* 10, 13–24. doi:10.1111/j.1440-1770.2005.00256.x

TSAY, RUGGABER, EFFLER, & DRISCOLL, 1992. Thermal Stratification Modeling of Lakes with Sediment Heat Flux. *J. Hydraul. Eng.* 118, 407. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:3(407)

UMLAUF, BURCHARD, & BOLDING, 2007. *GOTM - Sourcecode and Test Case Documentation (version 4.0)*.

UNESCO, 2014. *The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy (Volume 1)*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris.

UNIÓN EUROPEA, 2000. Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre, Directiva Marco del Agua.

UNIÓN EUROPEA, 2006. Directiva 2006/44/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 6 de septiembre, relativa a la calidad de las aguas continentales que requieren protección o mejora para ser aptas para la vida de los peces.

VERICAT, & BATALLA, 2004. Efectos de las presas en la dinámica fluvial del curso bajo del río Ebro. *Cuaternario y Geomorfoogía* 18, 37–50.

VERSTEEG, & MALALASEKERA, 2007. An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, 2nd Editio. ed. Pearson Education Limited.

VREUGDENHILL, 1994. Numerical Methods for Shallow Water Flow. Water Science and Technology Library.

WALLING, & FANG, 2003. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Glob. Planet. Change* 39, 111–126. doi:10.1016/S0921-8181(03)00020-1

WALTER O. WUNDERLICH, 1972. Heat and Mass Transfer Between a Water Surface and the Atmosphere. Issue 14 of Water resources research laboratory report, Water Resources Research Laboratory Report. Tennessee Valley Authority, Office of Natural Resources and Economic Development, Division of Air and Water Resources, Water Systems Development Branch.

WANG, LI, JIA, QI, & DING, 2013. A review of surface water quality models. *ScientificWorldJournal*. 2013, 231768. doi:10.1155/2013/231768

WEBB, & NOBILIS, 1997. Long-term perspective on the nature of the air-water temperature relationship: a case study. *Hydrol. Process.* 11, 137–147.

WETZEL, 1975. *Limnology*. Saunders, Philadelphia.

WETZEL, 2001. *Limnology Lake and River Ecosystems*. Academic Press.

WOTTON, 1995. Temperature and lake-outlet communities. *J. Therm. Biol.* 20, 121–125. doi:10.1016/0306-4565(94)00042-H

YEATES, & IMBERGER, 2003. Pseudo two-dimensional simulations of internal and boundary fluxes in stratified lakes and reservoirs. *Int. J. River Basin Manag.* 1, 297–319.

YU, TSUNO, HIDAKA, & JIAO, 2010. Chemical and thermal stratification in lakes. *Limnology* 11, 251–257. doi:10.1007/s10201-010-0310-8

Capítulo 3 CASOS DE ESTUDIO

3.1 INTRODUCCIÓN

La construcción de embalses ha generado debate en cuanto a su construcción, uso y regulación. Aun así, en países de climatología tan variable como el nuestro, han sido primordiales para el abastecimiento de agua a la población, sin menospreciar la generación de energía hidroeléctrica. En el mundo se pueden encontrar más de 45.000 embalses de altura superior a los 15 m, con más de 6500 km³ de agua almacenada (Nilsson *et al.*, 2005).

España es el país de Europa con más embalses en explotación (1230 a fecha de hoy), en la Figura 5 se presenta la evolución temporal del número de presas en España hasta el año 2010 (de Cea & Sánchez Cabezas, 2007 modificado por la autora), dónde se puede comprobar cómo a lo largo del Siglo XX se dieron dos tendencias muy claras en la evolución de la construcción de embalses: una primera, correspondiente a la primera mitad del siglo y que se caracterizó por una puesta en explotación de 4 presas al año, mientras que en la segunda mitad del Siglo XX se produjo un importante desarrollo, en la que se pusieron en explotación del orden de unas 20 presas por año. La puesta en explotación de presas en el siglo XXI ha comenzado también con una tendencia creciente aunque mucho más suave.

De estos 1230 embalses, 22 (ver Figura 6) se encuentran en Catalunya (Agència Catalana de l'Aigua, 2003), 9 en las Cuencas Internas y 14 pertenecen a la Confederación Hidrográfica del Ebro al que se le suma otro en construcción (presa del Albagès, Lleida).

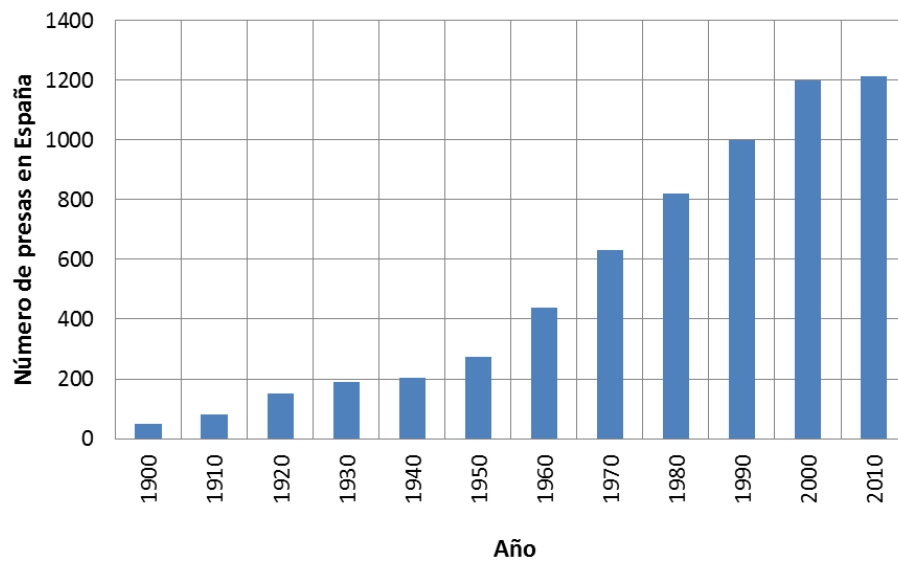


Figura 5. Evolución del número de presas. Fuente: datos del Comité Español de Grandes Presas hasta 2010 (www.spancold.es) actualizado por la autora.



Figura 6. Embalses de Catalunya. Fuente: Agència Catalana de l'Aigua © 2000-2014.

En Catalunya, el consumo total de agua suma 2965 hm³/año. De los cuales el 72% (2114 hm³/año) es utilizado en la agricultura y el 27 % (851 hm³/año) en abastecimiento humano e industrial (Agència Catalana de l'Aigua, 2008; Dolz & Armengol, 2012).

Adicionalmente al gran impacto social que representa la construcción de embalses, estos tienen un impacto directo en los ríos y sobre el paisaje sobre el cual fluyen. Las alteraciones físicas, químicas y biológicas son muchas, pero dentro de las principales se encuentran las siguientes: barrera migratoria a peces y fauna presente en el río, reducción del flujo aguas abajo del embalse, estabilización de los regímenes de caudal del río, cambios en regímenes térmicos del agua del río o la reducción de la carga de sedimentos transportados hacia aguas abajo (Ordóñez, 2010).

La disponibilidad y calidad del agua embalsada depende de factores relacionados directamente con las características de la cuenca, a las cargas de nutrientes que lleva, a la variabilidad de los aportes hidrológicos y a la gestión que se realice de los embalses. La gestión de un embalse es importante (en especial para embalses de abastecimiento de agua) no únicamente para el consumidor si no por lo que supone económicamente para la empresa que lo gestiona (Armengol & Dolz, 2004).

Conocer la evolución de las diferentes variables hidráulicas y limnológicas de estas grandes masas de agua embalsadas (sean anuales, mensuales, diarias o incluso horarias) pueden ayudar en la toma de decisiones para la gestión de las mismas. Con tal de realizar dicho seguimiento limnológico, es preciso entender cómo se comporta un embalse y como enunció Margalef: *“Un embalse es un híbrido de río y lago, y su estudio se ha de basar en una visión completa de la limnología”* (Margalef, 1983). Antiguamente se asemejaba el comportamiento de un embalse al de un lago, pero se ha comprobado que en los tramos aguas arriba la dinámica es más parecida a la del río. El mejor esquema teórico para un embalse es entenderlo como un “híbrido” entre río y lago, y así poder entender sus patrones de cambio y de equilibrio a lo largo de su longitud desde la cola a las proximidades de la presa (Margalef, 1983).

El Instituto de investigación Flumen lleva estudiando diferentes embalses españoles desde hace más de veinte años, centrándose en los procesos físicos que tienen lugar en los mismos (en especial la evolución de caudales y temperatura). Se han llevado a cabo varias tesis doctorales relacionadas con la hidrodinámica de los embalses del bajo Ebro (Prats,

2011; Roura, 2004; Val, 2003), y del río Ter, en particular del embalse de Sau (Ordóñez, 2010) así como diversos estudios relacionados con la calidad del agua (Marcé *et al.*, 2005; Prats *et al.*, 2010; Prats-Rodríguez *et al.*, 2011). Más recientemente, en los últimos seis años, se ha empezado a simular numéricamente la hidrodinámica y la evolución térmica de los embalses mediante diferentes modelos numéricos así como algunos estudios de la evolución sedimentaria en el tramo final río Ebro.

3.2 TIPOLOGÍAS DE EMBALSE

3.2.1 Características de los embalses

Según la Real Academia Española (<http://www.rae.es/>) un embalse se define como: “*gran depósito que se forma artificialmente, por lo común cerrando la boca de un valle mediante un dique o presa, y en el que se almacenan las aguas de un río o arroyo, a fin de utilizarlas en el riego de terrenos, en el abastecimiento de poblaciones, en la producción de energía eléctrica, etc.*”. Aunque superficialmente pueden asemejarse a un lago, hay importantes diferencias en cuanto a morfología, hidrología y ecología (Dodson, 2005). El estado trófico, cantidad y producción de fitoplancton o las cualidades físico-químicas del lago/embalse son aspectos importantes para establecer las condiciones del agua dulce (Carlson, 1977; Esteves, 1998). Los embalses se pueden clasificar de diferentes maneras, a lo largo de los estudios limnológicos a lo largo del tiempo se han estudiado diferentes formas para subdividir los embalses en función de sus características. Las clasificaciones más comunes son las siguientes:

Según características tróficas: eutrófico, mesotrófico, oligotrófico definidos de menor a mayor disponibilidad de nutrientes y, por lo tanto, masa fitoplanctónica.

Según periodos de estratificación: amícticos o meromícticos, aquellos que no presentan procesos de mezcla, monomícticos, los que presentan un proceso de mezcla anual y polimícticos los que muestran varios procesos de mezcla vertical al año.

Además existen otros aspectos que permiten caracterizar y definir un embalse: las particularidades de los tributarios; su latitud y altitud; sus características morfométricas (ancho, largo, geometría,...); las características geométricas de la presa (cota de extracción,

operación de la presa, variación de la cota del embalse,...); los usos del embalse (recreativo, hidroeléctrico, abastecimiento,...); la importancia del aporte sólido (sedimentos en suspensión o transporte de fondo) en la cola o las laderas del embalse... Todo ello hace que cada uno sea único y por lo tanto el funcionamiento hidráulico y limnológico de éste sea función de gran cantidad de variables. En definitiva, cada embalse es un caso particular de estudio.

Con el objetivo de estudiar dos casos de embalses con funcionamiento diferenciado se eligieron el embalse de Ribarroja (río Ebro) y el embalse de Sau (río Ter). A lo largo de los capítulos 3 a 6 ambos embalses se analizan de forma paralela, se nombran “Caso 1” y “Caso 2” respectivamente y se comparan en el apartado de discusión y comentarios de cada capítulo excepto en el caso del capítulo 7, en que solamente se modeliza en 3D la zona de la cola del embalse de Ribarroja de Ebro.

3.2.2 Embalse largo y estrecho, poca variación de nivel

El embalse de Ribarroja, situado en el curso medio-bajo del río Ebro, es un ejemplo claro de esta tipología de embalses. En el apartado 3.3 se describen sus principales características.

El embalse de Ribarroja forma parte del sistema de embalses Mequinenza-Ribarroja-Flix. Sufre una importante regulación aguas arriba, por lo que tiene poca variación de niveles a lo largo del año (cota media de 69.5 m aproximadamente, con variaciones de ± 1 m).

En la cola del embalse de Ribarroja entran dos flujos de características hidrológicas y de calidad del agua muy diferentes: por un lado el propio Ebro, como se ha dicho, tiene gran cantidad de presas que retienen un alto porcentaje del sedimento transportado, y por otro el Segre que llega con una carga importante de sedimentos en suspensión.

Además es de destacar la presencia del mejillón cebra (*Dreissena Polymorpha*), que causa serios problemas en la gestión del embalse.

3.2.3 Embalse de geometría irregular, variaciones de nivel importantes

Un ejemplo de este caso se presenta en el apartado 3.4 con el “Caso 2” estudio del embalse de Sau situado en el río Ter.

El embalse de Sau sufre importantes variaciones de nivel a lo largo del tiempo. Su geometría es muy irregular debido al relieve circundante, presentado una cola mucho más estrecha que las proximidades de la cerrada.

En relación a su gestión, una de las características más relevantes del embalse de Sau es la existencia de una torre de toma, que permite gestionar la toma selectiva de agua a diferentes profundidades. Esta torre le confiere al embalse de Sau una importante flexibilidad de operación para proporcionar las características de calidad del agua que interesen en cada momento (Ordóñez, 2010; Thornton *et al.*, 1990).

3.3 CASO 1: EMBALSE DE RIBARROJA DE EBRO (RÍO EBRO)

3.3.1 Zona de estudio

La Cuenca del Ebro se sitúa en el cuadrante NE de la Península Ibérica y ocupa una superficie total de 85.362 Km², de los que 445 Km² pertenecen a Andorra, 502 Km² a Francia y el resto a España (Prats, 2011). Es la cuenca hidrográfica más extensa de España, representando el 17.3 % del territorio peninsular español. Sus límites naturales son: por el norte la cordillera Cantábrica y los Pirineos, por el sur-oeste el Sistema Ibérico y por el este la cadena Costero-Catalana. La longitud del Ebro es de 910 km y discurre en sentido NO-SE, desde su origen en la cordillera Cantábrica hasta el Mediterráneo, donde desemboca formando un delta. El Ebro es uno de los ríos más caudalosos de la Península Ibérica, su caudal medio anual en la estación de aforo de la Confederación Hidrográfica del Ebro de Tortosa (cerca de la desembocadura) fue de unos 300 m³/s en durante el periodo 2000-2006 (Prats, 2011).

El área de estudio correspondiente al Caso 1 se centra en el embalse de Ribarroja de Ebro y su afluente en cola (ver Figura 7), el río Segre unido con el Cinca unos kilómetros aguas arriba.



Figura 7. Sistema de embalses Mequinensa - Ribarroja - Flix en el curso medio bajo del río Ebro. Fuente: ICC, imagen de satélite 1:250.000 (25m/píxel), modificado por la autora.

En esta zona, del curso medio-bajo del río Ebro, el comportamiento del río puede ser considerado típico de un río de la vertiente mediterránea, caracterizándose por su irregularidad hidrológica y meteorológica.

3.3.2 Embalse de Ribarroja

Los trabajos preliminares se iniciaron en 1958, con las obras de la nueva variante del ferrocarril, pero las obras del Salto de Ribarroja, propiamente dicho, se iniciaron en 1961 y terminaron en 1969 (E.N. Hidroeléctrica del Ribagorzana, 1973).

La presa de Ribarroja es de gravedad, planta recta, con perfil básico triangular. La longitud de coronación es de 562.40 m. El aliviadero de superficie es de perfil Creager deprimido, la longitud total es de 140.50 m y está formada por 7 vanos controlados con compuertas de 15.50 m de luz (E.N. Hidroeléctrica del Ribagorzana, 1973). La capacidad máxima de evacuación a la cota 70 es de 7756 m³/s. La presa también consta de cuatro tomas de agua para la central eléctrica a 41.4 m, tres desagües adicionales a la cota 40.0 m (para ampliar la capacidad de desagüe en avenida) y dos desagües de fondo a los 43.3 m (3 m de diámetro interior).

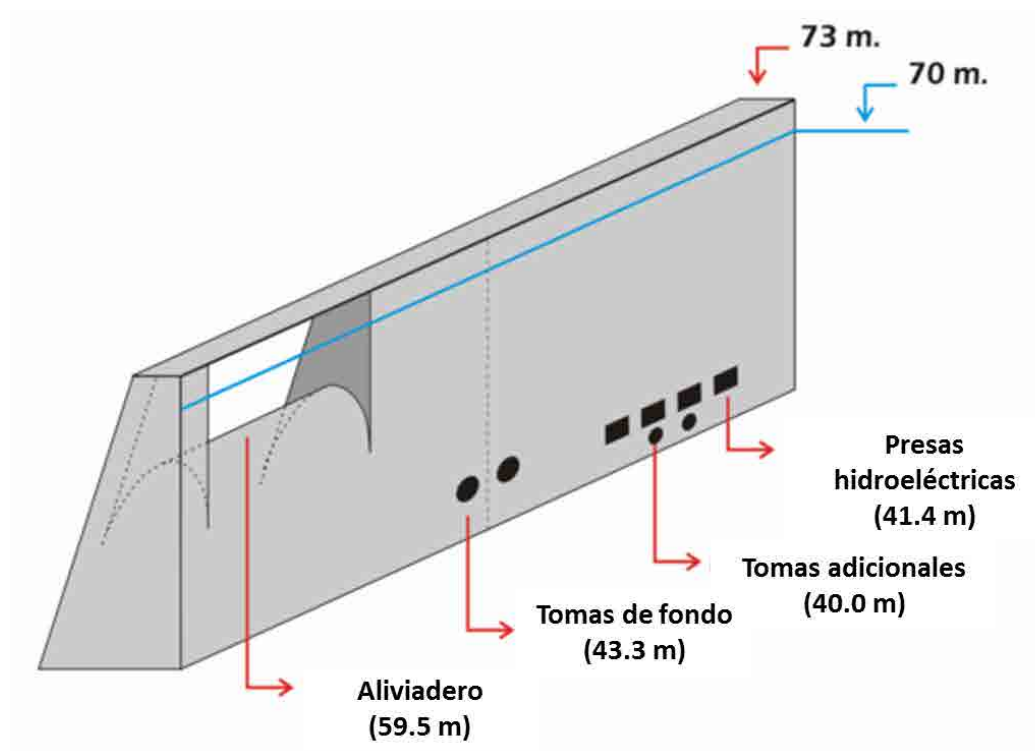


Figura 8. Esquema de la presa de Ribarroja. Autor: Óscar González modificado por la autora (Ó. González, 2007).

La cota máxima posible según la concesión es de 73 m aunque la cota máxima autorizada es de 70 m; la cota mínima es de 40 m aunque la cota mínima del embalse compatible con turbinado es de 60 m (E.N. Hidroeléctrica del Ribagorzana, 1973).

El tiempo de residencia puede variar desde unos pocos días, a menos de un mes (LIMNOS, 1996), lo que indica que sus condiciones serán similares a las de un río.

El embalse de Ribarroja es propiedad de ENDESA y su uso principal es la producción hidroeléctrica pero también son importantes la pesca, la navegación y el suministro de agua potable y de riego. La potencia total instalada es de 263 MW mediante cuatro grupos con capacidad de turbinado de 225 m³/s cada uno.

Los datos morfométricos que definen las características de capacidad volumétrica del embalse cubican el volumen en 210 Hm³ (E.N. Hidroeléctrica del Ribagorzana, 1973; Varela *et al.*, 1986) aunque en 2008 (Dolz *et al.*, 2009) se calculó que era considerablemente inferior (ver Anejo 4).

Variable	Valor
Latitud	41.96805
Longitud	2.41305
Altitud (m.s.n.m)	59.5
Máximo Volumen (hm ³)	210
Máxima área (ha)	2152
Máxima profundidad (m)	34
Profundidad media (m)	9.7
Máxima longitud (Km)	30
Tiempo de residencia (días)	de 5 a 7

Tabla 1. Principales características morfométricas e hidrológicas del embalse de Ribarroja de Ebro.

El estado trófico del embalse puede variar de un año a otro y tiene características que pueden ir de mesotróficas (LIMNOS, 1996) a eutróficas (InfraEco, 2006; URS, 2002).

A grandes rasgos, se ha notado que el embalse de Ribarroja presenta un único fenómeno de estratificación poco marcada en verano, de forma que las temperaturas en superficie pueden ser de 24-27 °C y, en profundidad, 18-21 °C (LIMNOS, 1996; URS, 2002). La termoclina se sitúa entre los 14-21 m de profundidad (LIMNOS, 1996; URS, 2002). En esta época del año, el agua que entra en el embalse de Ribarroja es más fría que el agua que proviene del Segre y del Cinca que también desembocan casi en el mismo lugar. Al ser más fría, el agua del Ebro, más densa, se hunde y el agua del Segre y Cinca queda en superficie (J. Armengol *et al.*, 2003). A mayor profundidad el agua puede estar en estado anóxico (InfraEco, 2006; LIMNOS, 1996). En invierno, las temperaturas son uniformes en profundidad, con valores mínimos alrededor de los 11 °C (InfraEco, 2006). Algunos de los trabajos realizados han mostrado que las diferencias entre las características de las dos entradas condicionan directamente el comportamiento hidrodinámico del embalse en cabecera (J. Armengol *et al.*, 2003; Navarro *et al.*, 2006).

3.3.3 Geología/Topografía

La geología de la zona pertenece al Oligoceno (ver Figura 10, colores amarillos) en la cerrada, se encuentra un conjunto alternante de capas de areniscas y margas de poca potencia (0.50 m a 3 m de grosor), que se presentan horizontales en la dirección del río con un ligero buzamiento de 2° a 5° hacia el estribo derecho.

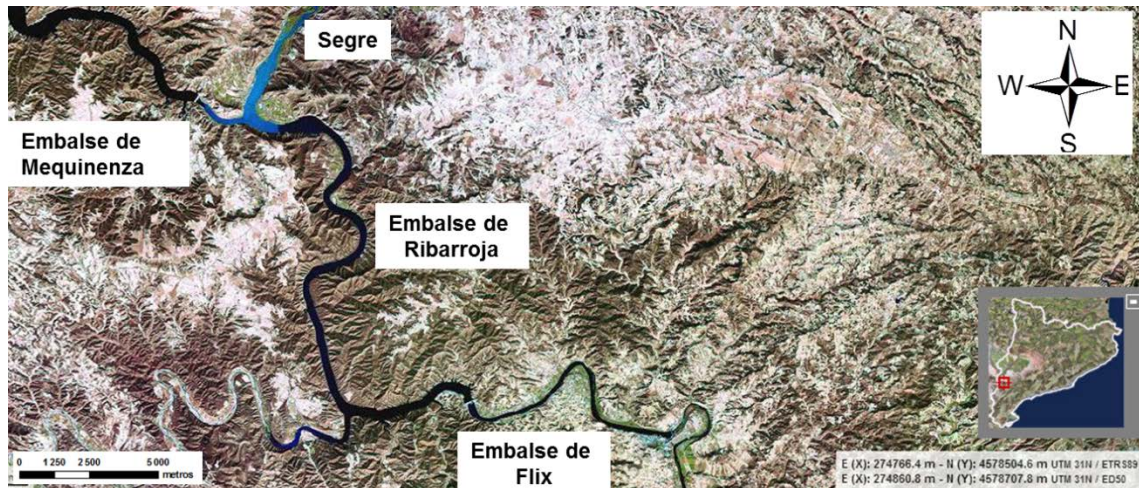
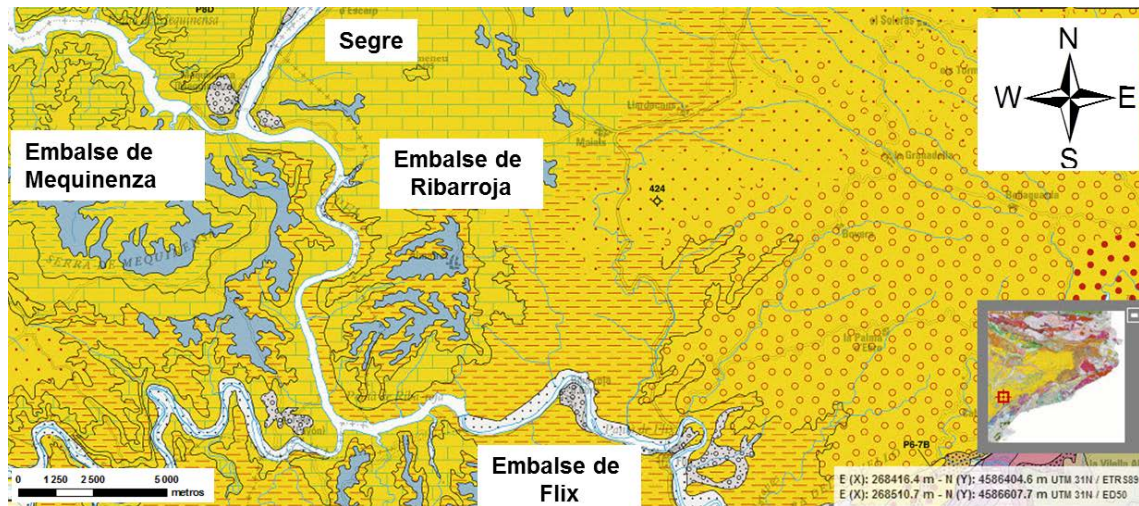


Figura 9. Imagen de satélite de la zona de estudio. Fuente: ICC, Imagen de satélite 1:250.000 (25 m/píxel).



CENOZOICO
Paleógeno



Figura 10. Geología de la zona de estudio. Fuente: ICC-IGC, Imagen de satélite 1:250.000.

Se pueden apreciar depósitos de yeso fibroso (de hasta 10 cm) de segunda formación. En la zona de la cola del embalse se encuentra un horizonte de lignito, alternado con margas, calizas y areniscas (E.N. Hidroeléctrica del Ribagorzana, 1973). El lecho del río está

constituido principalmente por arenas, gravas y roca madre de tipo arenisca. La pendiente es suave y el ancho varía entre los 50 y los 200 m (Prats, 2011). Geomorfológicamente se aprecian los meandros de la mitad superior, en la cola del embalse y destaca un tramo recto de unos diez kilómetros para girar prácticamente 90 ° a unos cinco kilómetros antes de llegar a la presa de Ribarroja (Figura 9 y Figura 10).

Desde hace unas décadas la retención de sedimentos en las presas, así como la disminución de caudales de aporte al río han favorecido la regresión del Delta del Ebro (Guillén & Palanques, 1992; Ibáñez *et al.*, 1999, 1996; Rovira & Ibáñez, 2007). Una de las consecuencias más directas de la presencia de los embalses es la retención de sedimento aguas abajo (Batalla *et al.*, 2004; Roura, 2004; Varela *et al.*, 1986; Vericat & Batalla, 2005), según el estudio realizado por varios investigadores de Flumen en 2009, el embalse de Ribarroja retiene un 41 % de los sólidos en suspensión que llegan por el Segre y el Ebro (Dolz *et al.*, 2009).

3.3.4 Climatología

La zona de estudio sigue la variabilidad meteorológica e hidrológica de las zonas mediterráneas. En Val (2003) y Prats (2011) se puede encontrar información detallada de las características meteorológicas y evolución climática zona del sistema de embalses del curso bajo-medio del Ebro. En un futuro, se prevé que la Península Ibérica en general tenga aumentos de la temperatura del aire y una disminución de la precipitación, cosa que implicaría un descenso en los aportes de caudal (Iglesias *et al.*, 2005).

3.3.5 Hidrología

El embalse de Ribarroja recibe aportaciones de agua procedentes del embalse de Mequinenza y de los ríos Segre y Cinca, también en cola de embalse, con un aporte de caudales del orden de los 80-90 m³/s (CEMAS, 2006; InfraEco, 2006). Aguas abajo, a unos cinco kilómetros de la presa de Ribarroja también hay un afluente, el río Matarraña, con aportes de poca importancia (caudales medios del orden de los 1-3 m³/s).

El régimen hidrológico ha sido modificado y alterado debido a la regulación fluvial, especialmente debido a la proliferación de la construcción de embalses a partir de los años 60

(Batalla *et al.*, 2004; Vericat & Batalla, 2004) y los efectos de su gestión en respuesta a las necesidades hidroeléctricas donde, además de las variaciones cíclicas a lo largo de los días de la semana o día y noche (Prats-Rodríguez *et al.*, 2009; Val, 2003), en algunos casos, el caudal máximo diario puede fácilmente duplicar al mínimo, en algunos casos hasta lo cuadruplica (Val, 2003). También destacan los efectos de las variaciones de usos del suelo, como por ejemplo el riego (Ibáñez *et al.*, 1999, 1996), aguas arriba. Y finalmente se deben mencionar otros efectos debido a las variaciones en precipitación así como los efectos del cambio climático (Prats-Rodríguez *et al.*, 2009).

Prats comprueba que en los últimos años se ha producido una reducción del caudal medio anual, ya que para el periodo 1954-2003 este caudal era de unos 400 m³/s, mientras que para el periodo 200-2006 este valor se redujo a 300 m³/s (Prats, 2011; Prats-Rodríguez *et al.*, 2009).

El comportamiento térmico del río Ebro aguas abajo del embalse depende directamente del comportamiento térmico e hidrodinámico del embalse (Han *et al.*, 2000; Prats, 2011), puesto que Flix es un pequeño embalse que no influye mucho en el comportamiento térmico aguas abajo.

3.3.6 Antecedentes

Los embalses de la Cuenca del Ebro producen alteraciones importantes tanto en temperatura del agua (Ibáñez *et al.*, 1996; Prats, 2011; Val, 2003) como en transporte de sedimentos (Guillén & Palanques, 1992; Ibáñez *et al.*, 1996; Prats, 2011; Roura, 2004; Vericat & Batalla, 2004).

Margalef utilizó datos de la primera red de medida de la temperatura del agua de varios ríos españoles para realizar mapas del comportamiento de la evolución térmica entre enero y julio (Margalef, 1983). Posteriormente Alberto y Arrúe utilizaron datos entre 1972-1982 para estudiar el régimen térmico de los ríos del Ebro (Alberto & Arrúe, 1986; Arrúe & Alberto, 1986); notando los efectos diferenciados a lo largo del río y estableciendo las variaciones diarias.

El sistema de embalses formado por Mequinenza-Ribarroja-Flix es conocido gracias a los estudios encargados por la Confederación Hidrográfica del Ebro (InfraEco, 2006;

Infraestructura & Ecología (ingeniería y ciencia aplicada), 2003; Infraestructura & Ecología, 2003; LIMNOS, 1996; URS, 2002). El primer estudio referente a la alteración térmica de la zona realizado por investigadores de Flumen se publicó en 1994 (Dolz *et al.*, 1994). Los efectos del sistema de los tres embalses Mequinenza-Ribarroja-Flix han sido estudiados por varios autores desde entonces.

En verano de 2003 se analizó el sistema completo (J. Armengol *et al.*, 2003) con el objetivo de caracterizar limnológicamente los tres embalses (Agència Catalana de l'Aigua, 2003). Mediante estos estudios se pudo definir que la estratificación en Ribarroja es poco marcada en verano, las temperaturas en superficie están entre los 24-27 °C y entre los 18-21 °C en profundidad (LIMNOS, 1996; URS, 2002). También se notó que en verano el agua del Ebro es notablemente más fría que la del Segre, por lo que también más densa y tiende a hundirse (J. Armengol *et al.*, 2003; Navarro *et al.*, 2006). En invierno las temperaturas son uniformes en todo el perfil, con valores mínimos de 10-11 °C (InfraEco, 2006).

En Flumen se llevaron a cabo diferentes estudios de calidad del agua (Marcé *et al.*, 2009; Prats, 2011; Prats-Rodríguez *et al.*, 2011, 2009; Roura, 2004; Val, 2003), así como se han realizado (y se están realizando) varias tesinas de especialidad (Ò. González, 2007; Salgado, 2008) y tesis doctorales relacionadas con el estudio la propia hidrodinámica de los embalses del sistema (Prats, 2011; Roura, 2004; Val, 2003).

Se dispone de importantes series de datos meteorológicos y análisis del comportamiento térmico e hidrodinámico de los embalses para los periodos 1998-1999 (Val, 2003) y 2003-2005 (Prats, 2011). En Val (2003) se estudiaron las alteraciones térmicas producidas por el sistema de embalses, notando comportamiento diferenciado entre ellos, también se observó una reducción del rango diario de temperaturas aguas abajo del sistema. En Prats (2011) se analizó el efecto del transporte de calor a lo largo de un tramo más largo de río, los efectos de alteración/compensación de la refrigeración de central nuclear de Ascó (Prats-Rodríguez *et al.*, 2009), la evolución térmica e hidrodinámica entre 2003 y 2005 mediante el modelo unidimensional DYRESM (Antenucci & Imerito, 2000; Imerito, 2014), los efectos de las alteraciones en especies acuáticas como los macrófitos o el mejillón de río (Prats, 2011).

Más recientemente, además de analizar los comportamientos de los embalses, se empezó a trabajar en la modelización numérica de la hidrodinámica del embalse de Ribarroja en concreto. Los primeros trabajos de modelización numérica desarrollados por Flumen en el

entorno del embalse de Ribarroja (Arbat-Bofill *et al.*, 2009c; Ó. González, 2007; Salgado, 2008) fueron mediante la aplicación del modelo unidimensional DYRESM (Antenucci & Imerito, 2000; Imerito, 2014). En los resultados obtenidos en las primeras simulaciones se describe el comportamiento hidrodinámico del embalse a lo largo del año, la circulación diferenciada de los dos efluentes (especialmente en verano) y los efectos de la mezcla (Ò. González, 2007; Prats, 2011). Mediante este estudio unidimensional se puso de manifiesto el hecho de que Ribarroja no seguía el paradigma de lago a la hora de explicar el comportamiento del embalse y que tampoco se podía simular correctamente de manera unidimensional (Ò. González, 2007; Prats, 2011; Salgado, 2008) puesto que el embalse de Ribarroja es demasiado variable en su longitud. Después de estas comprobaciones se propuso estudiar el embalse con modelos bidimensionales, y se eligió el modelo de uso libre CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008) siendo el punto de inicio de la presente tesis doctoral.

En el primer trabajo realizado usando CE-QUAL-W2 v.3.5. (Cole & Wells, 2008) con los datos de Val (2003) se obtuvieron perfiles longitudinales de la evolución térmica del agua (Arbat-Bofill *et al.*, 2009d) que explicaban mejor el comportamiento a lo largo del embalse y sus características hidrodinámicas. Mediante la realización de la presente tesis junto con la colaboración en varios proyectos de investigación se han desarrollado modelos bidimensionales utilizando CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008) para el embalse de Ribarroja en concreto Arbat-Bofill (2008) o Arbat-Bofill *et al.* (2011b).

La dinámica sedimentaria del Ebro y la retención de sedimentos en sus embalses también ha generado interés, especialmente debido a la problemática ambiental y social que supone la regresión del Delta del Ebro (Batalla *et al.*, 2004; Vericat & Batalla, 2005, 2004). Roura (2004) estudió la incidencia del embalse de Mequinenza en el transporte de sedimentos en suspensión (Roura *et al.*, 2008); y en los últimos años se han realizado varios trabajos batimétricos, en los que la autora de esta tesis ha participado, para determinar la dinámica sedimentaria del embalse de Ribarroja (Arbat-Bofill *et al.*, 2010a; López *et al.*, 2012). En 2007 se realizó una batimetría completa del embalse de Ribarroja usando ecosondas multihaz de gran precisión (De Pourcq *et al.*, 2007; Flumen & Casanovas-Bergé Topógrafos Asociados, 2008) que fue complementada y comparada con la batimetría de cubicación de la presa realizada en los años sesenta (De Pourcq *et al.*, 2007). Un año después, en 2008, se realizaron una serie de perfiles de la zona de la cola del embalse, en la unión Ebro-Segre a fin de cubicar el volumen de sedimento aportado por el Segre y comprobar si había movimiento del sedimento en cola (Arbat-Bofill *et al.*, 2010a, 2009b; Dolz *et al.*, 2009). Todos estos estudios

han sido de gran utilidad en referencia a la determinación de la dinámica sedimentaria de Ribarroja de Ebro en cuanto a input de sedimentos al embalse, distribución espacial y retención debido a la presa (mayor detalle en el Anejo 4). Las cualidades físico-químicas del sedimento en suspensión de la zona de la confluencia también han sido estudiadas (Arbat-Bofill *et al.*, 2010a; Dolz *et al.*, 2009; López *et al.*, 2012) definiendo las características de los dos flujos de agua que entran al embalse.

Se han realizado varios estudios numéricos bidimensionales de la zona Ebro-Segre (ver Anejo 4) con el objetivo de estudiar tanto la hidrodinámica como su afectación al transporte y distribución de sedimentos (Arbat-Bofill *et al.*, 2011a, 2010c, 2010d, 2009a). Por este motivo en 2010 se realizó una batimetría de detalle de la zona del Segre (Bladé *et al.*, 2010) y se realizó un estudio de la hidrodinámica de la zona de la confluencia Ebro-Segre (Arbat-Bofill *et al.*, 2011a, 2010b, 2009a; Dolz *et al.*, 2010). En los últimos tiempos se han realizado otros estudios referentes a la modelación numérica de los sedimentos en suspensión de la confluencia Ebro-Segre, más centrados en la zona de Mequinenza (Rovira i Blanch, 2014).

Otro tema de interés de la zona del embalse de Ribarroja es la preocupante situación de la invasión del mejillón cebra (*Dreissena Polymorpha*), motivo por el cual se empezó a analizar el sistema de embalses (J. Armengol *et al.*, 2003; Navarro *et al.*, 2006). El mejillón cebra es un molusco de agua dulce de unos 2-3 cm en edad adulta, con una gran capacidad de dispersión y de colonización, favorecida actualmente por las actividades humanas. Originario del mar Caspio, su área de distribución se ha ido ampliando a diferentes países del hemisferio norte. Las principales vías de dispersión han sido prácticas como la navegación, los trasvases de agua a pequeña y gran escala, y la creación de canales y embalses (Agència Catalana de l'Aigua, 2014). La invasión de mejillón cebra conlleva, a parte la perturbación ecológica desestabilizando el medio, una pérdida de claridad del agua, disminuye la cantidad de oxígeno en el medio acuático y provoca importantes pérdidas económicas debido a los daños que provoca en infraestructuras hidráulicas. Las colonias de mejillón cebra obstruyen conducciones y favorecen la corrosión de los metales (Agència Catalana de l'Aigua, 2014; Pérez & Chica, 2006; Prats, 2011). El primer registro de una población consolidada de esta especie en España se produjo en el tramo bajo del río Ebro en el año 2001 y en 2006 ya se había extendido por otras sub-cuencas y había llegado también a la cabecera de la del Ebro, cosa que motivó la búsqueda de métodos para reducir las poblaciones del mejillón (Armengol *et al.*, 2006; CHE, 2006; Palau *et al.*, 2004, 2003; URS, 2007). En 2011 también se encontraron poblaciones de mejillón cebra en las cuencas internas catalanas, concretamente en el embalse

de la Baells (Agència Catalana de l'Aigua, 2014, 2007), dónde durante el muestreo de 2012 se verificó su gran expansión. Actualmente la problemática asociada a la aparición del mejillón cebra es especialmente crítica en Ribarroja y Flix debido a las obturaciones importantes en las obras hidráulicas (Agència Catalana de l'Aigua, 2014) y se han creado grupos de estudio multidisciplinares para hacer frente al problema tanto desde la administración (ACA o CHE), los grupos de investigación o la empresa privada (ENDESA). El diseño de un proyecto de erradicación de esta especie, ha sido el motivo impulsor de dicho estudio como herramienta inicial para poder decidir actuaciones. El conocimiento del funcionamiento hidráulico y el estado trófico ha sido objeto de estudio cuidadoso a fin de estudiar su influencia en las condiciones ambientales en las que el mejillón se reproduce.

3.4 CASO 2: EMBALSE DE SAU (RÍO TER)

3.4.1 Zona de Estudio

El embalse de Sau se encuentra en la comarca de Osona (Catalunya), en el río Ter (aguas abajo de la población de Roda de Ter) y fue construido en 1963 con dos fines básicos: 1) abastecer agua potable a la ciudades de Barcelona, Girona y parte de la Costa Brava; y 2) generar energía eléctrica. Sau es el primero de una cadena de tres embalses (Sau – Susqueda - El Pasteral) que se encuentran a lo largo del río Ter (Figura 11).

El río Ter tiene una longitud de 200 km y presenta variaciones de caudal considerables (correspondientes a los ríos mediterráneos, además de la influencia nival de los Pirineos); el caudal puede variar de 2 m³/s a valores menos frecuentes de 2000 m³/s, con una media de 18 m³/s (Armengol *et al.*, 1999, 1986; Marcé *et al.*, 2004; Vidal & Om, 1993).

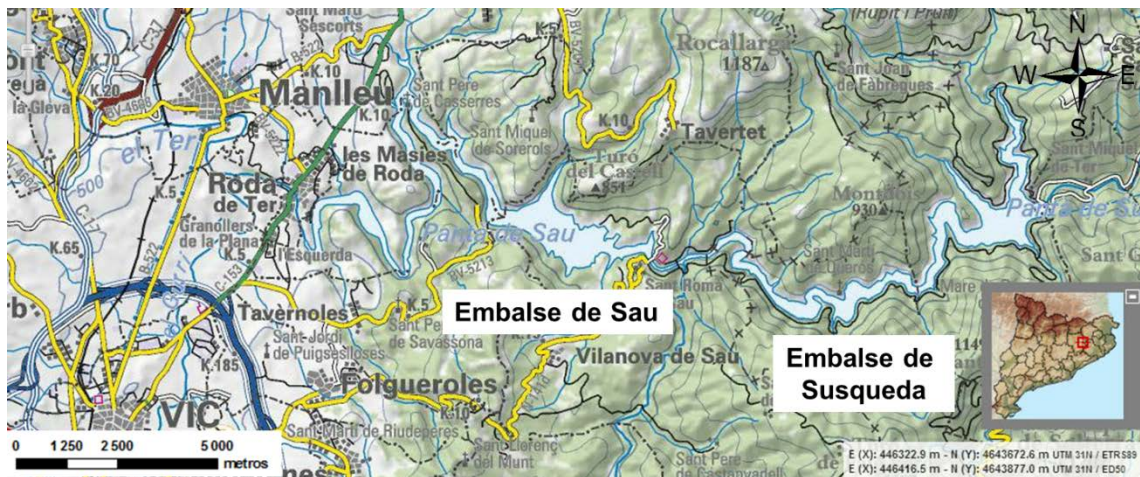


Figura 11. Sistema de embalses Sau - Susqueda . Fuente: ICC, Topográfico 1:250.000, modificado por la autora.

3.4.2 Embalse de Sau

El embalse de Sau tiene una longitud de unos 18 km y es de ancho variable (ancho máximo es de 1.3 km), su cuenca es de 1790 km² de área y la capacidad de embalse es de 177 hm³ (máximo volumen 168.5 hm³) y está a 424 m sobre el nivel del mar (Armengol *et al.*, 1999; Armengol, 2003; Ordóñez, 2010).

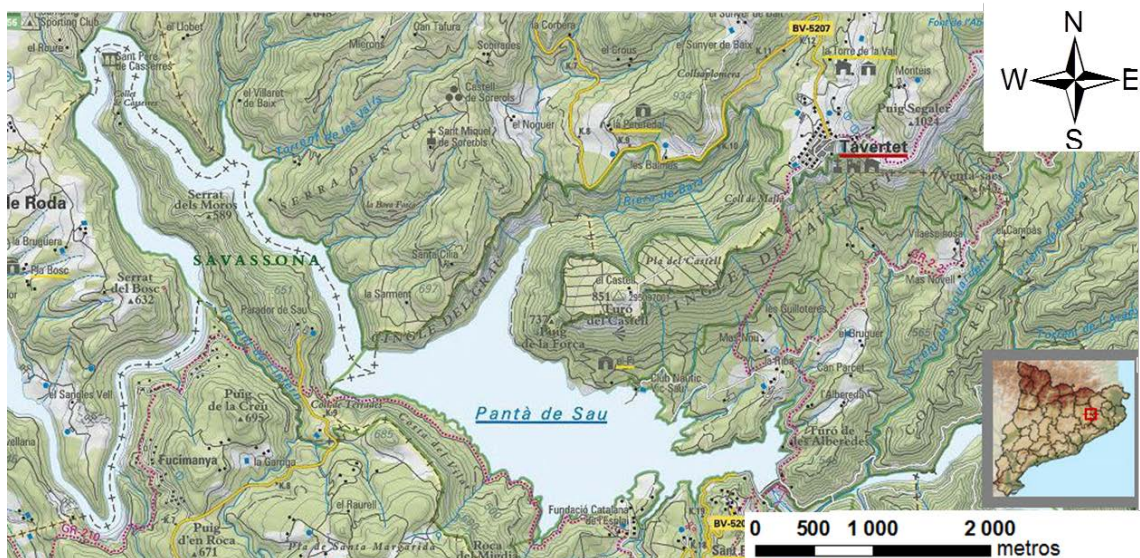


Figura 12. Embalse de Sau. Fuente: ICC, mapa topográfico 1:50.000, modificado por la autora.

Las principales características morfométricas del embalse de Sau (Agència Catalana de l'Aigua, 2003; Armengol, 2003; Han *et al.*, 2000) se muestran en la Tabla 2.

Variable	Valor
Localización	46°46'N 4°51'E
Altitud (m.s.n.m)	362
Máximo Volumen (hm ³)	168.5
Máxima área (hm ²)	5.8
Máxima profundidad (m)	65
Profundidad media (m)	25.2
Máxima longitud (Km)	18
Máxima Amplitud (Km)	1.3
Caudal medio río Ter (Hm ³ /año)	540.5
Tiempo de residencia (periodo 1997-2005, año)	0.26

Tabla 2. Principales características morfométricas e hidrológicas del embalse de Sau.

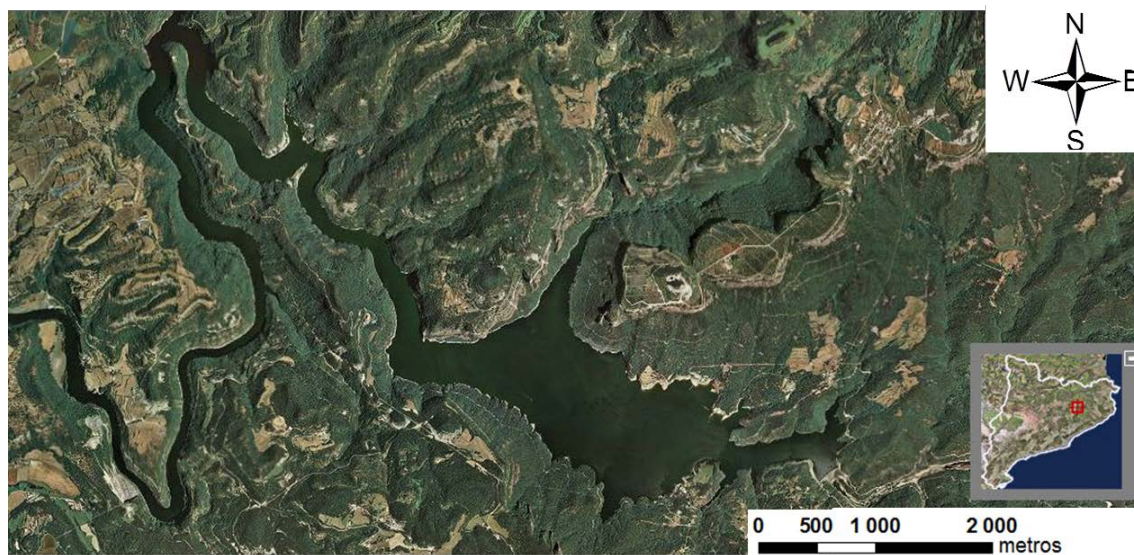


Figura 13. Embalse de Sau. Fuente: Fuente: ICC, ortofoto 1:50.000 (2.5 m/píxel).

El sistema de captación de agua en el embalse de Sau, consiste en una torre que se encuentra junto a la presa y que tiene tres compuertas de toma de agua, ubicadas a diferentes profundidades (ver esquema en Figura 14). La elección y operación de las compuertas se define en función de las características físico-químicas encontradas en la columna de agua.

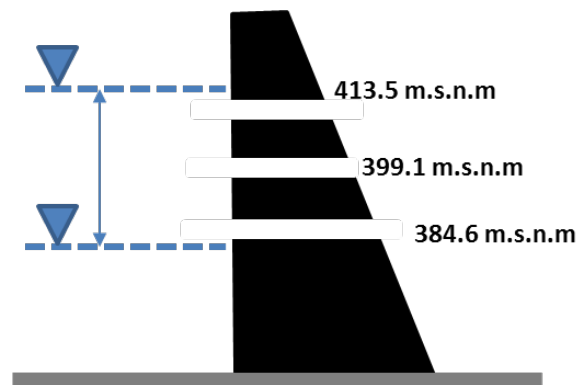


Figura 14. Esquema de las compuertas en el embalse de Sau y cotas de operación. Datos de ATLL-ACA, elaboración propia.

Tal y como lo describe Margalef (Margalef, 1983), y se esquematiza en (Thornton *et al.*, 1990) en un embalse existen tres zonas más o menos delimitadas; zona fluvial, zona de transición y zona lacustre, las cuales han sido ya explicadas y discutidas desde un punto de vista trófico en el embalse de Sau (Comerma *et al.*, 2001). Esta zonificación es importante, ya que describe el gradiente longitudinal de muchas de las variables que resultan importantes a la hora gestionarlo (Armengol *et al.*, 2005, 1999). Cada una de estas zonas varía en importancia y tamaño, dependiendo básicamente de la hidrología del río y de las características asociadas (temperatura del agua en función de la profundidad, el punto por el cual se hunde el río en el embalse o la carga de nutrientes y sedimentos que aporta el río al embalse).

3.4.2.1 Estructura térmica

El embalse de Sau, se mezcla una sola vez durante el año y por ello ha sido definido como monomítico cálido (Armengol *et al.*, 1999). Empieza a estratificarse entre comienzos y mediados de marzo aunque la variabilidad en el momento e intensidad de mezcla es considerable y se mezcla entre noviembre y diciembre, dependiendo de la ocurrencia o no de precipitaciones fuertes en forma de riadas y/o nevadas en el Pirineo (Armengol *et al.*, 1999). Además, la gestión puede afectar modificando la evolución del embalse en ciertos periodos de mezcla o estratificación (Thornton *et al.*, 1990). En los años con aportaciones de agua elevadas, la estabilidad térmica es claramente mayor que en el resto de los años. Sin embargo puede haber variaciones importantes entre años con tiempos de residencia o cambios importantes de volumen (Ordóñez, 2010).

3.4.2.2 Estado trófico

El estado trófico del embalse de Sau ha cambiado desde su construcción: en las primeras cuatro décadas el embalse sufrió un acelerado proceso de eutrofización, llegando a un estado hipereutrófico, este efecto queda reflejado por la evolución de las cargas de nitrógeno y fósforo entradas al embalse (Armengol *et al.*, 2006). A partir de los 90 se empezaron a instalar plantas de tratamiento de aguas residuales en los principales centros urbanos e industriales aguas arriba del embalse por lo que los aportes de nutrientes al embalse disminuyeron considerablemente (Armengol *et al.*, 1999, 1986; Marcé *et al.*, 2004; Vidal & Om, 1993). Actualmente el embalse de Sau varía entre los estados eutrófico y mesotrófico (Ordóñez, 2010).

3.4.3 Geología/Topografía

Sau se encuentra en un valle muy cerrado (Figura 15) y con laderas que pueden superar en 300 m el nivel del embalse. Estas condiciones hacen que tanto las temperaturas como el viento, dos variables con una fuerte incidencia en la distribución vertical de calor en Sau, dependan mucho de la orografía.



Figura 15. Imagen de satélite de la zona de estudio. Fuente: ICC, Imagen de satélite 1:250.000 (25 m/píxel).

El modelo digital del terreno para el embalse de Sau se calculó a partir de las curvas batimétricas proporcionadas por el CEDEX. Se dispuso de una batimetría realizada en 1979 y otra en 2001. Se comparó la curva cota-volumen de ambas batimetrías y se pudo observar que prácticamente no había habido variación importante de volumen debido a deposición de sedimento (Arbat-Bofill *et al.*, 2012). Por lo que para la modelización del embalse era

indiferente utilizar una u otra. Finalmente se detectaron una serie de errores en el modelo digital de 2001, por lo que se decidió trabajar con la batimetría 1979.

3.4.4 Climatología

El clima mediterráneo es, probablemente, el factor más condicionante de la hidrometeorología del río Ter y su cuenca, y, consecuentemente de las variaciones de volumen y cota del embalse. Esta variabilidad está sujeta en gran medida a factores que se encuentran ligados directa o indirectamente con las estaciones del año, con la meteorología local y de la cuenca y con las variaciones en los regímenes hidrológicos del río Ter (Armengol *et al.*, 2005; Ordóñez, 2010).

Se han realizado varios estudios sobre de la climatología y evolución meteorológica de Sau. Se dispone de estudios detallados correspondientes al periodo 1995-1999, y en especial, el año 1999, en que se analiza la respuesta hidrodinámica del embalse (Armengol *et al.*, 2005, 1999; Han *et al.*, 2000). Otros estudios centrados en la hidrodinámica del embalse corresponden a los periodos 1998-2002 (Armengol, 2003), 1999-2007 (Ordóñez, 2010) y análisis de las series de datos del año 2003 (Rueda *et al.*, 2006). Todos los estudios anteriores coinciden en destacar la variabilidad interanual debido a la climatología mediterránea y concluyen que la orografía define de manera importante la hidrodinámica debido a que se encuentra en un valle profundo y estrecho, generando una climatología local. Con tal de seguir estudiando la evolución anual del embalse desde mayo de 1997 se dispone de una estación meteorológica instalada en el Club Náutico de Sau, que permite obtener una serie de datos meteorológicos (velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad, radiación solar y lluvia) utilizados en los estudios de la ACA, ATLL y Flumen entre otros.

3.4.5 Hidrología

En el embalse de Sau se han observado periodos importantes en los que hubo episodios de sequía (que se han notado durante más de un año hidrológico seguido) y otros periodos en los que se han registrado avenidas y precipitaciones fuertes en la primavera u otoño (Armengol *et al.*, 1999; Ordóñez, 2010). Además, análogamente a la climatología, la hidrología también se ve fuertemente influenciada por la orografía y por la nieve que se acumula en los

Pirineos, que modifica el volumen y velocidad de su caudal, además de su temperatura (Vidal & Om, 1993).

Las fluctuaciones del caudal del río Ter, y por lo tanto del volumen almacenado en el embalse de Sau, son en gran parte reflejo del comportamiento pluviométrico variable, típico de la zona mediterránea (Ordóñez, 2010). Existe una tendencia a lo largo de toda la serie histórica, a la disminución en los aportes de agua (Ordóñez, 2010) y aunque no se conocen las causas reales de esta disminución algunos factores se han apuntado en Sau: el aumento de la evapotranspiración debido al incremento de la superficie forestal, la gran variabilidad en el régimen de nevadas en los Pirineos, los cambios en la frecuencia de lluvias, así como otros factores entre los que se incluye el efecto del cambio climático (Marcé *et al.*, 2009).

Estudios realizados para el embalse de Sau muestran alta fluctuación en cuanto a tiempos de residencia y la dependencia del mismo debido no únicamente a la hidrología sino también a la estructura térmica del embalse (Han *et al.*, 2000). El tiempo de residencia medio sufre cambios temporales en un rango de escalas, de estacional a casi diaria, asociada a la compleja interacción de los procesos de transporte que determinan el destino de las aguas del río en el embalse (Rueda *et al.*, 2006).

3.4.6 Antecedentes

Como ya se ha comentado el seguimiento del embalse de Sau se ha venido realizando desde el momento de su construcción en 1963. Las diferentes publicaciones citadas en los apartados anteriores así como las memorias Aigües Ter-Llobregat (ATLL) son un reflejo de esto.

Los periodos de estudio que se pueden encontrar descritos en la literatura son: 1995-1999 y detalle del año 1999 en que se analiza la respuesta hidrodinámica (Armengol *et al.*, 2005, 1999) y la respuesta en la estructura térmica del embalse (Armengol *et al.*, 2005; Han *et al.*, 2000); se tiene un análisis del balance térmico para el periodo 1998-2002 (Armengol, 2003); estudios del tiempo de residencia (Armengol *et al.*, 1999; Han *et al.*, 2000) y en mayor detalle para el año 2003 (Rueda *et al.*, 2006) así como su posterior análisis de variabilidad interanual en (Andradóttir *et al.*, 2012). Un análisis detallado de los datos limnológicos recogidos en el periodo 1998-2007 se recoge en la Tesis de J. Ordóñez "Limnología del embalse de Sau: Relaciones del zooplancton, la clorofila y los sólidos en suspensión con el

clima lumínico del agua” (Ordóñez, 2010), centrado en la descripción de patrones de variabilidad e interacción entre algunas de las variables más importantes (alcalinidad, sulfatos, cloruros, cationes alcalinos y alcalino-térreos y pH; concentraciones de fósforo, el nitrógeno (en sus diferentes formas), el hierro, el manganeso, la concentración de oxígeno disuelto y la temperatura, concentración de sólidos en suspensión y la transparencia del agua). También se han realizado estudios científicos centrados en diferentes parámetros meteorológicos (Vidal & Casamitjana, 2008), biológicos o fisicoquímicos del embalse de Sau para controlar la calidad del agua (Armengol *et al.*, 1986; Joan Armengol *et al.*, 2003; Comerma *et al.*, 2003, 2001; Prats-Rodríguez *et al.*, 2011; Vidal & Om, 1993). En 2011 se presentó una tesis doctoral, dirigida por X. Casamitjana, en que se hacía una simulación unidimensional del embalse de Sau utilizando el modelo DYRESM (Antenucci & Imerito, 2003; Imerito, 2014) acoplado con el CAEDYM (Hipsey, 2014) (simulaciones biológicas) para el periodo 200-2001 (Takkouk, 2011). Paralelamente a la investigación académica cabe destacar el seguimiento de la calidad de agua de embalses que se realiza desde la administración pública (Agència Catalana de l’Aigua) y la propia empresa gestora del embalse Aigües Ter-Llobregat cada año; los datos de calidad del agua se pueden consultar en las respectivas páginas web de las administraciones o en las memorias anuales (Agència Catalana de l’Aigua, 2003; Armengol *et al.*, 2005; ATLL, 2012).

3.5 CONCLUSIONES

Como se ha explicado a grandes rasgos en las características de cada uno de los dos casos de estudio, los dos embalses se parecen en algunas características pero difieren de manera importante en otras. Es interesante comparar el funcionamiento de dos embalses situados aproximadamente en la misma zona climática (con algunas diferencias debidas a la altitud o a la proximidad al mar) y con características tan diferentes como:

- **Morfología:** el embalse de Ribarroja es largo y estrecho (30 km de largo por 200 m de ancho) frente al embalse de Sau que tiene un ancho más variable (es más estrecho en el tramo superior y se ensancha en las proximidades de la presa). La profundidad máxima también es diferente, siendo el doble en Sau que en Ribarroja, y afecta en la estabilidad de la estratificación.

· **Hidrología:** Ribarroja tiene dos caudales de entrada muy diferenciados – los ríos Ebro y Segre - de características singulares (temperatura y sedimento) y variables a lo largo del año (complicando la hidrodinámica de la zona de la cola) mientras que en Sau el aporte principal es el río Ter. Aunque ambos embalses siguen el comportamiento mediterráneo Sau se encuentra en una zona más montañosa y a más altitud que el embalse de Ribarroja. Sau no tiene ningún embalse aguas arriba y en cambio el Ebro se encuentra altamente regulado, inmediatamente aguas arriba del embalse de Ribarroja se encuentra el embalse de Mequinenza.

· **Transporte de sedimentos:** aporte importante de sedimentos en suspensión en el caso de Ribarroja (por el Segre) mientras que en el caso de Sau no es una problemática importante.

· **Variaciones importantes de nivel** en Sau frente a la regularidad de los niveles en el embalse de Ribarroja.

· **Funcionamiento de la presa:** Cotas de extracción variables en el caso de la presa de Sau versus cota única en Ribarroja.

· Las **necesidades de abastecimiento** también pueden diferir entre los dos embalses de estudio, en función de la operación por parte de la empresa de gestión y debido a la demanda.

· **Especies invasoras:** entre otras, se destaca la importancia y la afectación de la presencia del mejillón cebra en el embalse de Ribarroja y sus proximidades. En el embalse de Sau no se ha detectado la presencia del molusco en cuestión.

En este trabajo se pondrán de manifiesto unas características hidrodinámicas que afectarán el comportamiento de las aguas de cada embalse y su posterior calidad condicionando a su vez la gestión del agua y sus usos principales, ya sean generación eléctrica o abastecimiento.

3.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA, 2003. Caracterització i propostes d'estudi dels embassaments catalans segons la Directiva 2000/60/CE del Parlament Europeu.

AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA, 2007. L'estat de la invasió de musclo zebra (*Dreissena polymorpha*) a Catalunya.

AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA, 2008. L'Aigua a Catalunya. Diagnosi i propostes d'actuació. Barcelona.

AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA, 2014. El musclo zebra. Estat de la presència a Catalunya - 2013.

ALBERTO, & ARRÚE, 1986. Anomalías térmicas en algunos tramos de la red hidrográfica del Ebro. An. la Estac. Exp. Aula Dei 18, 91–113.

ANDRADÓTTIR, RUEDA, ARMENGOL, & MARCÉ, 2012. Characterization of residence time variability in a managed monomictic reservoir. *Water Resour. Res.* 48, n/a–n/a. doi:10.1029/2012WR012069

ANTENUCCI, & IMERITO, 2000. The CWR Dynamic Reservoir Simulation Model DYRESM.

ANTENUCCI, & IMERITO, 2003. The CWR Dynamic Reservoir Simulation Model DYRESM. User Manual, Water Research. Perth.

ARBAT-BOFILL, 2008. Datos y Resultados de la modelización bidimensional de Riba-roja con CE-QUAL-W2. Barcelona.

ARBAT-BOFILL, BLADÉ, DE POURQ, SÁNCHEZ-JUNY, DOLZ, LÓPEZ, ARMENGOL, & JAIME, 2010a. Dinámica sedimentaria del extremo aguas arriba del embalse de Ribarroja (río Ebro), in: *Dam Maintenance and Rehabilitation II*. Zaragoza.

ARBAT-BOFILL, BLADÉ, & DOLZ, 2009a. Estudio en modelo numérico de la hidrodinámica del Segre en el entorno de Mequinenza. Memoria. Barcelona.

ARBAT-BOFILL, BLADÉ, SÁNCHEZ-JUNY, & DOLZ, 2010b. Estudio en modelo numérico de la hidrodinámica del Segre en el entorno de Mequinenza. Anejo II: el modelo CARPA. Barcelona.

ARBAT-BOFILL, BLADÉ, SÁNCHEZ-JUNY, DOLZ, COBOS CAMPOS, & POLANCO, 2011a. Study of solid transport digital model in Segre river suspension in the Ribarroja de Ebro reservoir tail end, in: *2nd International Congress on Dam Maintenance and Rehabilitation*. pp. 633–641.

ARBAT-BOFILL, BLADÉ, SÁNCHEZ-JUNY, DOLZ, COBOS, & POLANCO, 2010c. Estudio en modelo numérico del transporte sólido en suspensión del río Segre en la cola del embalse de Ribarroja de Ebro, in: Dam Maintenance and Rehabilitation II. Zaragoza.

ARBAT-BOFILL, BLADÉ, SÁNCHEZ-JUNY, & DOLZ RIPOLLÉS, 2010d. Estudio en modelo numérico de la hidrodinámica del Segre en el entorno de Mequinenza. Anejo G.

ARBAT-BOFILL, DE POURQ, & DOLZ, 2009b. Batimetría 2008. Barcelona.

ARBAT-BOFILL, GONZÁLEZ, SALGADO, SÁNCHEZ-JUNY, BLADÉ, & DOLZ, 2009c. Modelación unidimensional del Embalse de Ribarroja de Ebro con DYRESM, in: Jornadas de ingeniería del Agua. Madrid.

ARBAT-BOFILL, SÁNCHEZ-JUNY, & BLADÉ, 2011b. Introducción a la Modelización Numérica de Embalses, caso del embalse de Ribarroja de Ebro, in: Balairón, Dolz (Eds.), Actividad experimental de I+D+i en ingeniería hidráulica en España. Seminarios 2009. Editorial Universitat Politècnica de València, Madrid y Barcelona, p. 133.

ARBAT-BOFILL, SÁNCHEZ-JUNY, BLADÉ, & DOLZ, 2009d. Modelación bidimensional del Embalse de Ribarroja de Ebro con CE-QUAL-W2, in: Jornadas de Ingeniería del Agua, Madrid. p. 10.

ARBAT-BOFILL, SÁNCHEZ-JUNY, & DOLZ RIPOLLÉS, 2012. Estudi en model numèric de la hidrodinàmica de Sau. Barcelona.

ARMENGOL, 2003. Balanç tèrmic de l'embassament de Sau: Una aproximació basada en dades meteorològiques rutinàries. Universitat Politècnica de Catalunya.

ARMENGOL, J., BACARDIT, CAPUTO, GALLEGOS, & NAVARRO, 2003. Ecologia aquàtica dels embassaments de Mequinensa, Riba-roja i Flix. Estiu de 2003. Barcelona.

ARMENGOL, JOAN, CAPUTO, COMERMA, FEIJOÓ, GARCÍA, MARCÉ, NAVARRO, ORDOÑEZ, & ORDÓÑEZ, 2003. Sau reservoir's light climate: relationships between Secchi depth and light extinction coefficient. *Limnetica* 22, 195–210.

ARMENGOL, COMERMA, GARCÍA, ROMERO, RODRÍGUEZ, VALERO, & VIDAL, 2005. Quaderns ATLL - Contribució al coneixement de l'ecologia aquàtica de l'embassament de Sau (evolució de l'embassament al 1999).

ARMENGOL, CRESPO, MORGUI, & VIDAL, 1986. Phosphorus Budget and forms of phosphorus in the Sau reservoir sediment: an interpretation of the limnological record. *Hydrobiologia* 143, 331–336.

ARMENGOL, & DOLZ, 2004. La gestión a corto plazo del agua de los embalses, in: *II Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente*. pp. 875–889.

ARMENGOL, GARCÍA, COMERMA, ROMERO, DOLZ, ROURA, HAN, VIDAL, & SIMEK, 1999. Longitudinal processes in canyon type reservoirs: the case of Sau (NE Spain). *Theor. Reserv. Ecol. its Appl.* 313–345.

ARMENGOL, NAVARRO, SÁNCHEZ-JUNY, BUIL, & PALAU, 2006. La qualitat de l'aigua als embassaments: la seva gestió. *Qual. Ambient.* 254–260.

ARRÚE, & ALBERTO, 1986. El régimen térmico de las aguas superficiales de la Cuenca del Ebro. *An. la Estac. Exp. Aula Dei* 18, 31–50.

ATLL, 2012. Memòria d'activitats i responsabilitat corporativa d'Aigües Ter Llobregat. Declaració ambiental, Any 2011.

BATALLA, GÓMEZ, & KONDOLF, 2004. Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). *J. Hydrol.* 290, 117–136. doi:10.1016/j.jhydrol.2003.12.002

BLADÉ, ARBAT-, SÁNCHEZ-JUNY, DOLZ, COBOS, POLANCO, ARBAT-BOFILL, POURCQ, LÓPEZ, ARMENGOL, & JAIME, 2010. Dinámica sedimentaria del extremo aguas arriba del embalse de Ribarroja (río Ebro), in: *XXIV Congreso Latinoamericano de hidráulica*. IAHR, Punta del Este, Uruguay, p. 14.

CARLSON, 1977. A trophic state index for lakes1 22.

CEMAS, 2006. Control del estado de las masas de agua superficiales - Informe de situación Año 2005, Control.

CHE, 2006. Resumen de las actuaciones llevadas a cabo por la Confederación Hidrográfica del Ebro en la lucha contra el mejillón cebra. Zaragoza.

COLE, & WELLS, 2008. CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model. Version 3.6 User Manual, Version 3. ed. Water Quality Group - Portland State University, Portland.

COMERMA, GARCÍA, ARMENGOL, ROMERO, & SIMEK, 2001. Planktonic Food Web Structure along the Sau Reservoir (Spain) in summer 1997. *Hydrobiologia* 86, 195–209.

COMERMA, GARCÍA, ROMERO, ARMENGOL, & SIMEK, 2003. Carbon flow dynamics in the pelagic community of the Sau reservoir (Catalonia, NE Spain). *Hydrobiologia* 504, 87–98.

DE CEA, & SÁNCHEZ CABEZAS, 2007. Inventario de Presas Españolas de 2006 y síntesis de la actividad de construcción de presas en España en el trienio 2004-2006. *Rev. Obras Públicas* 93–104.

DE POURCQ, ARBAT, & DOLZ, 2007. Batimetría 2007. Documento interno Flumen. Barcelona.

DODSON, 2005. *Introduction to limnology*, 1st ed. McGrawHill Higher Education.

DOLZ, & ARMENGOL, 2012. Els recursos hídrics a Catalunya - Dades i conceptes bàsics.

DOLZ, ARMENGOL, ROURA, DE POURCQ, ARBAT-BOFILL, & LÓPEZ, 2009. Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja. Barcelona.

DOLZ, BLADÉ, & ARBAT-BOFILL, 2010. Estudio en modelo numérico de la hidrodinámica del Segre en el entorno de Mequinzenza. Estudio realizado por encargo de Ingenieria 75 y propuesto por la Confederación hidrográfica del Ebro.

DOLZ, PUERTAS, & HERRERO, 1994. Water temperature alteration downstream from a reservoir. The Ebro River case (Spain), in: 18th International Congress on Large Dams. Durban, pp. 211–216.

E.N. HIDROELÉCTRICA DEL RIBAGORZANA, 1973. El salto de Ribarroja. Publicaciones Reunidas, S.A.

ESTEVES, 1998. *Fundamentos de limnologia*. Interciencia, Rio de Janeiro, Brasil.

FLUMEN, & CASANOVAS-BERGÉ TOPÓGRAFOS ASOCIADOS, 2008. Memòria dels treballs realitzats a la Batimetria del Pantà de Ribarroja. Barcelona.

GONZÀLEZ, Ó., 2007. Modelització de la hidrodinàmica d'un embassament. Aplicació al cas de l'embassament de Riba-roja al riu Ebre. Universitat Politècnica de Catalunya.

GONZÀLEZ, Ò., 2007. Modelización de la hidrodinámica de un embalse. Aplicación al caso del embalse de Riba-roja en el río Ebro. Universitat Politècnica de Catalunya.

GUILLÉN, & PALANQUES, 1992. Sediment dynamics and hydrodynamics in the lower course of a river highly regulated by dams: the Ebro River. *Sedimentology* 39, 567–579. doi:10.1111/j.1365-3091.1992.tb02137.x

HAN, ARMENGOL, GARCÍA, COMERMA, ROURA, DOLZ, & STRASKRABA, 2000. The thermal structure of Sau Reservoir (NE: Spain): a simulation approach. *Ecol. Modell.* 125, 109–122. doi:10.1016/S0304-3800(99)00176-3

HIPSEY, 2014. Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model: CAEDYM v3, v3.3 User . ed. University of Western Australia.

IBÁÑEZ, PRAT, & CANICIO, 1996. Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro River and its estuary. *Regul. rivers Res. Manag.* 12, 51–62.

IBÁÑEZ, PRAT, CANICIO, & CURCÓ, 1999. El delta del Ebro, un sistema amenazado. Bilbao.

IGLESIAS, ESTRELA, & GALLART, 2005. Impactos sobre los recursos hídricos, in: Moreno (Ed.), *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático*. Ministerio del Medio Ambiente, Madrid, pp. 303–353.

IMERITO, 2014. DYNAMIC RESERVOIR SIMULATION MODEL: DYRESM v4, v4.0 User . ed. University of Western Australia.

INFRAECO, 2006. Ejecución de trabajos relacionados con los requisitos de la Directiva Marco (2000/60/CE) en el ámbito de la Confederación Hidrográfica del Ebro referidos a: elaboración del registro de zonas protegidas, determinación del potencial ecológico de los embalse.

INFRAESTRUCTURA & ECOLOGÍA, 2003. Seguimiento de la calidad de las aguas en embalses de zonas sensibles. Documento de síntesis. Zaragoza.

INFRAESTRUCTURA & ECOLOGÍA (INGENIERÍA Y CIENCIA APLICADA), 2003. Seguimiento de la calidad de las aguas en embalses de zonas sensibles. Embalse de Mequinenza.

LIMNOS, 1996. Diagnóstico y gestión ambiental de embalses en el ámbito de la cuenca hidrográfica del Ebro: embalse de Ribarroja.

LÓPEZ, DOLZ, ARBAT, ARMENGOL, & ARBAT-BOFILL, 2012. Physical and chemical characterisation of superficial sediment of the Ribarroja Reservoir (River Ebro, NE Spain). *Limnetica* 31, 321–334.

MARCÉ, ARMENGOL, & DOLZ, 2009. Els efectes als embassaments i la seva rellevància en la quantitat i la qualitat de l'aigua per a garantia del recurs, in: Agència Catalana de l'Aigua (Ed.), *Aigua i Canvi climàtic. Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya*. Nova Cultura de l'Aigua. pp. 221–228.

MARCÉ, COMERMA, GARCÍA, & ARMENGOL, 2004. A neuro-fuzzy modeling tool to estimate fluvial nutrient loads in watersheds under time-varying human impact. *Limnol. Oceanogr. Methods* 2, 342–355.

MARCÉ, COMERMA, GARCÍA, GOMÀ, & ARMENGOL, 2005. The zooplankton community in a small, hypertrophic mediterranean reservoir (Foix reservoir, NE Spain). *Limnetica* 24, 275–294.

MARGALEF, 1983. *Limnologia*. Barcelona.

NAVARRO, BACARDIT, CAPUTO, PALAU, & ARMENGOL, 2006. Limnological characterization and flow patterns of a three-coupled reservoir system and their influence on *Dreissena Polymorpha* populations and settlement during the stratification period. *Lake Reserv. Manag.* 22, 293–302.

NILSSON, REIDY, DYNESIUS, & REVENGA, 2005. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science* 308, 405–8. doi:10.1126/science.1107887

ORDÓÑEZ, 2010. *Limnología del embalse de Sau. Relaciones del zooplancton, la clorofila y los sólidos en suspensión con el clima lumínico del agua*. Universitat de Barcelona.

PALAU, BATALLA, ROSICO, MESEGUER, & VERICAT, 2004. Management of water level and design of flushing floods for environmental river maintenance downstream of the Riba-roja

reservoir (Lower Ebro River, NE Spain), in: HYDRO 2004 - A new era for Hydropower. Porto, Portugal.

PALAU, CÍA, FARGAS, BARDINA, & MASSUTI, 2003. Resultados preliminares sobre ecología básica y distribución del mejillón cebra en el embalse de Riba-roja (río Ebro). Lleida.

PÉREZ, & CHICA, 2006. Estimación de los costes económicos de la invasión del mejillón cebra (*Dreissena polymorpha*) en la Cuenca del Ebro. Zaragoza.

PRATS, 2011. El règim tèrmic del tram inferior de l'Ebre i les seues alteracions. Universitat Politècnica de Catalunya.

PRATS, VAL, ARMENGOL, & DOLZ, 2010. Temporal variability in the thermal regime of the lower Ebro River (Spain) and alteration due to anthropogenic factors. *J. Hydrol.* 387, 105–118. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.04.002

PRATS-RODRÍGUEZ, ARMENGOL, MARCÉ, SÁNCHEZ-JUNY, DOLZ RIPOLLÉS, DOLZ, & PRATS, 2011. Dams and Reservoirs in the Lower Ebro River and Its Effects on the River Thermal Cycle. *Ebro River Basin* 77–95. doi:10.1007/698

PRATS-RODRÍGUEZ, DOLZ, & ARMENGOL, 2009. Variabilidad temporal en el comportamiento hidráulico del curso inferior del río Ebro. *Ing. del agua* 16, 259–272.

ROURA, 2004. Incidència de l'embassament de Mequinensa en el transport de sòlids en suspensió i la qualitat del riu Ebre. Universitat Politècnica de Catalunya.

ROURA, ARMENGOL, JAIME, & DOLZ, 2008. Incidencia de los embalses Mequinensa y Ribarroja en el transporte sólido en suspensión del río Ebro. *Ing. del agua* 15, 221–229.

ROVIRA I BLANCH, 2014. Modelización numérica del transporte de sedimentos en suspensión. Aplicado a la cola del embalse de Ribarroja. Universitat Politècnica de Catalunya.

ROVIRA, & IBÁÑEZ, 2007. Sediment management options for the lower Ebro River and its delta. *J. Soils Sediments* 7, 285–295. doi:10.1065/jss2007.08.244

RUEDA, MORENO-OSTOS, & ARMENGOL, 2006. The residence time of river water in reservoirs. *Ecol. Modell.* 191, 260–274. doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.04.030

SALGADO, 2008. Optimización de parámetros del modelo hidrodinámico del embalse de Ribarroja en el embalse de Ribarroja en el río Ebro. Univesitat Politècnica de Catalunya.

TAKKOUK, 2011. Application of a hydrodynamic and water quality models to the Sau and Boadella Reservoirs. Universitat de Girona.

THORNTON, KIMMEL, & PAYNE, 1990. Reservoir Limnology: Ecological Perspectives.

URS, 2002. Asistencia técnica para la actualización limnológica de embalses. Embalse de Ribarroja.

URS, 2007. El mejillón cebra en la cuenca del Ebro. Zaragoza.

VAL, 2003. Incidencia de los embalses en el comportamiento térmico del río. Caso del sistema de embalses Mequinenza - Ribarroja - Flix en el río Ebro. Universitat Politècnica de Catalunya.

VARELA, GALLARDO, & LÓPEZ DE VELASCO, 1986. Retención de sólidos por los embalses de Mequinenza y Ribarroja. Efectos sobre los aportes al delta del Ebro, in: Hermes (Ed.), El sistema integrado del Ebro. M. Mariño, Madrid, pp. 203–219.

VERICAT, & BATALLA, 2004. Efectos de las presas en la dinámica fluvial del curso bajo del río Ebro. Cuaternario y Geomorfoogía 18, 37–50.

VERICAT, & BATALLA, 2005. Sediment transport in a highly regulated fluvial system during two consecutive floods (lower Ebro River, NE Iberian Peninsula). Earth Surf. Process. Landforms 30, 385–402. doi:10.1002/esp.1145

VIDAL, & CASAMITJANA, 2008. Forced resonant oscillations as a response to periodic winds in a stratified reservoir. J. Hydraul. Eng. 134, 416–425.

VIDAL, & OM, 1993. The eutrophication process in Sau reservoir (NE Spain): A long term study. Verh. Int. Verein Limnol. 25, 1247–1256.

Capítulo 4 INSTRUMENTACIÓN Y TRABAJO DE CAMPO

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta la instrumentación utilizada para estudiar el comportamiento hidrodinámico y térmico de los embalses de Ribarroja de Ebro (apartado 4.2) y Sau (apartado 4.3). Un aspecto muy importante de esta tesis ha sido el diseño, implementación y desarrollo del estudio experimental, así como el análisis de la información obtenida en cada campaña (Capítulo 5).

Para cada uno de los embalses se tienen diferentes periodos de estudio: Ribarroja de Ebro (de finales de 2007 a finales de 2010) y Sau (periodo de estratificación de 2011). En cada caso de estudio se sigue el siguiente esquema: inicialmente se describen los antecedentes, la localización de los puntos de medida, se realiza la descripción de la instrumentación instalada, sus características específicas y se definen los periodos de estudio (en función de la disponibilidad de datos). A posteriori se comenta brevemente la metodología de análisis y tratamiento de datos seguida.

El análisis detallado de los datos obtenidos y la información hidrodinámica que se extrae de los mismos se presenta y discute en el Capítulo 5.

4.2 CASO 1: EMBALSE DE RIBARROJA DE EBRO (RÍO EBRO)

4.2.1 Antecedentes de estudios del Instituto Flumen

La instrumentación instalada ha ido variando dependiendo de los proyectos que se han ido realizando en el Instituto Flumen. En la Figura 16 se muestran los puntos donde se ha ubicado la instrumentación de medida. Las características y los periodos de adquisición de datos se resumen en la Tabla 3. Esta información forma parte de la base de datos del Instituto Flumen.

En el marco del Instituto Flumen se han llevado a cabo diferentes estudios de calidad del agua de los embalses del Ebro (Marcé *et al.*, 2005; Prats *et al.*, 2010; Prats-Rodríguez *et al.*, 2011); también se han realizado diversas tesis doctorales relacionadas con la hidrodinámica y dinámica sedimentaria de la misma zona (Prats, 2011; Roura, 2004; Val, 2003).

El tramo de río Ebro estudiado en los trabajos mencionados es el que se encuentra comprendido entre Escatrón y Miravet. Se instalaron sensores de temperatura y de presión (para conocer el nivel del río) en Escatrón (entrada del Ebro al embalse de Mequinenza), a la salida de turbinas de la central hidroeléctrica de Mequinenza, en Aitona (aguas arriba de la entrada del Segre al embalse de Ribarroja), en Fraga (aguas arriba de la entrada del Cinca al embalse de Ribarroja), a la salida de turbinas de la central hidroeléctrica de Ribarroja, a la salida de turbinas de la central hidroeléctrica de Flix, justo antes de la toma de refrigeración de la central nuclear de Ascó (a 5.3 kilómetros aguas abajo de la central hidroeléctrica de Flix), en Pas de L'Ase situado a 6.6 kilómetros aguas abajo de la Central Nuclear Ascó (en Pas de L'Ase solo se midieron temperaturas) y en Miravet que se encuentra a 22 kilómetros aguas abajo de Pas de L'Ase.

En Escatrón, Ribarroja y Miravet se instalaron estaciones meteorológicas donde se midió temperatura del aire, radiación solar, radiación neta, humedad relativa, lluvia, velocidad y dirección del viento (Prats, 2011; Val, 2003).

En algunas estaciones de medida se empezó a disponer de información fiable en julio de 1997. La información de campo utilizada por Val (2003) abarca un periodo que se inicia el 1 de enero de 1998, excepto en Pas de L'Ase y Miravet que comienzan en abril y mayo de 1998.

El final del periodo se sitúa en el 31 de diciembre de 1999 para las estaciones situadas aguas arriba de la central hidroeléctrica de Flix y en el 31 de diciembre de 2000 para las estaciones aguas abajo de la central de Flix (incluida ésta).

Se dispone de un amplio y riguroso banco de datos de campo. En particular de temperaturas del agua del río Ebro (nueve estaciones), niveles del río (ocho estaciones) y datos meteorológicos (tres estaciones).

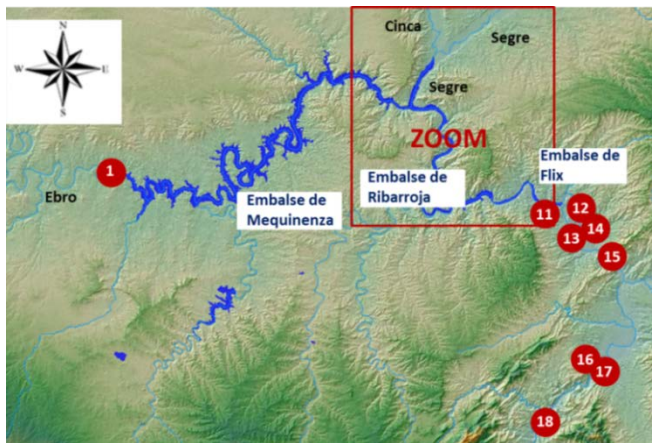


Figura 16. Puntos de medida del Instituto Flumen en el tramo final del río Ebro, desde aguas arriba del embalse de Mequinzenza hasta Xerta. Sistema de embalses Mequinzenza-Ribarroja-Flix y curso bajo del río Ebro.

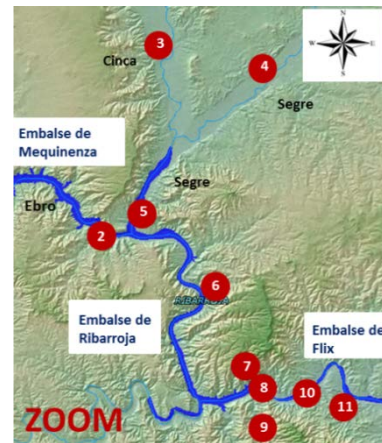


Figura 17. Zoom correspondiente al embalse de Ribarroja.

Además, a lo largo de la última década también se han realizado estudios de la evolución batimétrica (Dolz et al. 2009) y sedimentaria de Ribarroja (Arbat-Bofill *et al.*, 2009; De Pourcq *et al.*, 2007; Dolz *et al.*, 2009; López *et al.*, 2012; Roura, 2004), así como estudios basados en trabajo de campo y simulaciones numéricas (Arbat-Bofill *et al.* 2010; Bladé *et al.* 2010). Todo ello permite conocer la batimetría y su evolución con gran detalle y resolución. En el anejo 4 se detalla toda la información referente a este tema.

Punto	Estación	Inicio muestreo	Final muestreo	Variable/s de medida
1	Escatrón. Río Ebro entrada al embalse de Mequinenza	1997	2000	nivel, temperatura, estación meteorológica
2	Salida del embalse de Mequinenza	1997	2000	nivel y temperatura
		mayo de 2009	diciembre de 2010	nivel y temperatura
3	Fraga. Río Cinca	1997	2000	nivel y temperatura
4	Aitona. Río Cinca	1997	diciembre de 2010	nivel y temperatura
5	Puente Segre	mayo de 2009	diciembre de 2010	temperatura
6	Boya Almatret	mayo de 2009	diciembre de 2010	temperatura
7	Plataforma Flumen Ribarroja	2007	diciembre de 2010	parámetros de calidad del agua + estación meteorológica
8	Salida del embalse de Ribarroja	1997	2000	nivel, temperatura, estación meteorológica
9	Aguas abajo de la presa de Ribarroja	enero de 2009	2000	temperatura
10	Embalse de Flix junto a la estación de Bombeo	diciembre de 2008	julio de 2010	nivel y temperatura
11	Embalse de Flix junto a "Casa Curro"	febrero de 2009	julio de 2010	nivel y temperatura
12	Central de Flix	julio de 1996	enero de 2008	nivel y temperatura
13	Limnómetro Flix	diciembre de 2007	junio de 2010	nivel y temperatura
14	Central Nuclear Ascó	1997	julio de 2010	nivel y temperatura
15	Pas de l'Ase	1998	junio de 2010	nivel y temperatura
16	Estación meteorológica Miravet	1997	2008	estación meteorológica
17	Miravet río Ebro	1997	junio de 2008	nivel y temperatura
18	Xerta	febrero de 2007	julio de 2008	nivel y temperatura

Tabla 3. Detalle de los puntos de medida del Instituto Flumen en el tramo medio-final del río Ebro (sistema de embalses Mequinenza-Ribarroja-Flix, confluencia Ebro-Segre y aguas abajo del sistema de embalses).

4.2.2 Localización de los puntos de medida

Para el estudio térmico del embalse de Ribarroja, objeto de esta tesis, se instalaron los sensores de los puntos 2, 5, 6 y 7. Los datos de estos sensores son los que se utilizaron en la campaña 2009-2010 para controlar la evolución térmica del embalse de Ribarroja de Ebro (Figura 18).

En esta campaña se destaca la plataforma Flumen (punto 7) situada en las proximidades de la presa de Ribarroja y la cadena de termistores colgando de una boya (punto 6) situada delante del embarcadero de Almatret. El resto de instrumentación corresponde a sensores fijos de temperatura y nivel.

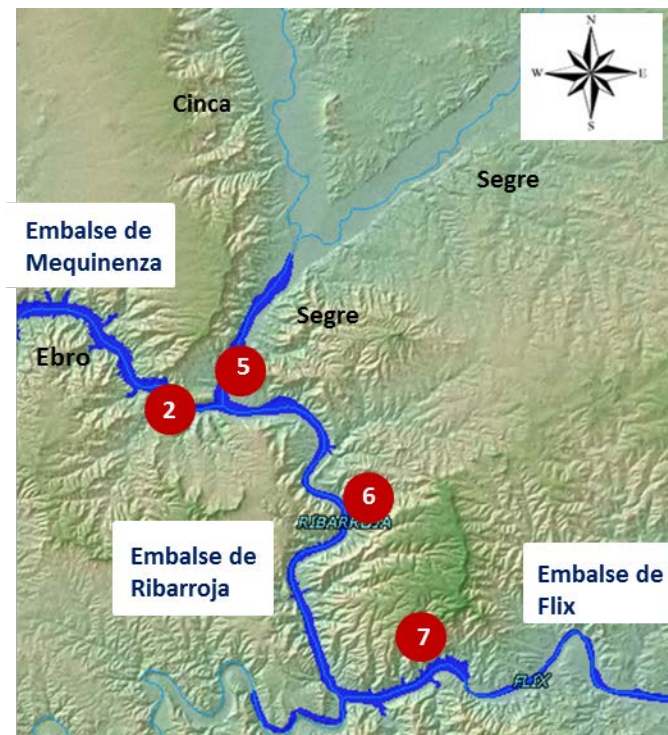


Figura 18. Localización de los puntos de medida en la campaña realizada en 2009-2010 para el estudio térmico del embalse de Ribarroja de Ebro: puntos de medida de temperatura (2 y 5), boya con cadena de termistores situada en Almatret (6) y Plataforma Flumen (7).

4.2.3 Descripción de la instrumentación

A continuación se describe la instrumentación específica instalada para el desarrollo de los trabajos de esta tesis.

4.2.3.1 Plataforma multiparamétrica del embalse de Ribarroja de Ebro

La plataforma flotante (Figura 19) se utilizó para medir las variables meteorológicas y de calidad del agua *in situ*; estuvo instalada en el embalse de Ribarroja de Ebro (en las proximidades de la presa, ver Figura 18) entre los años 2007 y 2010.

La estructura consistía en una plataforma (ver Figura 19) situada a unos 500 m aguas arriba de la presa de Ribarroja y en el centro del cauce. Se encontraba anclada en el fondo mediante dos lastres para impedir el giro sobre su propio eje. La plataforma constaba de dos partes claramente diferenciadas: la plataforma meteorológica emergida (estación meteorológica con una frecuencia de muestreo diezminutal) y la sonda multiparamétrica AANDERAA que se sumergía cada 6 horas para medir variables de calidad del agua.



Figura 19. Plataforma multiparamétrica Flumen; situada en el embalse de Ribarroja de Ebro.

Las variables meteorológicas que se midieron en la plataforma fueron: temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento (a dos alturas diferentes), radiación solar incidente, radiación solar reflejada, radiación neta y lluvia. Las características de los sensores meteorológicos se resumen en la Tabla 4.

Las variables de calidad del agua medidas por la sonda multiparamétrica fueron: velocidad y dirección del agua, temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto. La sonda disponía de un sensor de presión para controlar la profundidad a la que se encontraba. La sonda bajaba automáticamente cada 6 horas y paraba a tomar datos a varias profundidades (aproximadamente a 2, 4, 8, 12, 16 y 20 m de profundidad aunque para ciertos periodos de tiempo se variaron los puntos de muestreo).

Sensor/Instrumento	marca	modelo	parámetro que mide	muestreo
Datalogger	Campbell	CR1000		
Sensor de temperatura y humedad relativa	Vaisala	HMP45C	Temperatura y humedad relativa	muestrea cada segundo, almacena la media cada 10 minutos
Velocidad y dirección del viento	Young	05103-5	Velocidad y dirección del viento	muestrea cada 2 segundos, almacena la media cada 10 minutos
Pluviómetro	Campbell	ARG1000	Lluvia	cuando llueve
Radiación solar neta	REBS	Q-7	radiación neta	muestrea cada segundo, almacena la media cada 10 minutos
Radiación solar incidente/reflejada	Hukseflux	LP02	radiación	muestrea cada segundo, almacena la media cada 10 minutos
Sonda multiparamétrica	ANDERAA	RCM-9	varios sensores	cada 6 h (00:00, 06:00, 12:00, 18:00)
Sonda multiparamétrica	ANDERAA	3621	temperatura	cada 6 h (00:00, 06:00, 12:00, 18:00)
Sonda multiparamétrica	ANDERAA	3919	conductividad	cada 6 h (00:00, 06:00, 12:00, 18:00)
Sonda multiparamétrica	ANDERAA	3835	Oxígeno disuelto	cada 6 h (00:00, 06:00, 12:00, 18:00)
Sonda multiparamétrica	ANDERAA	3820	Velocidad y dirección del agua	cada 6 h (00:00, 06:00, 12:00, 18:00)
Sonda multiparamétrica	ANDERAA	3264	pH	cada 6 h (00:00, 06:00, 12:00, 18:00)
Sonda multiparamétrica	ANDERAA	4017	Presión	cada 6 h (00:00, 06:00, 12:00, 18:00)

Tabla 4. Características técnicas de los sensores (meteorológicos y de calidad del agua) instalados en la plataforma del embalse de Ribarroja de Ebro.

1. Datalogger: El datalogger utilizado en la parte emergida de la plataforma Flumen fue el CR1000 de Campbell Scientific. El modelo CR1000 se puede utilizar para una amplia gama de funciones de medición remota o control. Es un datalogger resistente para condiciones meteorológicas extremas.

2. Temperatura del aire y humedad relativa: El HMP45C es un instrumento robusto y preciso para medir la temperatura y la humedad relativa ideal para aplicaciones sin supervisión a largo plazo. La sonda utiliza un chip de polímero capacitivo para medir la humedad relativa y un sensor de presión para medir la temperatura. En casos en que el sensor HMP45C está expuesto a la radiación solar, como sucedía en el caso de la plataforma flotante) es necesario ponerlo dentro de una estructura (41003-5) para protegerlo de la radiación directa.

3. Sensores de viento 05103 de Campbell Scientific: velocidad y dirección del viento, toma una medida cada dos minutos y almacena la media diezminutal y la máxima. En la plataforma Flumen se disponía de dos sensores de viento, situados a diferente altura sobre la superficie del agua.

4. Pluviómetro Campbell ARG 100: pluviómetro de tipología balancín. Se ajustó en fábrica para vaciarse cada 0.2 mm de lluvia. Estos pluviómetros se basan en un interruptor que se cierra cada vez que el peso del agua acumulada hace bascular el balancín, lo que produce un pulso que puede ser registrado mediante el datalogger.

5. Radiación neta, Q-7 de Campbell: El radiómetro Q-7.1 registra la suma algebraica de la radiación que entra y la que sale (onda corta y onda larga). Las principales características de este sensor son: a) 60 terminales de baja resistencia eléctrica (4 ohm nominal), para disminuir el ruido. b) Respuesta espectral entre 0,25 hasta 60 μm . c) Las mediciones cada 30 segundos y se almacena la media diezminutal.

6. Piranómetro: Sensor Hukseflux P02, un piranómetro utilizado comúnmente en las observaciones meteorológicas de radiación solar. Mide la radiación solar recibida por una superficie plana de un campo de 180° de ángulo de visión (radiación solar "hemisférica"). La colocación y la orientación dependen de la aplicación requerida, en el caso de la plataforma Flumen se mide la radiación incidente y la radiación reflejada).

7. Sonda multiparamétrica AANDERAA: La sonda AANDERAA RCM 9 (<http://www.aanderaa.com/>) permite muestrear diferentes parámetros de calidad del agua y se puede sumergir a profundidades de hasta 100 metros. La unidad estructural mide 51.3 cm de longitud con un diámetro de 12.8 cm.



Figura 20. Sonda multiparamétrica AANDERAA RCM-9 instalada en la plataforma Flumen. Se pueden apreciar algunos de los sensores montados en la sonda.

La sonda habitualmente se dispone en posición vertical, aunque admite una inclinación de hasta 35 ° respecto la vertical. Se puede instalar fija o colgando de una boya, ya sea superficialmente o a mayor profundidad. El instrumento está instalado en una caja escudo que dispone de una base de amarre que permite una fácil instalación y retirada del instrumento sin el desmontaje de los sensores. El instrumento también puede ser utilizado para la lectura directa de los distintos parámetros o para el muestreo durante un tiempo definido, en que los datos se almacenan en la memoria interna del aparato. Los datos pueden ser almacenados internamente y descargarse después de la recuperación del instrumento o leídos en tiempo real en la cubierta. En el caso de la Plataforma Flumen los datos se almacenaban en un datalogger situado sobre la plataforma para ser mandados vía GSM posteriormente a la Universidad Politécnica de Cataluña.

La sonda multiparamétrica consta de diferentes compartimentos para los siguientes sensores:

a) Sensor de corriente Doppler: para registrar la velocidad de la corriente en las tres direcciones del espacio. Rango de la velocidad registrada 0-300 cm/s con una resolución 0.3 cm/s.

b) Hall Effect Compass: para medir la dirección respecto al norte de la corriente, con una resolución de 0.35 °.

c) Termistor: sensor para la medición de la temperatura. Con gamas seleccionables de rangos de temperatura según sea necesario. La gama estándar -2.70 a 21.77 °C, con una precisión de ± 0.05 °C y una resolución del 0,1% en el rango seleccionado, y un tiempo de respuesta de 12 segundos.

d) Sensor inductivo de conductividad: Rango 0 a 75 mS/cm, y una resolución estándar de 0.002 mS/cm.

e) Sensor de presión: Puente piezorresistivo, con un rango de medida entre 0 y 3500 kPa, y una resolución 0,1% dentro del rango del sensor. Se utiliza para conocer la profundidad de la sonda en la columna de agua.

f) Sensor de Turbidez (opcional): No utilizado e este estudio.

g) Sensor de oxígeno (opcional): Óptodo de oxígeno, rango 0.5 a 50 ppm, con un tiempo de respuesta de 60 segundos.

La sonda multiparamétrica dispone de un reloj de cuarzo integrado que permite calcular el tiempo entre medidas secuenciales. Típicamente, el Canal 1 de la sonda es una lectura de referencia fija para el control y la identificación de los datos. Los Canales 2 y 3 representan la medición de la velocidad y dirección de la corriente. La dirección se encuentra en el uso de las mediciones a lo largo de dos ejes ortogonales y su vinculación al norte real mediante el uso de una lectura de la brújula interna. La velocidad y la dirección de la corriente se promedian en el intervalo de medición. Los canales 4, 5 y 6 representan la temperatura, conductividad y presión, respectivamente. El resto de canales (del 7 al 10 son para otros sensores opcionales, como por ejemplo el pH, el oxígeno disuelto y la clorofila).

4.2.3.2 Boya situada en el embarcadero de Almatret

En mayo de 2009 se instaló una boya a la altura del embarcadero de Almatret (Figura 21), en el embalse de Ribarroja de Ebro para medir la temperatura del agua. De esta boya colgaba un cable *seaflex* (elástico para mantener la verticalidad con las variaciones de nivel del embalse) en el que se emplazaba una cadena de termistores a varias profundidades (2, 4, 8, 12 y 16 m aproximadamente).



Figura 21. Boya Flumen instalada en el embalse de Ribarroja de Ebro (años 2009-2010). La boya se situó delante del embarcadero de Almatret (Punto 7 de la Figura 18).

En la parte emergida de la boya se albergaba un *datalogger* para el almacenamiento de los datos registros. En particular el modelo usado fue el CR200 de Campbell. El CR200 es el *Datalogger* de menor costo de Campbell, su única terminal de configuración de canales de entrada y su embalaje son óptimos para la medición de sensores. La lectura de datos se realizaba cada 10 segundos, aunque se almacenaba la media de cada 10 minutos. Los datos se recibían remotamente al Instituto Flumen (UPC) mediante módem GSM, donde fueron depurados, tratados y analizados. En caso de no poder recibir los datos remotamente (fallos de cobertura) era necesario desplazarse hasta la boya y descargar los datos manualmente.

Por otro lado de la boya colgaba una cadena que sujetaba sensores de temperatura o termistores a 2, 4, 8, 12 y 16 m de profundidad. Los termistores fueron construidos expresamente por *Desin Instruments* (<http://www.desin.com/principal.asp>). Los sensores eran del modelo PT-100 SR-NXH-1/10 DIN 3 hilos. Para mayor seguridad de la medida se colocaron dos sensores a cada profundidad. Se pudo comprobar que para profundidades superiores a los 15 m los datos presentaban errores groseros y en otoño de 2009 los sensores empezaron a fallar progresivamente. Por este motivo entre el año 2009 y 2010 todos los sensores de temperatura fueron substituidos.

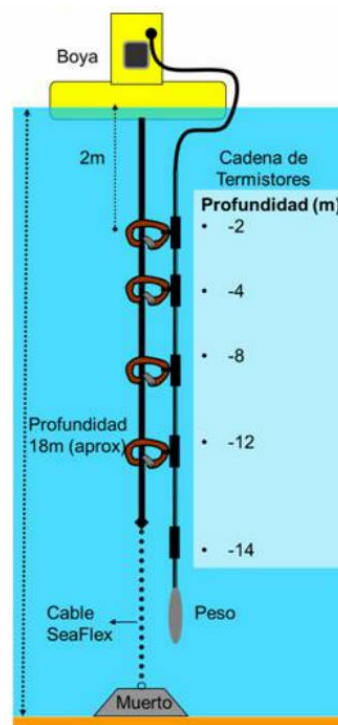


Figura 22. Esquema de montaje de la boya de termistores situada en Almatret. Diseño: Instituto Flumen UPC-CIMNE.

4.2.3.3 Otros sensores

Para captar la variabilidad térmica de los caudales en las dos entradas al embalse se instalaron dos sensores de temperatura: uno cercano a la salida de la presa de Mequinenza y el otro junto al puente de la población de Mequinenza que cruza el río Segre. En estos casos el modelo usado fue el HOBO U20-001. Estos sensores además de medir la temperatura, permiten registrar la presión barométrica y el nivel de agua con una alta precisión además de ser de fácil instalación y uso. No son caros ni difíciles de mantener; constan de una memoria interna que almacena series importantes de datos, por lo que se puede dejar el sensor in situ y recoger los datos al cabo de días o semanas.

4.2.3.4 Otras fuentes de datos

También se ha podido contar con datos meteorológicos de estaciones cercanas al embalse de Ribarroja de Ebro de la Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques (XEMA) y del servicio autonómico MeteoCat (<http://www.meteo.cat>).

Adicionalmente se ha dispuesto de las series de caudales medios diarios cedidos por la Confederación Hidrográfica del Ebro y ENDESA, además de los datos diarios de nivel del embalse proporcionados por ENDESA.

4.2.4 Análisis de los datos de Ribarroja (campana 2009-2010)

En el presente apartado se analiza la calidad de los datos medidos por los sensores instalados en el embalse de Ribarroja de Ebro. Se presentan dos años naturales con la serie de datos prácticamente completa: 2009 y 2010. En los apartados 4.2.4.1 y 4.2.4.2 se muestra la disponibilidad y calidad de los datos de los años 2009 y 2010 respectivamente; en el apartado 4.2.4.3 se presenta el análisis de los caudales medios diarios y niveles de agua para ambos años; finalmente, en el apartado 4.2.4.4 se define el periodo de estudio en función de la calidad y disponibilidad de los datos.

4.2.4.1 Datos de campo 2009

En la figura siguiente se muestra la disponibilidad y la calidad de las diferentes series de datos del año 2009.

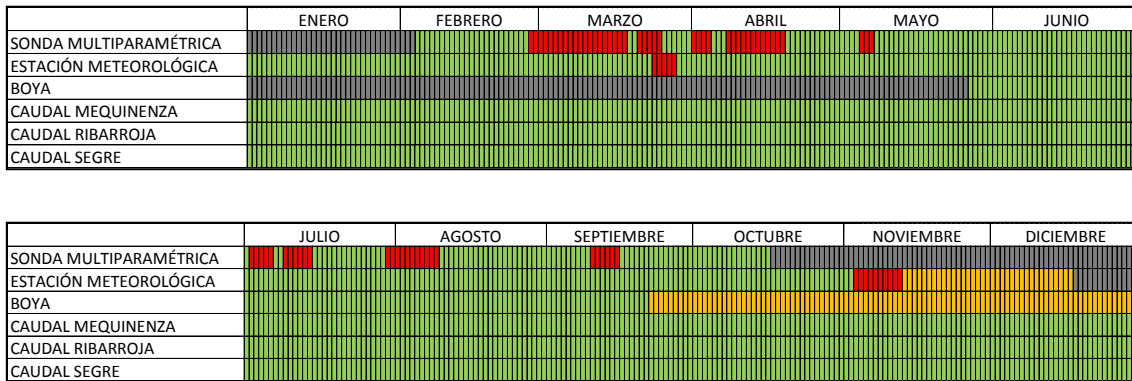


Figura 23. Disponibilidad de datos 2009. Verde: datos correctos. Naranja: disponibilidad de datos con ciertos errores que precisan de tratamiento. Rojo: existencia de datos con errores importantes. Gris: no existen datos.

4.2.4.1.1 Plataforma Flumen

Debido a tareas de mantenimiento de la sonda no se disponen de datos en los meses de invierno (mayoritariamente enero, segunda mitad de octubre, noviembre y diciembre). Se destaca una falta importante de datos en marzo y abril.

La instrumentación meteorológica de la plataforma funcionó aceptablemente bien hasta principios de octubre en que empezaron a registrarse errores.

4.2.4.1.2 Boya Flumen

La boya se instaló a finales de mayo de 2009, por lo que hasta el día del 27 de mayo de 2009 (día gregoriano 147) no hay datos de la cadena de termistores situada en Almatret (figura 24).

A finales de septiembre empezaron a registrarse errores en los datos por el mal funcionamiento de los termistores y el receptor, debido a causas meteorológicas y elevados caudales. Los termistores dejaron de funcionar uno a uno escalonadamente y a finales de año prácticamente no funcionaba ninguno. A pesar de ello se dispone de un buen registro de todo el periodo de estratificación del 2009.

4.2.4.2 Datos de campo 2010

En la figura siguiente se muestra la disponibilidad y la calidad de datos para el año 2010.

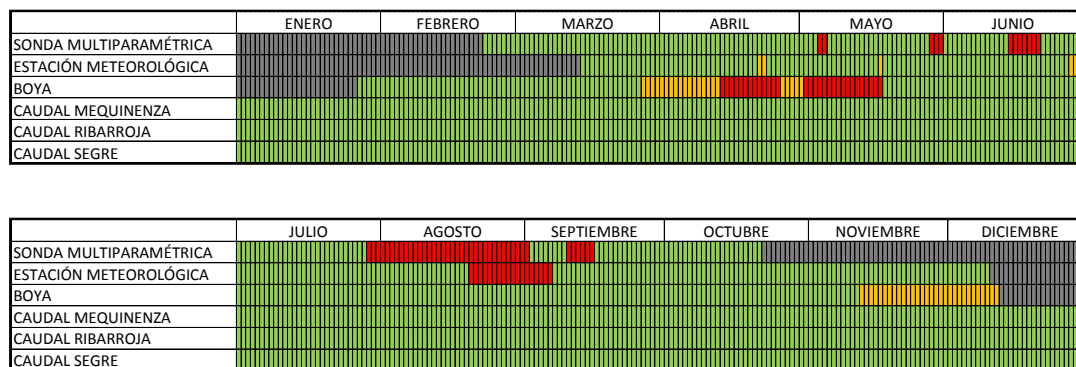


Figura 24. Disponibilidad de datos 2010. Verde: datos correctos. Naranja: disponibilidad de datos con ciertos errores que precisan de tratamiento. Rojo: existencia de datos con errores importantes. Gris: no existen datos.

4.2.4.2.1 Plataforma Flumen

Al igual que el año 2009 debido a tareas de mantenimiento de la sonda no se disponen de datos en los meses de invierno. En rojo se ha marcado los fallos de la sonda, por motivos técnicos, errores de software o de los propios sensores. Se destaca una falta importante de datos en agosto y mediados de septiembre.

La instrumentación meteorológica de la plataforma presenta falta de datos de finales de agosto a principios de septiembre pero funciona aceptablemente bien hasta principios de octubre en que se empezaron a registrar errores.

4.2.4.2.2 Boya Flumen

En invierno de 2009-10 empezaron a fallar termistores y fue necesario reemplazarlos. No se pudo reinstalar la cadena hasta mediados de abril de 2010. La falta de datos entre los días julianos 105 (15/04) y 145 (25/05) se debe a una avenida que estropeó el *datalogger*. El periodo de estratificación que engloba todo el verano está bien registrado y es de gran calidad (con datos cada 10 minutos). De nuevo, a mediados de noviembre se empezaron a registrar errores en los datos debido al mal funcionamiento de los termistores y del receptor. Gracias a un proceso de filtrado y depurado de errores se han podido conservar registros de temperatura a varias profundidades, disponiéndose de datos aceptables durante el periodo de estratificación del embalse.

4.2.4.3 Caudales de entrada/salida y nivel del embalse

Se dispone de los caudales medios diarios para los años 2009-2010, cedidos por la Confederación Hidrográfica del Ebro y ENDESA. Después de analizar los datos, se decidió trabajar con las medias diarias proporcionadas por ENDESA.

Se dispone también de la media diaria de cota de embalse para los años 2009 y 2010.

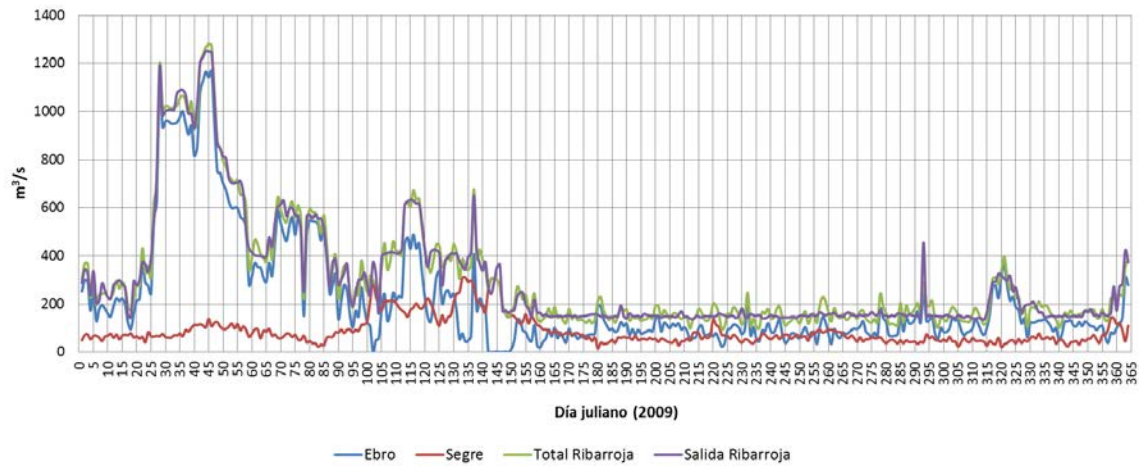


Figura 25 Caudales medios diarios de entrada/salida al embalse de Ribarroja de Ebro. Año 2009. Fuente: ENDESA.

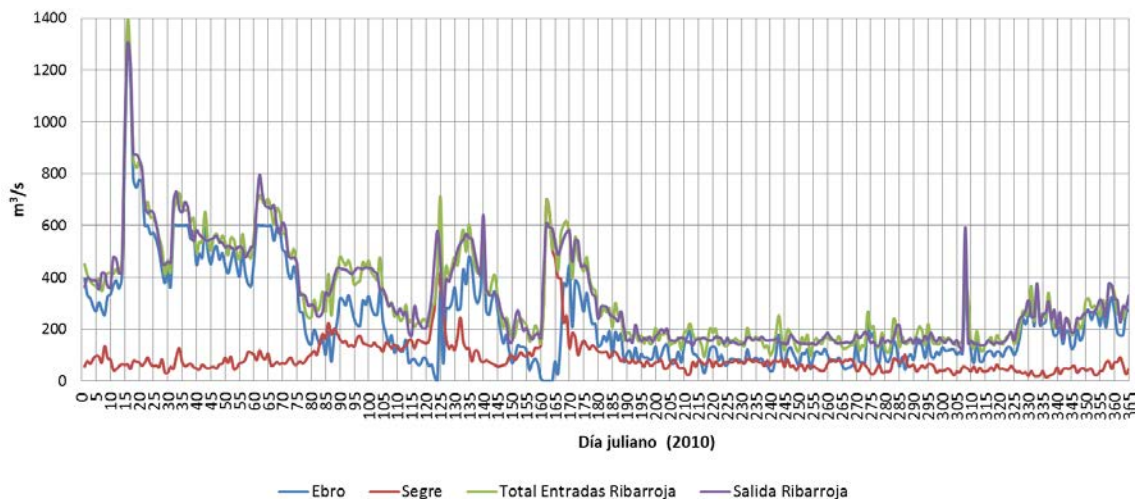


Figura 26 Caudales medios diarios de entrada/salida al embalse de Ribarroja de Ebro. Año 2010. Fuente: ENDESA.

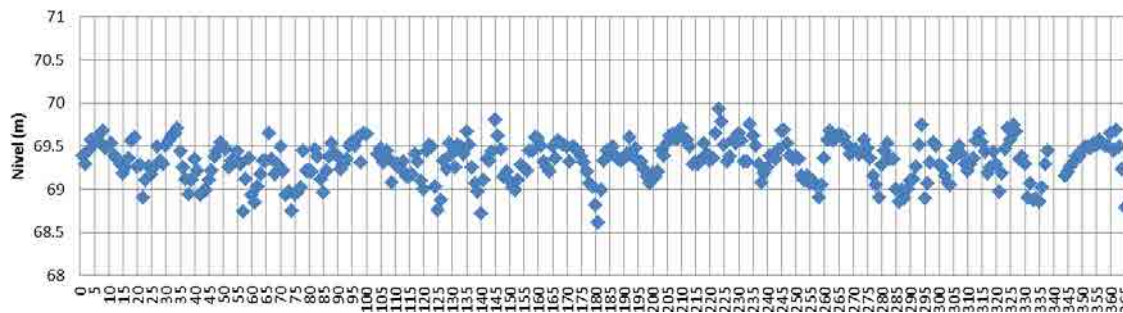


Figura 27 Niveles del embalse de Ribarroja de Ebro (año 2009). Fuente: ENDESA.

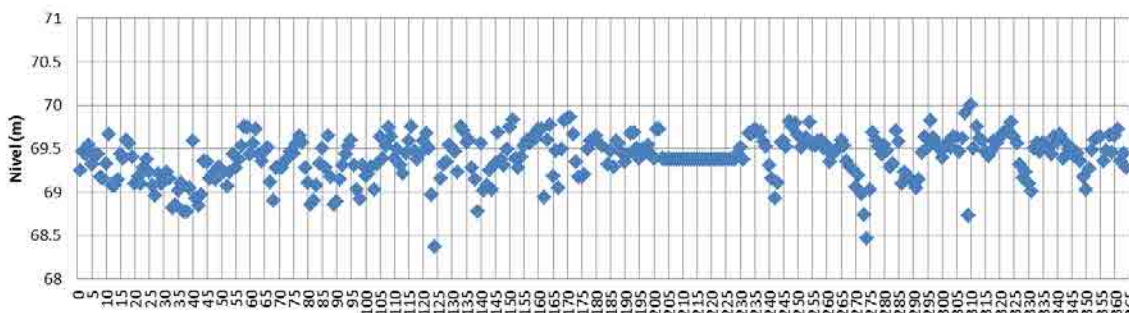


Figura 28 Niveles del embalse de Ribarroja de Ebro (año 2010). Fuente: ENDESA.

4.2.4.4 Definición de los periodos de estudio

Después de estudiar la disponibilidad y la calidad de los datos de los años 2009 y 2010 se procede a definir los periodos de estudio. Cabe resaltar que los meses con mayor relevancia son los que involucran la estratificación del embalse, es decir de primavera a otoño.

Así para facilitar la comparación entre los años 2009 y 2010 se analizará el mismo periodo de ambos años que comprende del día juliano 145 (25 de mayo) al 295 (22 de octubre).

La disponibilidad y calidad de los datos para 2009 se resume en la siguiente figura:

	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE
SONDA MULTIPARAMÉTRICA	Green	Red	Red	Red	Grey
ESTACIÓN METEOROLÓGICA	Green	Green	Green	Green	Green
BOYA	Green	Green	Green	Green	Yellow
CAUDAL MEQUINENZA	Green	Green	Green	Green	Green
CAUDAL RIBARROJA	Green	Green	Green	Green	Green
CAUDAL SEGRE	Green	Green	Green	Green	Green

Figura 29 Definición del periodo de estudio 2009 y disponibilidad/calidad de los datos. Naranja: disponibilidad de datos con ciertos errores que precisan de tratamiento. Rojo: existencia de datos con errores importantes. Gris: no existen datos.

La disponibilidad y calidad de los datos para 2010 se resume en la siguiente figura:

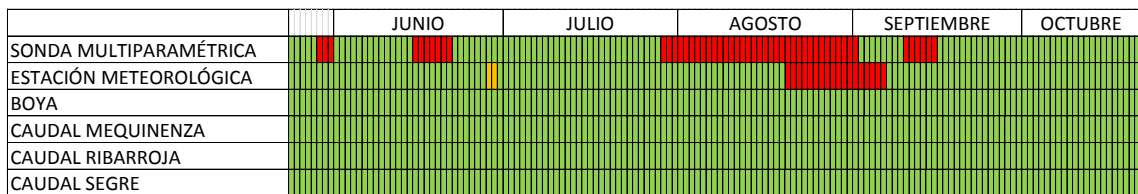


Figura 30. Definición del periodo de estudio 2010 y disponibilidad/calidad de los datos. Naranja: disponibilidad de datos con ciertos errores que precisan de tratamiento. Rojo: existencia de datos con errores importantes. Gris: no existen datos.

4.2.5 Otras fuentes de datos de campo

4.2.5.1 Vuelos ICC – Temperatura superficial del agua

Los días 31 de marzo (ICC, 2011a) y 11 de octubre de 2011 (ICC, 2011b), el Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC) llevó a cabo un conjunto de vuelos con los sensores hiperespectrales TASI y CASI en el embalse de Ribarroja previstos dentro de la colaboración con el grupo de investigación Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña. El dato más relevante para el desarrollo de esta tesis son las imágenes térmicas de la zona mediante el sensor hiperespectral TASI (ICC, 2011a, 2011b). Este sensor registra la energía electromagnética procedente del área observada en 32 bandas que comprenden el espectro térmico de la superficie del Tierra.

Durante el vuelo se adquirieron imágenes mediante el sensor TASI, con resolución espacial de 3 m x 3 m. La Figura 31 indica el área abarcada en cada una de las pasadas del vuelo de marzo. La Figura 32 muestra a modo de ejemplo el mosaico de radiancia registrada en la banda 9 del sensor (8.9 micrómetros de longitud de onda).



Figura 31. Área observada por el sensor TASI en las tres pasadas del vuelo.

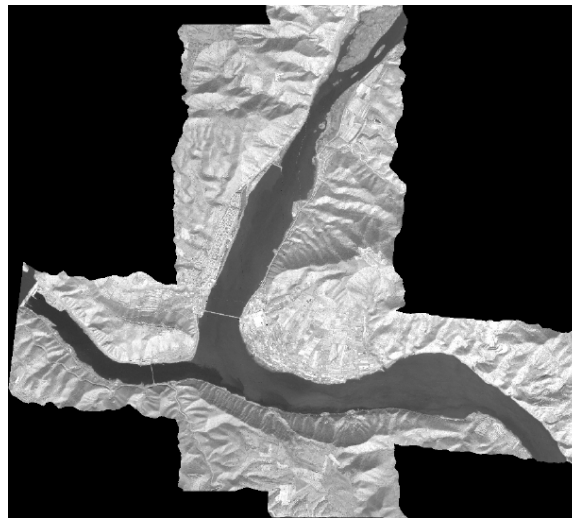


Figura 32. Radiancia registrada en la banda 9 del sensor TASI.

En la Figura 33 se muestra la imagen térmica superficial correspondiente al 31 marzo de 2011 (ICC, 2011a) y en la Figura 34 (ICC, 2011b) la correspondiente al 11 de octubre de 2011.

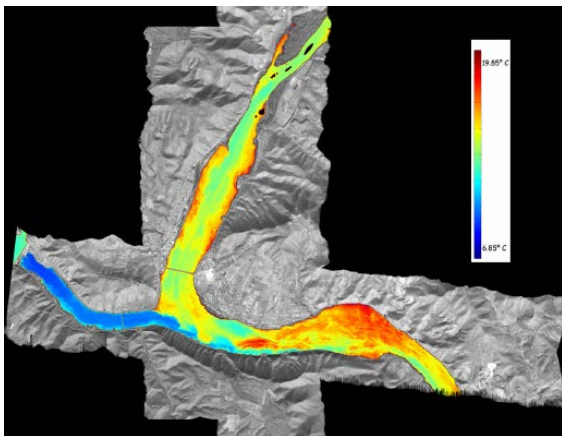


Figura 33. Imagen térmica superficial obtenida mediante el sensor TASI a 31 de marzo.

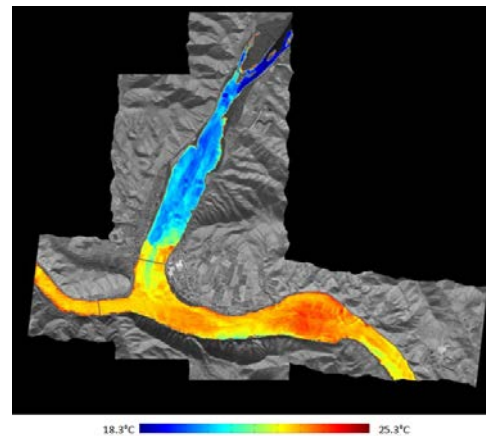


Figura 34. Imagen térmica superficial obtenida mediante el sensor TASI a 11 de octubre de 2011.

Para el cálculo de la temperatura superficial se utilizaron las imágenes radiométricamente calibradas y espectralmente alineadas. Para la determinación de la temperatura absoluta de la superficie del agua se utilizó el espectro térmico del agua dulce contenido en la librería ASTER 1.2 y la temperatura se calculó en cada píxel mediante el método Aster Opt, como el valor que minimiza la suma de las diferencias entre la radiación medida por el sensor TASI y la radiación teórica emitida según la ecuación de Plank y generada por la atmósfera (Prats *et al.*, 2013).

Para la validación de la temperatura obtenida procesando los datos TASI, se utilizaron medidas in-situ de temperatura del agua del pantano de Ribarroja adquiridas por Flumen con un radiómetro Fluke 572 y con un termómetro de contacto. Se utilizó la información GPS correspondiente a las muestras in-situ para encontrar las coordenadas de los píxeles de referencia dentro de las imágenes térmicas y se aplicó un promedio espacial alrededor de cada píxel de referencia para reducir el ruido con ventanas de 3x3, 5x5 y 7x7 píxeles. Finalmente, se compararon estos valores con las medidas de temperatura del agua cogidas por Flumen con el radiómetro Fluke y con el termómetro de contacto. El error de estimación de la temperatura del agua en la zona del embalse de Ribarroja obtenido procesando los datos hiperspectrales TASI con el perfil atmosférico NCEP y el método Aster OPT fue, aproximadamente, de 0.1 °C respecto a los datos del termómetro, y de 0.9 °C respecto a las medidas del radiómetro Fluke (ICC, 2011a, 2011b; Prats *et al.*, 2013).

4.3 CASO 2: EMBALSE DE SAU (RÍO TER)

4.3.1 Antecedentes de estudios del Instituto Flumen

También son diversos los estudios limnológicos llevados a cabo por el Instituto Flumen de los embalses del sistema Sau-Susqueda-El Pasteral (Arbat-Bofill *et al.*, 2011; Armengol *et al.*, 2005; Armengol, 2003; Ordóñez, 2010). En Ordóñez (2010) se puede encontrar una detallada descripción del estado limnológico del embalse de Sau.

Los estudios limnológicos e hidrodinámicos en a la zona del embalse de Sau se habían realizado a partir de datos experimentales correspondientes al periodo 1999-2007, tomados mensualmente (Armengol *et al.*, 2005; Ordóñez, 2010). Las muestras obtenidas fueron tomadas en un punto cercano de la presa, que corresponde al punto de muestreo histórico y que está en la zona de características más lacustres del embalse.

Junto a la información física, química y biológica obtenida durante la campaña, se disponía de datos meteorológicos, registrados en la estación meteorológica instalada en el club náutico situado en la orilla norte del embalse, muy próximo al punto de muestreo (Armengol *et al.*, 2005; Ordóñez, 2010).

4.3.2 Localización de los puntos de medida

Para el presente estudio, en la Figura 35 se muestra la distribución de los puntos de medida de la campaña 2011. Los puntos eran fijos y situados en posiciones estratégicas para controlar la evolución térmica del embalse. Su localización se definió a partir de dos premisas: el interés del punto y el fácil acceso. Otros factores a tener en cuenta en la instalación de los dispositivos fueron la cobertura telefónica, la visibilidad, no interponerse en la navegación y la normativa de seguridad del embalse.



Figura 35. Localización de los puntos de medida de temperatura del agua en el embalse de Sau (río Ter).

De este modo se contemplaron tres puntos característicos para el muestreo durante la campaña 2011:

Punto 1: extremo aguas arriba del embalse, junto a la EDAR de Roda de Ter. Este punto es compartido con la instrumentación de la Agència Catalana de l'Aigua.

Punto 2: justo antes del ensanchamiento del embalse. Se considera interesante debido al cambio de características geométricas.

Punto 3: en el entorno del tramo más ancho del embalse de Sau; la localización se tuvo que modificar en función de la compatibilidad las embarcaciones, la normativa y las actividades del Club Náutico. Finalmente se decidió que la mejor opción fue fijar la boya en una ubicación lo más centrada posible, en la línea de boyas que delimitaban la zona navegable.

4.3.3 Descripción de la instrumentación

4.3.3.1 Punto 1: EDAR de Roda de Ter

En este punto la Agència Catalana de l'Aigua disponía de instrumentación de control de temperatura y nivel. Toda la información disponible para el periodo de estudio ha sido cedida. Se considera que en esta zona del embalse el funcionamiento hidrodinámico es similar al del río y por lo tanto la distribución vertical de temperaturas se puede considerar mezclada y constante. Las medidas de nivel y temperatura obtenidas son horarias pero se han utilizado medias diarias.

4.3.3.2 Punto 2: Boya pequeña

Se instaló una pequeña boya de la que colgaba una cadena con tres sensores HOBO (ver apartado 1.2.3.3) a uno en superficie, otro a 5 y otro a 10 m de profundidad). El muestreo de datos fue diezminutal y las medidas quedaban almacenadas en la memoria del sensor, por lo que fue necesario ir periódicamente a descargar los datos manualmente.

4.3.3.3 Punto 3: Boya grande

Boya con cadena de termistores PT100 (de la marca Desin Instruments, modelo: PT100 SR-NXH-1/10 DIN de 3 hilos). Los sensores de temperatura usados se configuraron de manera que se capturaban datos de temperatura cada minuto y se almacenaba la media cada 10 minutos.



Figura 36. Detalle del termistor PT100 (marca Desin Instruments, modelo: PT100 SR-NXH-1/10 DIN de 3 hilos).



Figura 37. Boya Flumen instalada en el embalse de Sau, siguiendo la línea de boyas que limita la zona de navegación (junto a la presa de Sau). Verano de 2011.

4.3.3.4 Estación meteorológica de Sau

Los sensores meteorológicos de humedad, temperatura del aire, velocidad y dirección del viento, pluviómetro y tres piranómetros para medir la radiación incidente y reflejada, se ubicaron sobre la caseta del ACA en la margen izquierda, junto a la presa de Sau.



Figura 23. Estación meteorológica situada en el tejado de la caseta propiedad de ATLL.



Figura 38. Detalle de la instrumentación meteorológica situada en el embalse de Sau.

El equipo del Instituto Flumen dispone desde mayo de 1997 de una estación meteorológica Campbell Scientific instalada en el Club Náutico de Sau. Las variables de medida y los sensores que se utilizan son los siguientes (Ordóñez, 2010):

1. Sensor de temperatura y humedad relativa: Vaisala HMP35AC.
2. Sensor de presión atmosférica: Vaisala PTB101B.
3. Sensor de radiación infrarroja larga: Pirgeómetro Kipp & Zonen CG14 (rango 5000-50000 nm).
4. Sensores de radiación solar, para medidas de la radiación incidente y emitida: Piranómetro Kipp & Zonen CM3 (rango 300 a 3000 nm).
5. Sensor de radiación fotosintética activa (PAR) Skye SKP215 (rango 400-700 nm). No utilizado en este estudio.
6. Anemómetro Young 05103.
7. Pluviómetro Munro R102.

4.3.3.5 Otras fuentes de datos

Periódicamente, aproximadamente cada dos semanas, se llevaron a cabo tareas de mantenimiento, reparación y campañas manuales de registro de perfiles de temperatura en los puntos 2 y 3.

También se ha dispuesto de datos referentes a los parámetros físicos y químicos tomados mensualmente mediante una sonda multiparamétrica CTD SBE 19 plus, datos cedidos por el Departamento de Ecología de la Universidad de Barcelona y Aigües Ter-Llobregat.

Además, en casos de falta de datos, errores en la instrumentación meteorológica y para estudios de comparación también se han utilizado los datos meteorológicos de estaciones cercanas al embalse de Sau de la *Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques (XEMA)* y del servicio autonómico MeteoCat (www.meteocat.cat), como la estación meteorológica de Gurb (Osona).

4.3.4 Análisis de los datos de Sau (Campaña 2011)

4.3.4.1 Disponibilidad de datos 2011

El periodo de estudio coincide con la campaña de campo realizada de primavera a otoño de 2011 y viene directamente definido por la implementación y retirada de la instrumentación en el embalse de Sau por parte del Instituto Flumen.

Se empezaron a obtener datos referentes a la estratificación térmica del embalse escalonadamente entre los meses de mayo y junio del mismo 2011 gracias a la instalación de termistores y boyas con termistores a diferentes profundidades. La instrumentación instalada se retiró durante la última semana de septiembre del mismo año, coincidiendo aproximadamente en la rotura de la termoclina del embalse.

4.3.4.2 Caudales de entrada/salida y nivel del embalse

Los datos muestreados en los puntos de registro se completaron con las series de entradas y salidas de caudal proporcionados por Aigües Ter-Llobregat (ATLL).

4.3.4.3 Definición del periodo de estudio

La serie de datos obtenidos a partir de la estación meteorológica instalada cerca de la presa de Sau muestra algunos vacíos pero se considera suficientemente buena en el periodo de estudio escogido: del 24 de febrero (día juliano 55) al 30 de septiembre (día juliano 273) de 2011. Además de la serie de datos meteorológicos también se dispone de las características de operación de la presa (caudales y cotas de extracción en función de la fecha) así como de los caudales de entrada y su temperatura.

4.4 TRATAMIENTO Y ALMACENAMIENTO DE DATOS DE CAMPO

4.4.1 Control de calidad

El control de calidad realizado para los datos adquiridos en las diferentes estaciones tiene como objetivo verificar si los registros disponibles son representativos y consistentes con las condiciones hidrodinámicas y meteorológicas existentes.

Los datos obtenidos de las campañas de campo llevadas a cabo en Sau han resultado ser de aceptable calidad después de un proceso de depuración. Se han usado diversas herramientas para la depuración de errores, ya sean del proceso de medida o del propio sensor. En algunos casos de vacío de datos, por fallo de la instrumentación, periodos de no adquisición, vandalismo, etc., o de datos con errores de medida se han completado las series mediante estimaciones con el promediado con datos próximos.

Los sensores instalados en las estaciones meteorológicas y la sonda multiparamétrica fueron calibrados anualmente por el propio proveedor. La sonda sumergible y los sensores de temperatura instalados en las boyas fijas han sido los que mayores problemas de funcionamiento han presentado.

4.4.2 Tratamiento de los datos

Para verificar los registros disponibles se pueden utilizar métodos automáticos, a partir de programas de tratamiento de datos o manuales controlados por el observador. Siguiendo

las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2007), las series de datos de estaciones meteorológicas se han sometido a controles de calidad de formato, integridad y consistencia, tanto interna, temporal como espacial. Los primeros suelen ser más automáticos y menos costosos ante un gran volumen de datos, pero carecen de la capacidad para determinar el origen de los errores y las posibles correcciones.

Es posible además que los sensores den lecturas erróneas dentro de lo que un control automático puede considerar como rango normal de funcionamiento. Así que es recomendable combinar ambos métodos, con una lista automática de los posibles errores supervisada manualmente (WMO, 2007).

Para depurar series de datos con errores se seguía la lectura a lo largo del tiempo hasta encontrar alguna anomalía o inconsistencia (se mira a través del gráfico de datos o aplicando filtros numéricos mediante Excel, Matlab,...).

Las típicas fuentes de errores en los sensores han sido los siguientes: sobrecarga en la fuente eléctrica o batería (por ejemplo en el caso de la estación meteorológica de Ribarroja había interferencias cada vez que descendía la sonda), efectos de tormentas, paros eléctricos, *resets* del *datalogger*, etc. Si la anomalía que se presentaba era puntual, se borraba el valor y se substituía por el promedio de la medida anterior y la siguiente.

Si un sensor de medida se estropeaba o fallaba mientras estaba en funcionamiento se intentaba cambiar por otro de las mismas características. Si no era posible arreglar o cambiar el sensor, se intentaba utilizar los datos de un segundo sensor (cercano o duplicado) como es el caso de los sensores duplicados en boyas fijas (Sau y Ribarroja). Previamente se comprobaban las correspondencias entre series de datos entre los dos sensores, aproximadamente durante un periodo de unos 15 días antes de que dejara de funcionar el primer sensor.

En algunos casos aparecen algunos vacíos de datos en periodos de tiempo donde no hubo manera de arreglar los sensores o de utilizar otros datos. En estos casos se ha considerado hacer regresiones numéricas a partir de correlaciones entre el parámetro en cuestión y el resto de variables.

4.5 CONCLUSIONES

Se ha presentado el diseño de redes de instrumentación para medir el comportamiento térmico de los embalses de Ribarroja (Caso 1) y Sau (Caso 2). La mayor complejidad de estas campañas de instrumentación es el difícil acceso a los puntos de medida, normalmente en barca, además de la dificultad de trabajar con instrumentos electrónicos sumergidos o muy cercanos a la superficie del agua. Adicionalmente a los problemas de acceso y humedad, la comunicación remota (GSM) también ha sido un factor limitante, pues los embalses estudiados se encuentran en zonas de poca cobertura telefónica.

El análisis y tratamiento de datos de campo es una tarea exhaustiva y costosa en cuanto a tiempo de análisis. Estos datos han sido, son y serán de gran utilidad para conocer el comportamiento de los embalses estudiados, proporcionando información de la evolución hidrodinámica, los efectos de los cambios meteorológicos, el régimen de caudales, estudio de los periodos concretos de estratificación o mezcla/rotura de termoclina, sus patrones de circulación, las dinámicas sedimentarias y erosivas,...

Es importante resaltar la importancia que tiene disponer de datos reales y de campo a la hora de conocer el funcionamiento de los embalses (Capítulo 5). Además son datos muy valiosos a la hora de poder calibrar y validar los modelos numéricos aplicados a los mismos. Estos datos de campo y perfiles medidos podrán ser utilizados tanto como inputs a los programas utilizados y desarrollados como para realizar comparaciones y comprobaciones entre datos reales y simulados (Capítulos 6 y 7).

4.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARBAT-BOFILL, DE POURQ, & DOLZ, 2009. *Batimetría 2008*. Barcelona.

ARBAT-BOFILL, SÁNCHEZ-JUNY, & DOLZ RIPOLLÉS, 2011. *Estudi en model numèric de la hidrodinàmica de l'embassament de Sau (Anàlisi prèvia)*. Barcelona.

ARMENGOL, 2003. *Balanç tèrmic de l'embassament de Sau: Una aproximació basada en dades meteorològiques rutinàries*. Universitat Politècnica de Catalunya.

ARMENGOL, COMERMA, GARCÍA, ROMERO, RODRÍGUEZ, VALERO, & VIDAL, 2005. *Quaderns ATLL - Contribució al coneixement de l'ecologia aquàtica de l'embassament de Sau (evolució de l'embassament al 1999)*.

DE POURCQ, ARBAT, & DOLZ, 2007. *Batimetría 2007. Documento interno Flumen*. Barcelona.

DOLZ, ARMENGOL, ROURA, DE POURCQ, ARBAT-BOFILL, & LÓPEZ, 2009. *Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja*. Barcelona.

ICC, 2011a. *Ribarroja. TASI Sensor 5504 (Descripció Vols Processat dades TASI i validació Temperatura)*. 7/7/2011. Barcelona.

ICC, 2011b. *Ribarroja II. TASI Sensor 5504 (Descripció Vols Processat dades TASI i validació Temperatura)*. 10/11/2011. Barcelona.

LÓPEZ, DOLZ, ARBAT, ARMENGOL, & ARBAT-BOFILL, 2012. *Physical and chemical characterisation of superficial sediment of the Ribarroja Reservoir (River Ebro, NE Spain)*. *Limnetica* 31, 321–334.

MARCÉ, COMERMA, GARCÍA, GOMÀ, & ARMENGOL, 2005. *The zooplankton community in a small, hypertrophic mediterranean reservoir (Foix reservoir, NE Spain)*. *Limnetica* 24, 275–294.

ORDÓÑEZ, 2010. *Limonología del embalse de Sau. Relaciones del zooplancton, la clorofila y los sólidos en suspensión con el clima lumínico del agua*. Universitat de Barcelona.

PRATS, 2011. *El règim tèrmic del tram inferior de l'Ebre i les seues alteracions*. Universitat Politècnica de Catalunya.

PRATS, ARBAT-BOFILL, MARTÍ, ARMENGOL, & DOLZ, 2013. *Utilidad de los sensores térmicos aerotransportados en estudios de hidrodinámica de embalses y ríos*, in: València (Ed.), *III Jornadas de Ingeniería del Agua*. Valencia, p. 8.

PRATS, VAL, ARMENGOL, & DOLZ, 2010. *Temporal variability in the thermal regime of the lower Ebro River (Spain) and alteration due to anthropogenic factors*. *J. Hydrol.* 387, 105–118. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.04.002

PRATS-RODRÍGUEZ, ARMENGOL, MARCÉ, SÁNCHEZ-JUNY, DOLZ RIPOLLÉS, DOLZ, & PRATS, 2011. *Dams and Reservoirs in the Lower Ebro River and Its Effects on the River Thermal Cycle*. Ebro River Basin 77–95. doi:10.1007/698

ROURA, 2004. *Incidència de l'embassament de Mequinensa en el transport de sòlids en suspensió i la qualitat del riu Ebre*. Universitat Politècnica de Catalunya.

VAL, 2003. *Incidencia de los embalses en el comportamiento térmico del río. Caso del sistema de embalses Mequinensa - Ribarroja - Flix en el río Ebro*. Universitat Politècnica de Catalunya.

WMO, 2007. *Guide to the global observing system*, 3rd ed. Geneva, Switzerland.

Capítulo 5 HIDRODINÁMICA DE LOS CASOS DE ESTUDIO

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen los datos utilizados para las simulaciones numéricas y el comportamiento hidrodinámico de los embalses definidos en el Capítulo 3: el “Caso 1” correspondiente al embalse de Ribarroja de Ebro en el río Ebro y el “Caso 2” correspondiente al embalse de Sau en el río Ter.

La descripción hidrodinámica se ha realizado a partir del análisis de los datos de campo de las campañas realizadas en los embalses de estudio presentados en el Capítulo 4. En el apartado 5.2, correspondiente al embalse de Ribarroja de Ebro, se analiza el periodo 2009-2010; en el apartado 5.3, correspondiente al embalse de Sau, se analiza el periodo de estratificación de 2011.

Los resultados de las simulaciones numéricas de la hidrodinámica mediante CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008) se recogen en el Capítulo 6.

5.2 CASO 1: EMBALSE DE RIBARROJA DE EBRO

5.2.1 Campaña 2009-2010

A continuación se presentan y describen los caudales de entrada y salida al embalse (5.2.1.1), nivel de embalse (5.2.1.2), las variables meteorológicas (5.2.1.3), la temperatura (5.2.1.4) y la velocidad horizontal (5.2.1.5) del agua en distintos puntos del embalse y todo ello se correlaciona para describir el comportamiento hidrodinámico y la respuesta térmica del mismo. Los datos se han representado en días julianos, se puede consultar la conversión a calendario gregoriano en el Anejo 2.

5.2.1.1 Caudales de entrada y salida al embalse

Los caudales de entrada y salida al embalse para los periodos de estudio de los años 2009 y 2010 se presentan en la Figura 39 y la Figura 40 respectivamente.

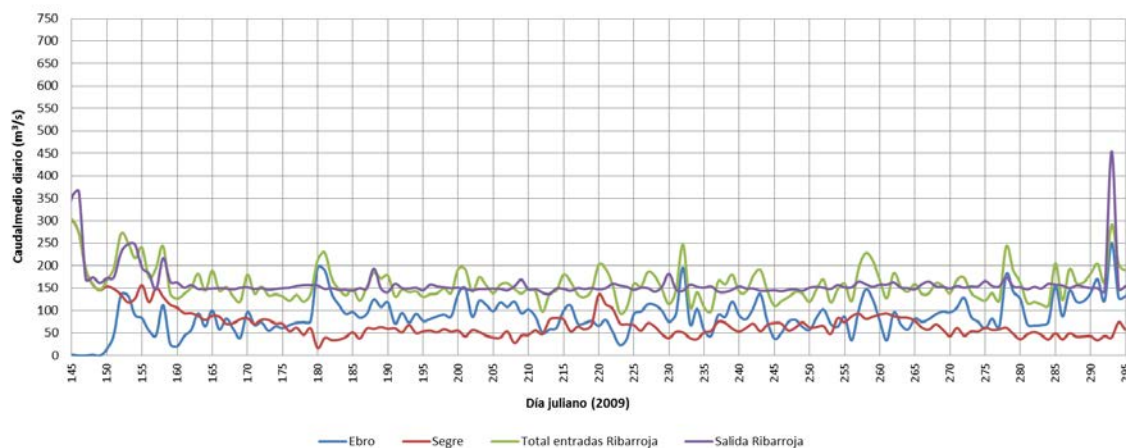


Figura 39. Caudales medios diarios de entrada y salida al embalse de Ribarroja de Ebro entre el 145 (25 de mayo) y 295 (22 de octubre de 2009).

El periodo de estudio del año 2009 (Figura 39) no presenta avenidas importantes aunque se destacan dos picos en los días 145 y 293 que superan los 300 m³/s en el caudal de salida. El pico más importante y de mayor magnitud tiene lugar el día 293 en que se alcanzan hasta 450 m³/s en el caudal de salida mientras que el caudal de entrada es inferior (del orden de los 280 m³/s) y mayoritariamente aportado por el río Ebro. La avenida del día 145 procede del Segre y el caudal total de entrada al embalse es de unos 300 m³/s.

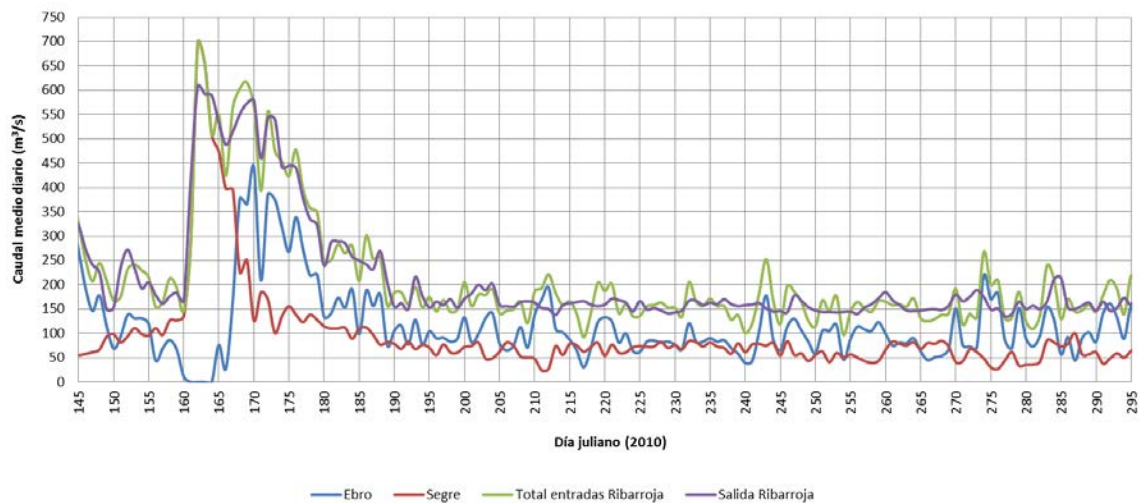


Figura 40. Caudales medios diarios de entrada y salida al embalse de Ribarroja de Ebro entre el 145 (25 de mayo) y 295 (22 de octubre) de 2010.

En el año 2010 (Figura 40) se destacan los episodios de avenida de finales de primavera (día 162) procedentes del río Segre que alcanzan los 700 m³/s de caudal total de entrada al embalse. El segundo pico de la avenida llega con cierto retraso a la salida del embalse de Mequinenza (día 167). A partir del día 170 hay una disminución progresiva de caudal que se estabiliza a partir del día 190 en el orden de 180 m³/s hasta el final del periodo de estudio. Del día 190 al 295 el río Segre sigue un comportamiento bastante regular mientras que se pueden observar pequeños picos en los caudales del río Ebro (días 212, 220, 243, 247, 270, 274-276, 279, 283 y 292), aunque sólo en un caso se llegan a superar los 200 m³/s. En cuanto a las salidas (línea violeta) puede observarse que el embalse de Ribarroja se regula acorde a los caudales de (línea de color verde), ello permite predecir los picos de caudal a la salida aunque laminados.

Es importante señalar que en el año 2010 hubo diferentes episodios de vertido por las compuertas del embalse de Ribarroja. Las fechas de dicho vertido corresponden a los días: 159, 168, 170-171 y 308.

5.2.1.1.1 Comparación 2009-2010

Comparando los caudales de los años 2009 y 2010 se destaca claramente un comportamiento diferenciado en cuanto a caudales de entrada al embalse. Mientras que en el año 2009 no se superan los 300 m³/s de caudal de entrada en ningún momento, en el año 2010 se superan durante unos 15 días consecutivos (160-180) alcanzándose los 700 m³/s. El

año 2009 presenta un comportamiento regular con algunos picos asociados a pequeñas avenidas procedentes del río Ebro.

5.2.1.2 Nivel de embalse

La cota del embalse de Ribarroja de Ebro es bastante estable a lo largo del año. En la Figura 41 y la Figura 42 se presenta la evolución del nivel medio diario del embalse para los periodos de estudio de los años 2009 y 2010 respectivamente.

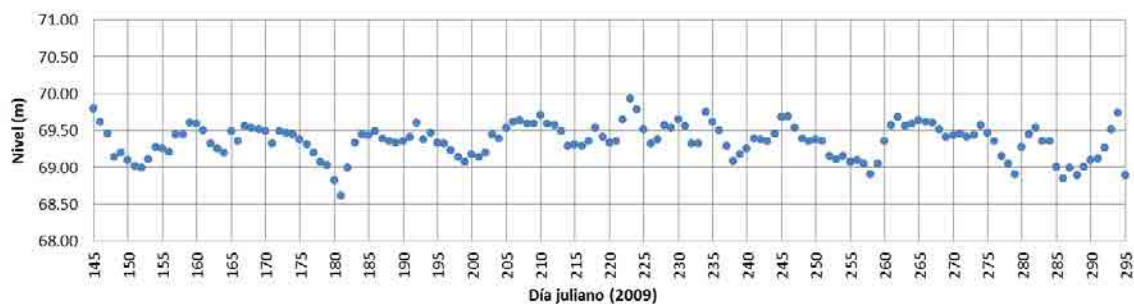


Figura 41. Evolución del nivel medio diario de embalse para el periodo de estudio del año 2009.

A lo largo del año 2009 (Figura 41) la cota se mueve alrededor de los 69.5 m.s.n.m. llegando a máximos de 70 m.s.n.m. y a mínimos de 68.5 m.s.n.m. en un caso puntual (día 181). El nivel promedio del embalse para el año 2009 es de 69.35 m.s.n.m.

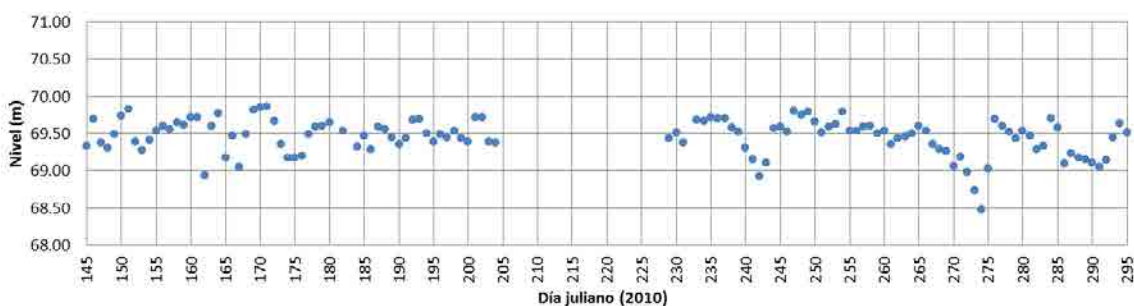


Figura 42. Evolución del nivel medio diario del embalse para el periodo de estudio del año 2010.

A lo largo del año 2010 (Figura 42), puede observarse que incluso en verano la cota se mueve alrededor de los 69.5 msnm llegando a máximos de 70 m.s.n.m. y a mínimos de 69 m.s.n.m., hasta 68.5 m.s.n.m. en casos puntuales (día 274). El nivel de embalse promedio para el año 2010 es de 69.46 m.s.n.m. Así, debido a la estabilidad de la cota de embalse se supondrá que durante el periodo sin datos (días 205-227) mantiene un comportamiento constante e igual a 69.5 m.s.n.m.

5.2.1.2.1 Comparación 2009-2010

Comparando las gráficas de la evolución de la cota de embalse se destaca la clara estabilidad (un poco por debajo de los 69.5 msnm) con pequeñas variaciones que en raros casos llegan a superar el medio metro de diferencia.

5.2.1.3 Datos meteorológicos

5.2.1.3.1 Temperatura del aire

La temperatura del aire en el embalse de Ribarroja de Ebro sigue la evolución típica del clima mediterráneo. En la Figura 43 y la Figura 44 se presenta la evolución de la temperatura del aire (medidas diarias) para los periodos de estudio de los años 2009 y 2010 respectivamente.

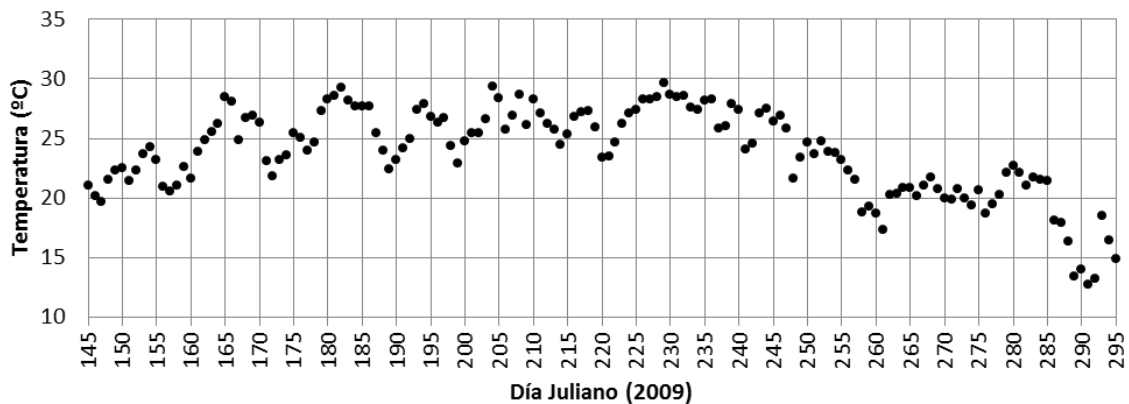


Figura 43. Evolución de la temperatura media diaria del aire para el periodo de estudio del año 2009 en la plataforma Flumen.

En el inicio del periodo de estudio del año 2009 (Figura 43) ya se presentan las temperaturas típicas de mediados de primavera (alrededor de los 20-21 °C), el aumento de temperaturas es escalonado hasta el día 195 (aproximadamente un aumento de 5 grados cada 10 días) pero con bajadas un poco más bruscas (días 155, 167, 171, 187) que normalmente se prolongan unos 3 días (bajando del orden de 4-5 °C). Del día 195 al 245 se mantienen las temperaturas del aire alrededor de los 28 °C con dos bajadas de 2-3 °C entre los días 210-213 y 218-221 respectivamente que se recuperan en los dos días siguientes. A partir del día 245 las temperaturas del aire empiezan a disminuir gradualmente aunque se destaca una pequeña estabilización entre los días 260-285, para bajar un poco más bruscamente entre los días 185-295.

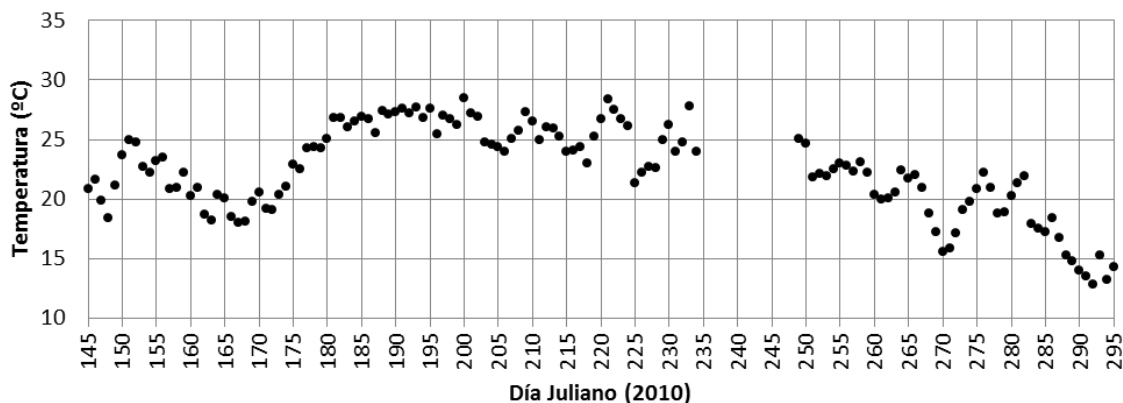


Figura 44. Evolución de la temperatura media diaria del aire para el periodo de estudio del año 2010 en la plataforma Flumen.

La serie de temperaturas del aire para el año 2010 (Figura 44) medidas en la plataforma presentan algunos periodos en que no hay datos debido a problemas con la adquisición. Para completar la falta de datos entre los días 235-248 se utilizarán datos de la Xarxa Agronòmica de Catalunya (XAC). En la primavera de 2010 se presentan dos eventos importantes de tormentas que además de conllevar aumentos importantes de caudal (Figura 40) también provocan una disminución de la temperatura del aire en el periodo 155-167 (pasa de los 25 a los 17 °C). La recuperación de temperaturas es progresiva del orden de los 5 grados en 10 días. Se llega a cierta estabilidad térmica del día 170 al 220, alrededor de los 28 °C, para volver a bajar progresivamente hasta los 13 °C al final del periodo de estudio. En esta bajada de temperaturas se destaca una disminución brusca de 7 °C que tiene lugar a partir del día 267 hasta el día 270 (alcanzando un mínimo de 16 °C). Del día 270 al 276 se recupera la temperatura llegando a los 21 °C. A partir del día 282 las temperaturas bajan hasta llegar a los 13-14 °C al final del periodo de estudio.

Comparación 2009-2010

Se puede apreciar que la evolución de la temperatura del aire tiene la misma tendencia inicial (empieza del orden de los 20 °C en los días 145-150). A partir de esta fecha, los años 2009 y 2010 siguen patrones distintos: mientras que el 2009 va aumentando paulatinamente de temperatura con ciertas bajadas, el año 2010 presenta una bajada menos brusca pero más persistente en el tiempo en el que se pasa de los 25 a los 17 °C en 15 días. Para ambos años la recuperación de temperatura en este periodo es del orden de los 5 °C cada 5 días. En los meses de verano se observan temperaturas del orden de los 27 °C, pero ambos años presentan eventos puntuales que hacen disminuir las temperaturas hasta los 22-23 °C. Cabe destacar que el inicio de verano es más estable para el año 2010 que para el año 2009. En

cambio, el año 2009 presenta más estabilidad durante el periodo 224-245. La disminución de temperatura del aire sigue un patrón parecido entre ambos años aunque no coinciden los eventos que provocan disminuciones bruscas de temperatura. Ambos años finalizan el periodo de estudio con temperaturas del orden de los 13 a 15 °C.

5.2.1.3.2 Humedad relativa

La humedad relativa en el embalse de Ribarroja de Ebro es bastante estable a lo largo del año. En la Figura 45 y la Figura 46 se presenta su evolución en medidas diarias, para los periodos de estudio de los años 2009 y 2010 respectivamente.

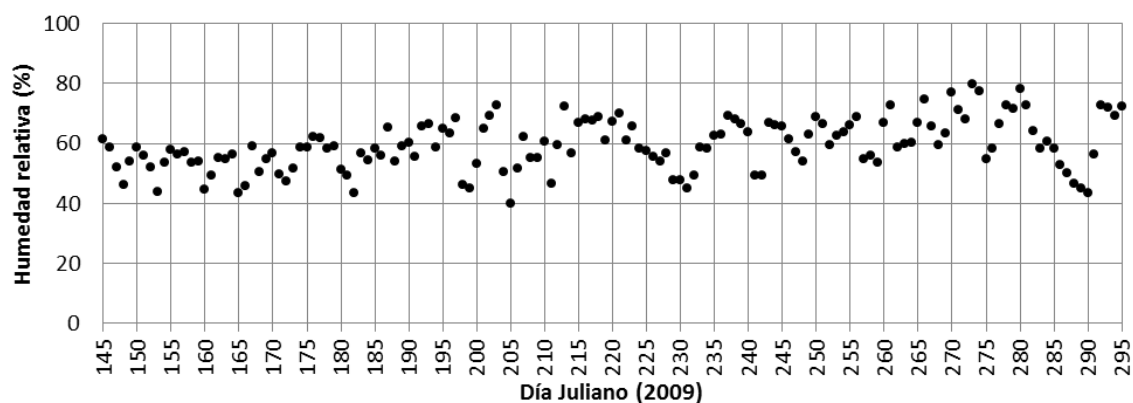


Figura 45. Evolución de la humedad relativa media diaria del aire para el periodo de estudio del año 2009, en la plataforma Flumen.

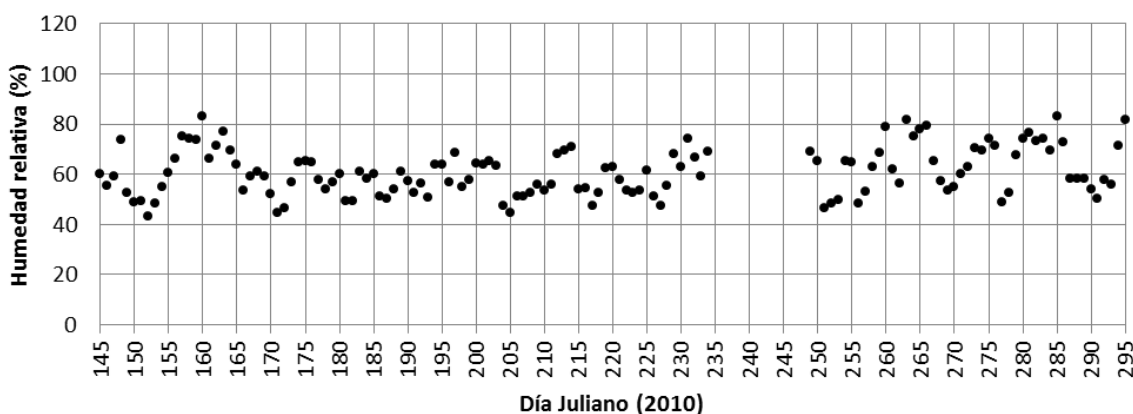


Figura 46. Evolución de la humedad relativa media diaria del aire para el periodo de estudio del año 2010, en la plataforma Flumen.

En el año 2010 se destaca el aumento de humedad relativa en los días 152 al 160, la disminución en verano y los aumentos en los días 260-265, 275, 280-285. Para completar la

falta de datos entre los días 235-248 se utilizarán datos de la XAC. La humedad relativa medida en la plataforma presenta para ambos años valores del orden del $60\% \pm 20\%$.

5.2.1.3.3 Radiación solar neta

La medida de la radiación solar global hace referencia al flujo radiante recibido por unidad de superficie en una superficie horizontal, y es la resultante de la radiación solar directa y difusa incidente. La unidad de medida en el Sistema Internacional es el W/m^2 ; potencia energética por unidad de superficie. En la Figura 47 y la Figura 48 se presenta la evolución de la medida diaria de la radiación solar neta para los periodos de estudio de los años 2009 y 2010 respectivamente.

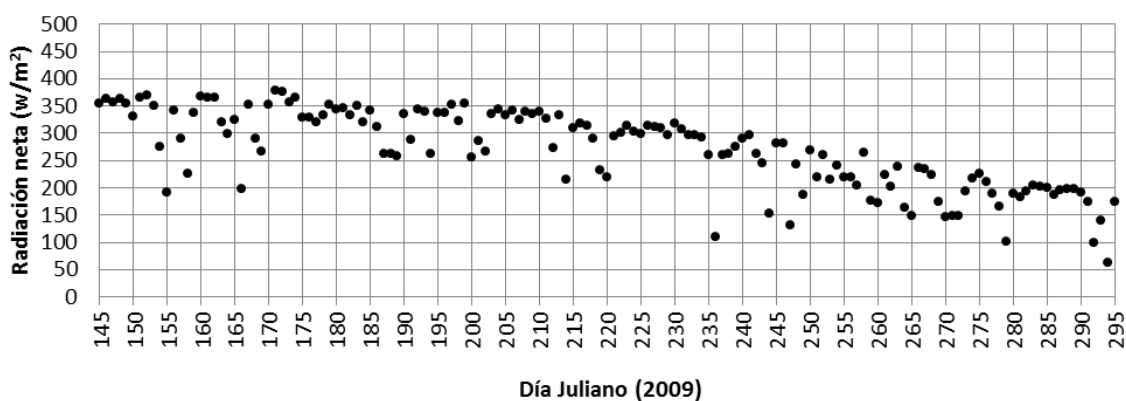


Figura 47. Evolución de la radiación solar neta media diaria para el periodo de estudio del año 2009, en la estación meteorológica XAC situada en la presa de Ribarroja de Ebro.

El año 2009 presenta una primavera relativamente soleada (exceptuando algunos días como 155, 157 o 166); en cambio, a finales de verano se presentan radiaciones inferiores a lo que cabría esperar. La información aportada por la evolución de la radiación solar neta se puede complementar con la temperatura del aire (Figura 43 y Figura 44) en la que se pueden correlacionar disminuciones de los valores de la temperatura del aire con disminuciones de la radiación solar neta (observar periodo 185-220, días 237, 248, 259-260, 270 o 278).

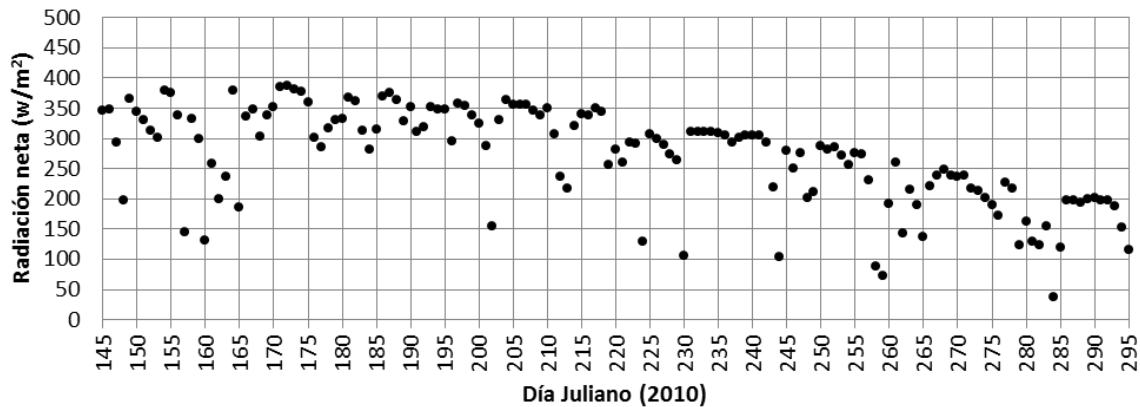


Figura 48. Evolución de la radiación solar neta media diaria para el periodo de estudio 2010, en la estación meteorológica XAC situada en la presa de Ribarroja de Ebro, medias diarias.

El año 2010 (Figura 48) presenta un final de primavera con valores de radiación solar neta muy variables. Se destacan las disminuciones de los días: 148, 157-165, 176-178, 202, 211-212, 219, 24, 230, 243-244, 257-259, 278-285 y 294-295. La información aportada por la evolución de la radiación solar se puede complementar con la temperatura del aire (Figura 48), en la que se pueden correlacionar disminuciones de los valores de la temperatura del aire con disminuciones de la radiación solar neta.

Comparación 2009-2010

Es importante destacar la variabilidad en cuanto a radiación solar comparando ambos años. La curva de tendencia envolvente es similar pero los eventos meteorológicos que hacen disminuir la radiación no coinciden entre los años 2009 y 2010. Mientras que el año 2009 presentó un final de primavera relativamente soleada en el año 2010 se presentan más eventos que reducen de manera importante la radiación, presentando una tendencia mucho más inestable para el mismo periodo. En ambos años, la envolvente del verano se mueve alrededor de los 350 W/m² con eventos puntuales en que se disminuye la radiación, estos eventos también se correlacionan con la evolución de la temperatura del aire de cada año. A finales de verano y principios de otoño hay una disminución progresiva (hacia los 250 W/m²) con eventos puntuales que hacen disminuir la radiación media diaria de manera importante.

5.2.1.3.4 Precipitación

En el año 2009 (Figura 49) se destacan precipitaciones puntuales alrededor de los días 155, 205, 215, 260, 271 y 294, ninguna llega a superar los 20 mm.

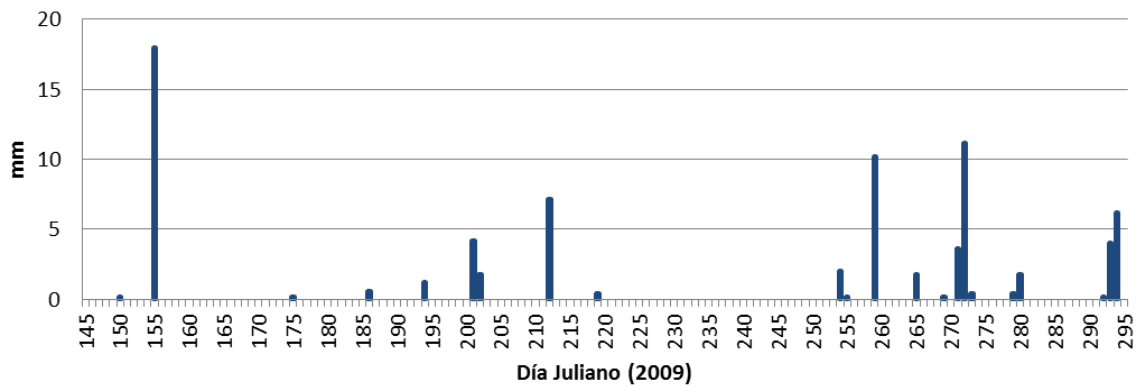


Figura 49. Evolución de la precipitación acumulada en 24 horas para el periodo de estudio del año 2009 en la plataforma Flumen, embalse de Ribarroja de Ebro.

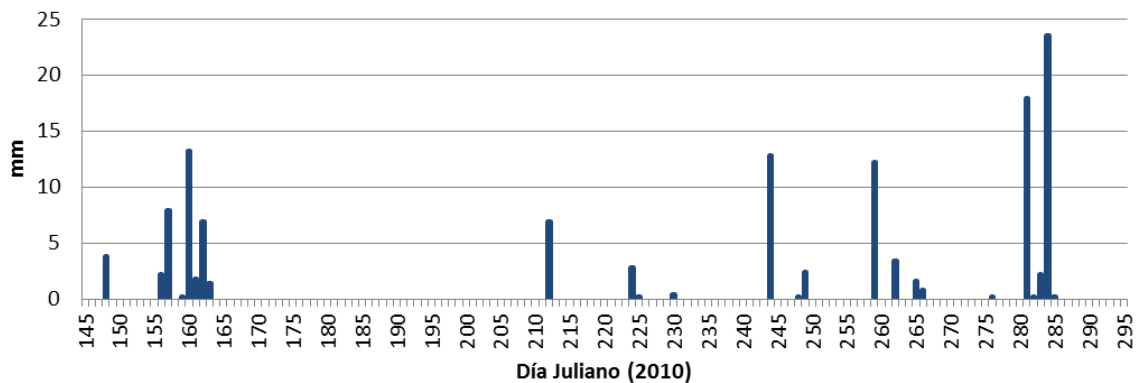


Figura 50. Evolución de la precipitación acumulada en 24 horas para el periodo de estudio del año 2010 en la plataforma Flumen, embalse de Ribarroja de Ebro).

En 2010 (Figura 50) se destacan eventos superiores a los 10 mm en los días 124, 170, 244, 259, 282 y 284, aunque siempre inferiores a los 25 mm.

Comparación 2009-2010

En ambos años se pueden observar eventos puntuales de lluvias pero en ningún caso llegan a superar los 25 mm.

5.2.1.3.5 Viento

En los dos periodos estudiados se aprecia una dirección dominante entre los 120 y 145 grados procedente del SE aunque hay ciertos eventos que modifican el patrón típico, provocando direcciones contrarias (procedentes del NW). Las velocidades medias horarias predominantes son del orden de 2 a 6 m/s aunque en los meses de julio-agosto se presentan algunos picos con velocidades superiores.

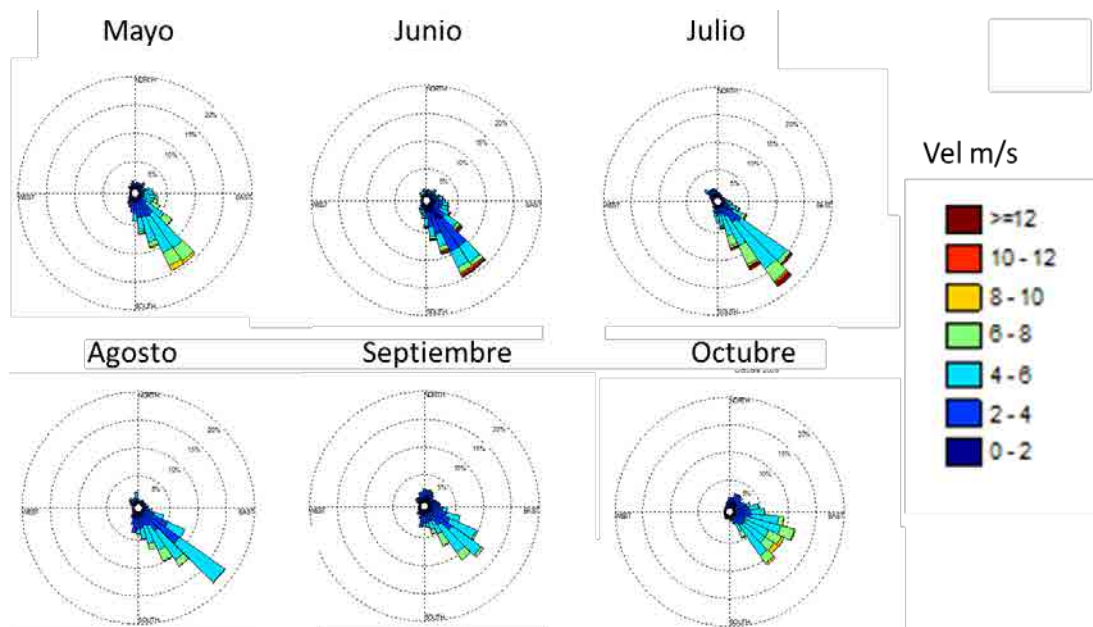


Figura 51. Rosas del viento mensuales (de mayo a octubre) para el periodo de estudio correspondiente al año 2009.

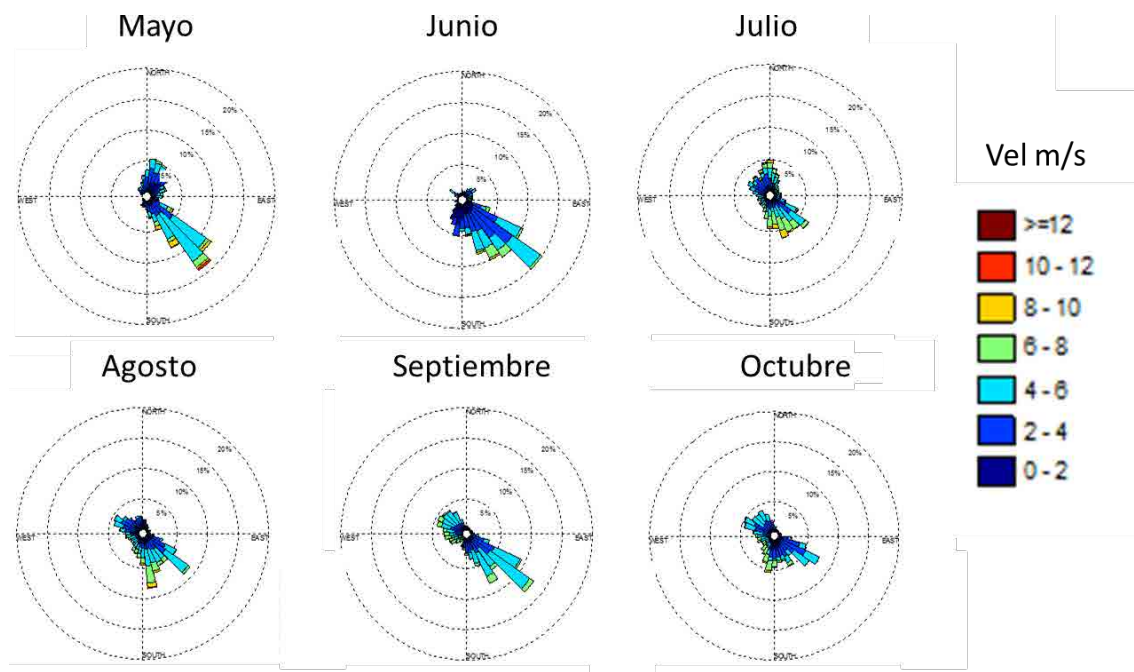


Figura 52. Rosas del viento mensuales (de mayo a octubre) para el periodo de estudio correspondiente al año 2010.

Comparación 2009-2010

Al comparar los datos de viento se observa una marcada tendencia de vientos predominantes procedentes del sureste, con velocidades de los 2 a los 8 m/s excepto eventos puntuales. En periodos de calma esta tendencia SE es la predominante, pero observando el

año 2010 aparecen vientos procedentes de otras direcciones (N o NW) cuando hay ciertos eventos de tormenta o lluvias.

5.2.1.4 Temperatura del agua

5.2.1.4.1 *Entrada al embalse*

Debido a la poca disponibilidad de datos de temperatura del agua de ambas entradas (ríos Ebro y Segre) para los años 2009 y 2010 se procedió a buscar la mejor propuesta para cubrir estas deficiencias (desarrollado en el Anejo 3). Val (2004) presenta series completas de temperatura media diaria del agua en las entradas del río Segre y el río Ebro para los años 1998 y 1999. Para comprobar que se podían hacer estas suposiciones se procedió a realizar un análisis de sensibilidad mediante CE-QUAL-W2.

Después de observar tendencias similares entre los años 1998 y 1999, se determinó la media entre ambos años (separando las entradas procedentes del río Ebro de las del río Segre). Con tal de intentar minimizar los efectos de avenidas puntuales y de eventos meteorológicos se utilizaron promedios semanales para suavizar el efecto de los eventos con duración de uno a tres días, pero sin perder la evolución temporal de la temperatura (Figura 53).

Los resultados del análisis de sensibilidad se muestran en detalle en el Anejo 3. Mediante estos resultados se pudo observar el efecto de un supuesto error de ± 2 °C en toda la serie de temperaturas de entrada al embalse (Segre y Ebro por separado o ambos a la vez; ver Anejo 3). Se estudiaron los efectos en la propagación aguas abajo, concluyendo que:

- En caso de utilizar temperaturas del agua de entrada ± 2 °C distintas a las reales se observa que dicho incremento de temperaturas se propaga aguas abajo. Cabe destacar que durante su propagación la variación térmica no es de la misma magnitud en toda la columna de agua. Las diferencias más importantes dependen del posicionamiento del agua circulante según su temperatura y densidad.
- Las principales diferencias de temperatura en el embalse provocadas por un evento meteorológico o una avenida se ven suavizadas cuando se realiza el promedio semanal de la condición de contorno aguas arriba. Además, las principales diferencias

entre los años 1998 y 1999 (concentradas en el periodo de primavera) se ven disminuidas al calcular el promedio entre ambos.

- En caso de cometer un error en las temperaturas de entrada al embalse, es mejor que sea infravalorando las temperaturas puesto que en verano la temperatura (especialmente la de las capas superficiales) se autocorrigue y calienta debido a la radiación solar y el contacto con aire a elevada temperatura.

Con todo, se puede considerar que utilizar el promedio 1998 y 1999 de las temperaturas del agua promediadas semanalmente aporta una calidad suficiente para la temperatura de entrada y un error pequeño en comparación con el caso real de 1998. Por lo tanto se considera oportuno utilizar la temperatura promedio semanal de los años 1998 y 1999 de datos semanales para futuras simulaciones de otros años, como es el caso de los años 2009 y 2010. A partir de este estudio se realizó una tesina de final de carrera dirigida por la autora de esta tesis y E. Bladé que analizan el fenómeno en mayor detalle (Costa Castro, 2014).

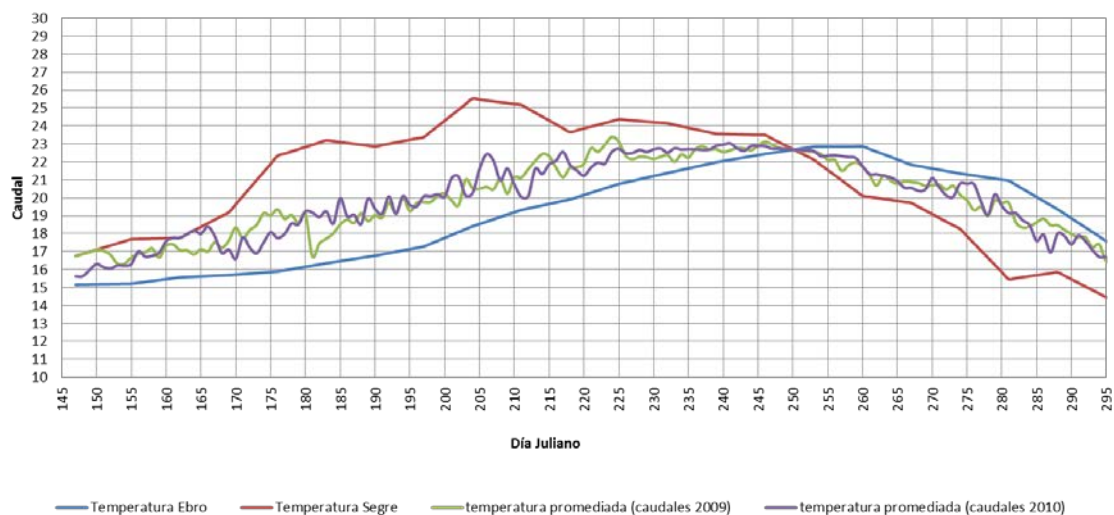


Figura 53. Temperatura promedio semanal a partir de los datos de los años 1998 y 1999. Entrada del río Ebro (azul), entrada del río Segre (rojo) y temperatura del agua promediada según los caudales medios diarios de 2009 (verde) y en lila según los caudales medios diarios de 2010 (lila).

Se puede notar cierta correlación entre la temperatura del agua del río Segre y la temperatura del aire (ver Figura 53 y Figura 43), aunque no sean exactamente las mismas condiciones meteorológicas que para los años 1998 y 1999. A grandes rasgos, el calentamiento del agua tiene lugar desde finales de primavera hasta mediados de verano (días 145 a 210). Después se puede apreciar cierta estabilización durante el periodo 200-250

en el orden de los 23-25.5 °C, hasta que a partir del día 247 las temperaturas disminuyen paulatinamente de los 23 °C a los 15 °C en 40 días.

En cuanto a la temperatura del río Ebro, es importante destacar que viene afectada por la presencia de la presa de Mequinenza, puesto que el agua sale de su hipolimnion donde la temperatura es inferior a la de las capas superficiales. Así, desde finales de primavera hasta finales de verano las temperaturas son considerablemente más frías que las del río Segre; observando diferencias de hasta 7 °C. La inercia al calentamiento del agua del embalse de Mequinenza hace que se alcancen los máximos en los días 250-260, del orden de los 23 °C. A partir de esta fecha, las temperaturas van disminuyendo desde los 23 a los 18 °C al final del periodo.

Es importante destacar que a partir del día 250 la temperatura del agua aportada por el río Ebro es superior a la del río Segre, con diferencias inferiores a los 5 grados (día 280).

5.2.1.4.2 *Boya de Almatret*

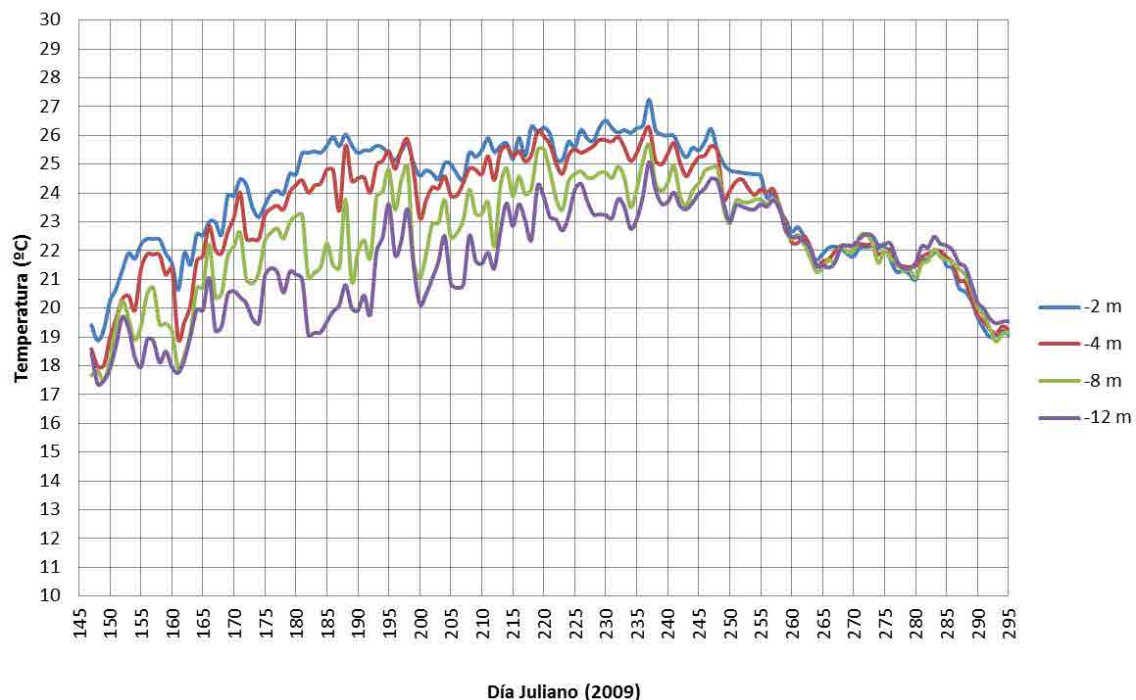


Figura 54. Evolución de la temperatura media diaria del agua a 2, 4, 8 y 12 m de profundidad, en la cadena de termistores de la boya de Almatret.

En el inicio del periodo de estudio del año 2009 (Figura 54) se empieza a notar la estratificación débil provocada por el avance de la primavera; especialmente en el

calentamiento de las capas más superficiales (2 y 4 m de profundidad). El incremento de temperatura del agua es importante, llegando a los 22.2 °C en superficie el día 158 y a unos 18-19 °C a 12 m de profundidad. En el día 160 hay una bajada de temperatura del agua provocando una disminución de 1 a 2 °C en toda la columna de agua (excepto en la cota más profunda). A partir de esta fecha, el incremento de temperaturas es creciente con algunos altibajos poco importantes en términos de estabilidad de la estratificación. La estratificación más acusada se presenta entre los días 180 y 190, donde se puede observar una diferencia de 7 grados entre la superficie y la capa situada a 12 m de profundidad. A partir del día 192 hay un aumento de la temperatura de las capas inferiores, y a 12 m de profundidad se llega a los 23 °C el día 195. Entre los días 195 y 205 hay cierta bajada de temperaturas, inicialmente en superficie pero que también repercute de manera importante en profundidad. Del día 205 al día 240 las temperaturas aumentan lentamente y se estabilizan entre los 25°C y 26 °C a 2 m y 4 m de profundidad, 24°C y 25 °C a 8 m de profundidad y 23 °C a los 12 m de profundidad. Se destaca la coincidencia en la evolución a las profundidades de 2 y 4 m, así como la similitud de las tendencias correspondientes a profundidades de 8 y 12 m. A partir del día 245 las temperaturas van disminuyendo progresivamente (más exageradamente en superficie) hasta que se juntan los 4 perfiles en el día 257, en que se puede decir que se rompe la termoclina definitivamente. A partir de este momento la masa de agua sigue prácticamente la misma evolución térmica, bajando gradualmente de los 23°C a los 21 °C (día 265), estabilizándose alrededor de los 22 °C para los días 265-285 y volviendo a bajar de los 22°C a los 18 °C hasta el final del periodo de estudio. Se destaca que para los últimos 20-25 días la línea correspondiente a la evolución térmica a 12 m de profundidad presenta temperaturas del agua ligeramente más altas que las capas superficiales.

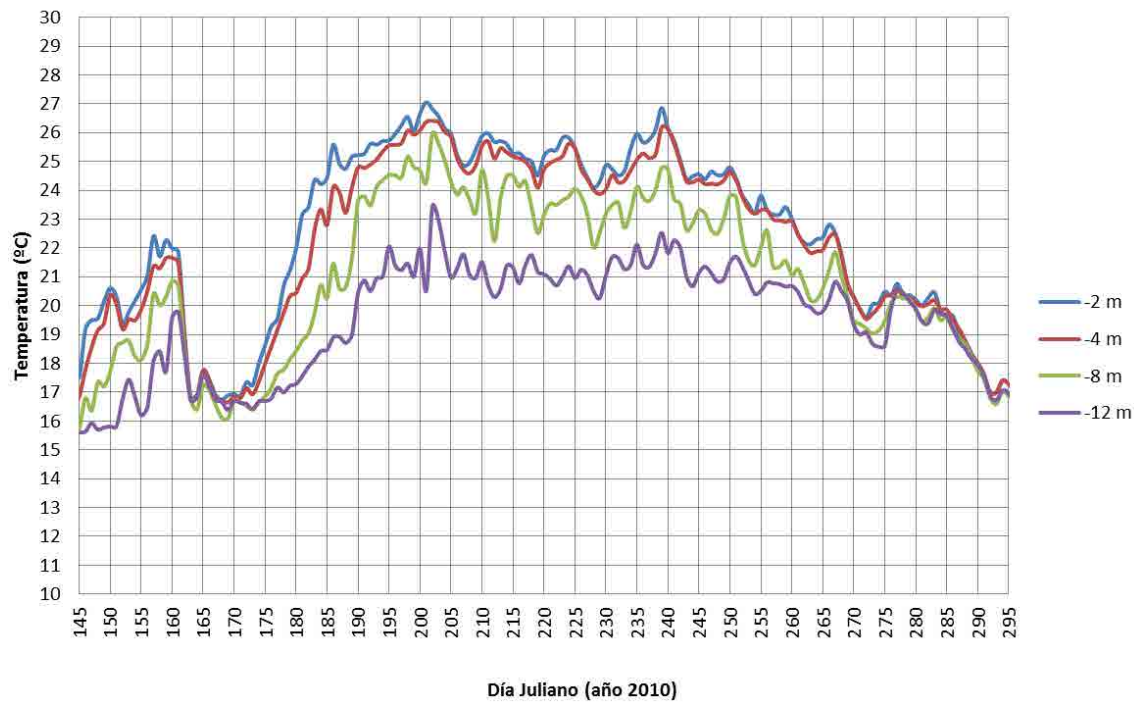


Figura 55. Evolución de la temperatura media diaria del agua (medias diarias) a distintas profundidades, en la cadena de termistores de la Boya de Almatret.

En relación al año 2010 (Figura 55), se observa que a partir del día 145 hay un ascenso gradual de temperaturas llegando a un máximo de 22 °C a 2 m de profundidad y empezándose a discernir la estratificación. El día 161 se produjo una avenida considerable que provoca la rotura de la estratificación, mezcla toda la masa de agua y la temperatura de la misma se mantiene entorno 17 °C. Este descenso de temperatura y rotura de la estratificación es debido a la entrada de elevados caudales (Figura 40) y descenso de la radiación solar neta (Figura 48). A partir de esta fecha, las temperaturas de cada capa se van recuperando gradualmente, volviéndose a notar un desarrollo de la estratificación a partir del día 170. La diferencia de temperaturas entre los termistores de la boya es máxima alrededor de los días 185-190 (en la que se presenta una diferencia de 6 grados entre la capa más superficial y la más profunda). Alrededor del día 190 la estratificación y las temperaturas del agua se estabilizan alrededor de 25°C a 26 °C en las capas más superficiales (con algún pico puntual que llega a los 27 °C los días 201 y 239), 23°C a 24 °C a 8 m de profundidad y 19 °C 12 m de profundidad. En el entorno del día 240 las temperaturas del agua empiezan a disminuir progresivamente (más fuertemente en las capas superficiales) hasta prácticamente coincidir en el día 270. A partir de este momento la masa del agua sigue prácticamente la misma

evolución térmica, bajando gradualmente de los 20 a los 17 °C en el final del periodo de estudio del año 2010.

Comparación 2009-2010

Las marcadas diferencias meteorológicas e hidrológicas entre los años 2009 y 2010 dificultan su comparación en cuanto a la respuesta térmica del agua. Las condiciones iniciales para ambos años son similares pero la evolución que siguen los perfiles de temperatura del agua en 2009 o en 2010 son diferentes. Así, en ambos casos, al inicio del periodo de estudio el embalse se encuentra débilmente estratificado, pero, mientras que en el año 2009, esta estratificación va aumentando paulatinamente (con altibajos en función de las condiciones meteorológicas y de caudales citados), el año 2010 presenta un truncamiento importante en el día 160, debido a la ocurrencia de una avenida procedente inicialmente del Segre (160-162) y ya finalmente del propio río Ebro (167-180). Este evento del 2010 provoca que se rompa la estratificación y que el embalse deba iniciar su estratificación nuevamente. La segunda estratificación de 2010 tiene lugar de manera más rápida puesto que las posteriores temperaturas del aire y la radiación son más elevadas. Finalmente, cabe mencionar que mientras que el año 2010 el embalse presenta mayores temperaturas en superficie al inicio del verano el año 2009 las presenta más hacia el final, ello también es en respuesta al comportamiento temperatura del aire.

Es importante destacar que a mayores profundidades (12 m) el año 2009 presenta valores de temperatura más elevados que el año 2010. Así, en el año 2010 la temperatura del agua se mantiene prácticamente constante entorno a los 21 °C durante todo el verano, sin embargo, en el año 2009 el mismo perfil sigue aumentando hasta los 23.5 °C.

5.2.1.4.3 Plataforma Flumen

La evolución térmica de la columna de agua en las proximidades de la presa se obtiene del sensor de temperatura instalado en la sonda multiparamétrica. La Figura 56 muestra la evolución térmica de la columna de agua para el periodo de estudio del año 2009 y la Figura 57 la correspondiente al periodo de estudio del año 2010, en la vertical de la plataforma de registro, situada aproximadamente a un kilómetro de la presa de Ribarroja.

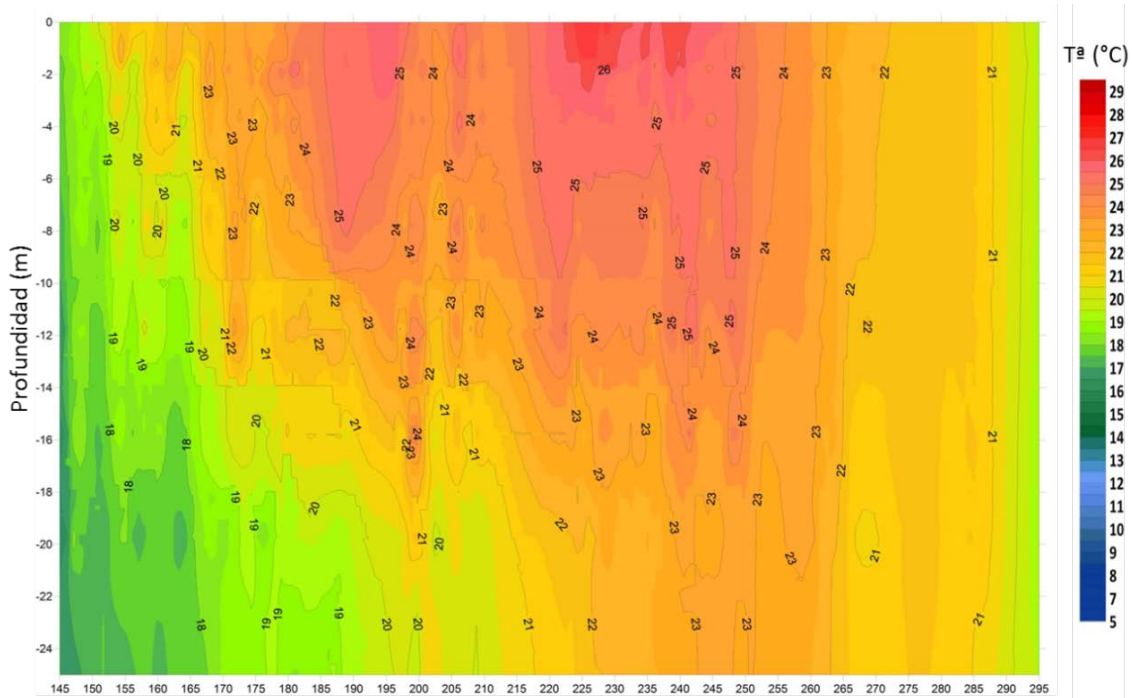


Figura 56. Evolución del perfil vertical de temperatura medido en la plataforma Flumen, para el periodo 145-295 del año 2009. Plataforma situada aproximadamente a un kilómetro de la presa de Ribarroja. Medidas cada 6h. Se han interpolado los periodos con falta de datos.

En la Figura 18 puede apreciarse que al inicio del periodo de estudio del año 2009 se puede observar la aparición de cierta estratificación muy débil (16 °C en el fondo y 18 °C en la superficie) debido al avance de la primavera. Hay un incremento gradual pero con ciertos escalones de las temperaturas (especialmente en superficie) con descensos un poco más acentuados (días 156 o 165). En el día 165 se produce una caída en la temperatura del agua provocando una disminución de 1 a 2 °C en toda la columna de agua, excepto a profundidades importantes que aún no se habían calentado lo suficiente. A partir de esta fecha, el incremento de temperaturas es continuado con algunos altibajos poco importantes en términos de estabilidad de la estratificación. La estratificación más acusada se presenta entre los días 190-195, donde se puede observar una diferencia de 6°C a 7 °C entre la superficie y el fondo. Entre los días 195 y 215 se da un descenso de temperaturas en toda la masa de agua. Del día 215 al día 250 las temperaturas aumentan y se estabilizan entre los 26°C y 28 °C en superficie, y entre 24 °C y 25 °C a 10 m de profundidad, 23 °C a los 12 m de profundidad, y 22 °C en capas inferiores. A partir del día 250 las temperaturas van disminuyendo progresivamente, haciéndolo más notoriamente en superficie, hasta que se uniformizan en toda la vertical hacia el día 260, de forma semejante a la que ocurría en la boya de Almatret (Figura 54). A partir de este momento la masa del agua sigue prácticamente la misma

evolución térmica, bajando gradualmente de los 23 °C, estabilizándose alrededor de los 22 °C para el periodo 265-285 y volviendo a bajar de los 22 a los 18 °C hasta el final del periodo de estudio.

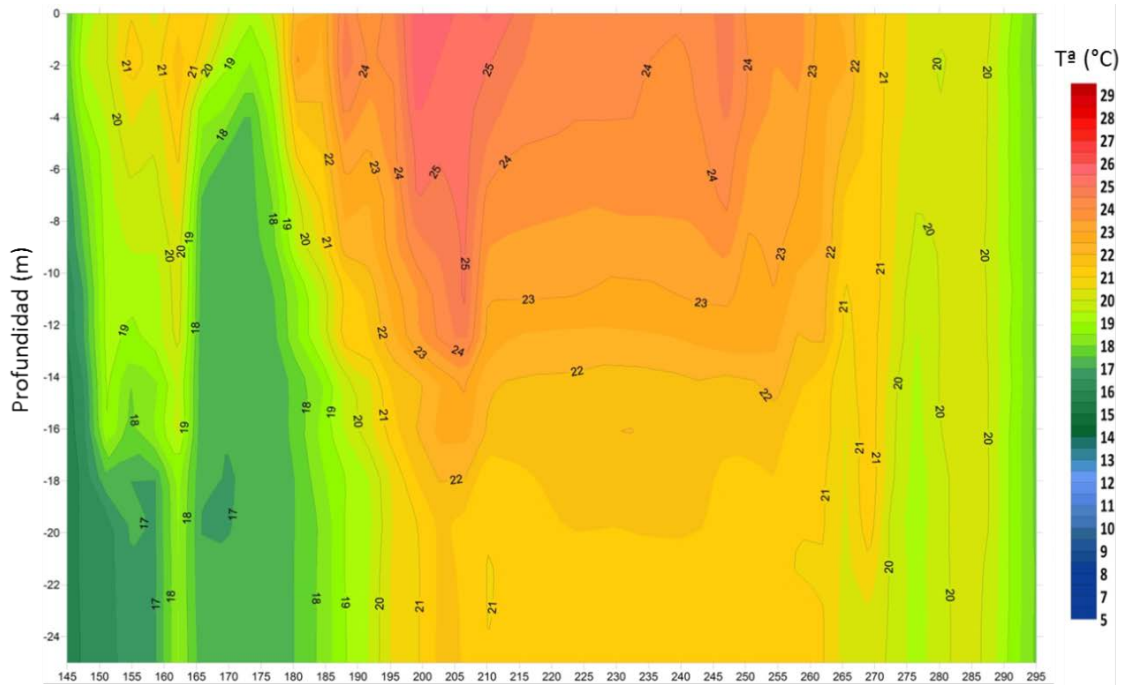


Figura 57. Evolución del perfil vertical de temperatura medido en la plataforma Flumen, para el periodo 145-295 del año 2010. Plataforma situada aproximadamente a un kilómetro de la presa de Ribarroja. Medidas cada 6h. Se han interpolado los periodos con falta de datos.

Por otro lado, durante el año 2010 (Figura 57), puede apreciarse que a partir del día 145 se produce un ascenso gradual de la temperatura llegando a los 20 °C o 21 °C en superficie, 19 °C a 10 m de profundidad y 17 °C a mayor profundidad. Alrededor del día 160 la estratificación ya es notoria. El día 161 se produce un descenso brusco que provoca la rotura de la estratificación, mezcla toda la masa de agua y la deja entorno los 17 °C, excepto las capas más superficiales que muestran uno o dos grados de diferencia. A partir de este momento las temperaturas de cada capa van recobrando calor gradualmente y se vuelve a notar un desarrollo de la estratificación a partir del día 175 llegando a un máximo en el periodo 200-215. Alrededor del día 250 las temperaturas del agua empiezan a disminuir progresivamente hasta prácticamente romperse la termoclina alrededor del día 265. A partir de este momento la masa del agua sigue prácticamente la misma evolución térmica, bajando gradualmente de los 21°C a los 18 °C en el final del periodo de estudio.

Comparación 2009-2010

Las marcadas diferencias meteorológicas y de caudales entre los años 2009 y 2010 dificultan su comparación en cuanto a la respuesta térmica del agua. Al inicio del periodo de estudio el embalse se encuentra débilmente estratificado, mientras que en el caso de 2009 esta estratificación va aumentando paulatinamente el año 2010 presenta un truncamiento importante en el día 163 (cuando llega la avenida). Este evento que tiene lugar en el año 2010 hace que se rompa la estratificación y el embalse deba volver a empezar a estratificarse de nuevo. Mientras que el año 2010 presenta mayores temperaturas en superficie al inicio del verano el año 2009 las presenta más hacia el final, esto también es en respuesta a la temperatura del aire.

Es importante destacar que a mayores profundidades (16 m) el año 2009 presenta valores de temperatura más elevados que el año 2010. De esta forma: mientras que el 2010 se mantiene prácticamente constante a los 21 °C durante todo el verano, el mismo perfil sigue aumentando hasta los 23.5 °C en el año 2009.

En las épocas centrales del verano la estratificación es más estable en 2010 que en 2009.

En ambos años, alrededor del día 250 las temperaturas del agua empiezan a disminuir progresivamente hasta prácticamente romperse la termoclina alrededor de los días 260-270. A partir de este momento, toda la masa del agua sigue prácticamente la misma evolución térmica, bajando gradualmente hasta los 18 °C en el final del periodo de estudio.

5.2.1.5 Velocidades horizontales del agua en el embalse

5.2.1.5.1 Sonda multiparamétrica Flumen

La evolución de la componente horizontales de la velocidad de la columna de agua en las proximidades de la presa se obtienen del sensor de velocidad instalado en la sonda multiparamétrica. La Figura 58 muestra la evolución de las velocidades en la columna de agua para el periodo de estudio 2009 y la Figura 59 la correspondiente al periodo de estudio 2010.

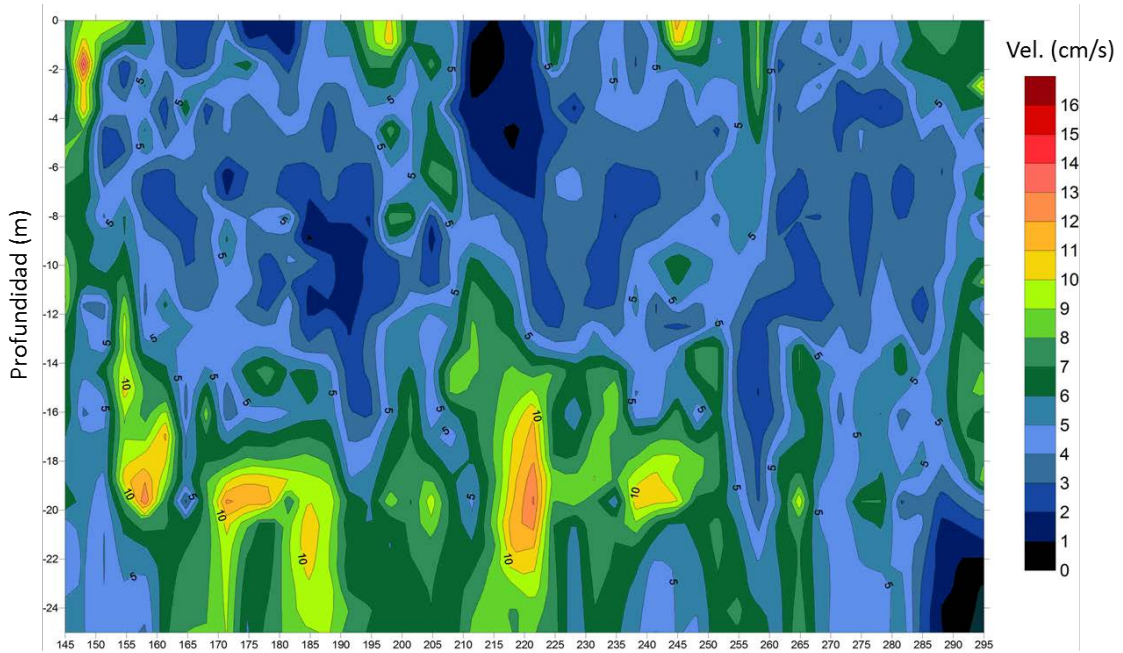


Figura 58. Evolución del perfil vertical de velocidades horizontales del agua medido en la plataforma Flumen, para el periodo 145 al 295 del año 2009. Medidas cada 6h. Se han interpolado los periodos con falta de datos.

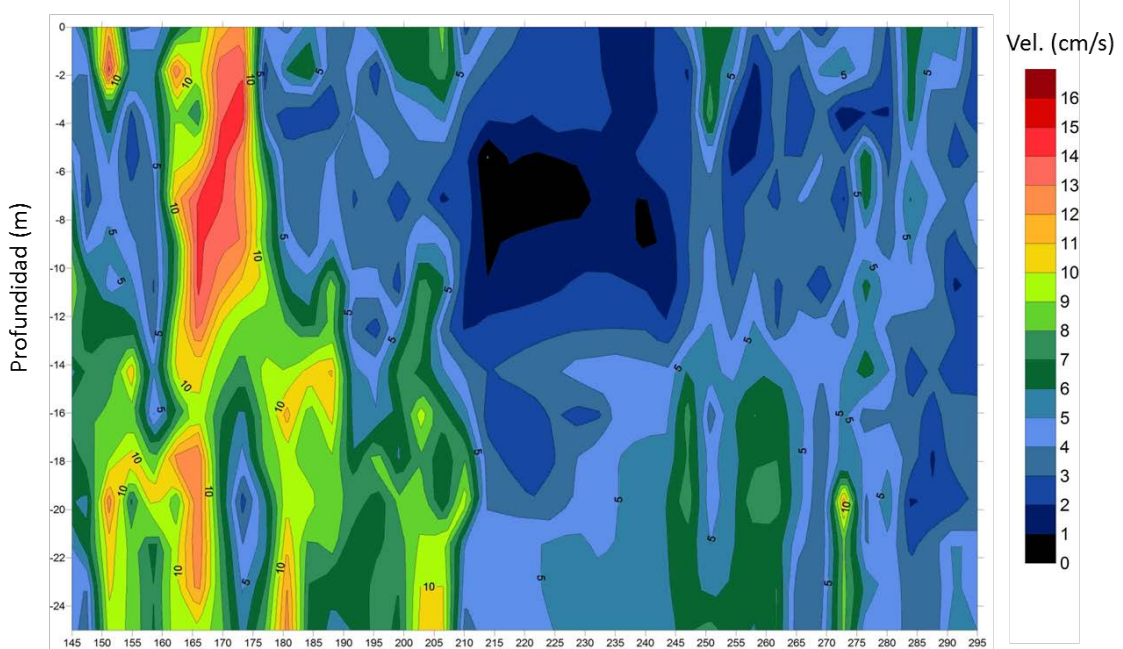


Figura 59. Evolución del perfil vertical de velocidades horizontales medido en la plataforma Flumen, para el periodo 145-295 del año 2010. Medidas cada 6h. Se han interpolado los vacíos y periodos con falta de datos.

En el año 2010 se destacan las velocidades importantes que tienen lugar en el periodo 145-205, que se correlacionan directamente con los picos de caudal producidos por la avenida ocurrida en dicho periodo. Alrededor de los días 160-170 se aprecian velocidades importantes en toda la columna de agua (llegando a los 15 cm/s). En el periodo de

estratificación se tienen velocidades pequeñas en superficie, es decir agua prácticamente quieta en algunos momentos, y un poco mayores en profundidad.

Comparación 2009-2010

Los años 2009 y 2010 difieren en cuanto a régimen de caudales por lo que también se nota esta diferencia en la evolución de las velocidades de la columna de agua a lo largo del periodo de estudio.

En verano el agua situada en las capas superficiales se mueve poco, cuando la estratificación es estable las velocidades horizontales de los 10 metros superficiales son del orden de los 2 cm/s mientras que a mayores profundidades son de hasta 8-10 cm/s con algunos picos de 15 cm/s puntualmente (coincidiendo con picos de caudal).

En el año 2010 se destacan las velocidades importantes que tienen lugar en el periodo 145-205, que se correlacionan directamente con los picos de caudal producidos por la avenida, según la temperatura del agua de entrada se observa que la circulación es inicialmente superficial (procedente del Segre) y luego profunda (agua más fría y procedente de la presa de Mequinenza).

De acuerdo con los datos de caudal, el verano de 2010 es más estable y tranquilo que el de 2009 que tiene algunos picos de caudal. En 2009 los eventos de caudales en verano con el embalse estratificado originan pequeños picos de velocidad del orden de los 10-12 cm/s situados a profundidades de 20 m. Esto es debido a que los picos proceden del Ebro y al tener baja temperatura el agua se posiciona por densidad en las capas inferiores.

En otoño de 2009 y de 2010 no se aprecian avenidas importantes que afecten la estabilidad del embalse, las velocidades son del orden de los 6 cm/s en toda la columna a partir del día 250 aproximadamente. Se observan el pico del día 265 en el año 2009 y el pico del día 272 en el 2010, hechos que influyen en la mezcla y la rotura de la termoclina ya debilitada.

5.2.2 Evolución térmica del embalse

En este apartado se estudia la evolución térmica del embalse para el año 2009 (apartado 5.2.2.1) y 2010 (apartado 5.2.2.2). Se analiza la incidencia de las entradas y su correspondiente temperatura, así como la de los eventos meteorológicos.

5.2.2.1 Año 2009

Para las series de temperatura de las entradas de caudal se han utilizado los promedios semanales de la media de los años 1998-1999. La Figura 60 muestra la evolución térmica del caudal del río Ebro saliendo por la presa de Mequinenza (en azul), el río Segre (en rojo) y se ha calculado también la temperatura de la mezcla de aguas promediada en función de los caudales del río Ebro y el río Segre (en verde).

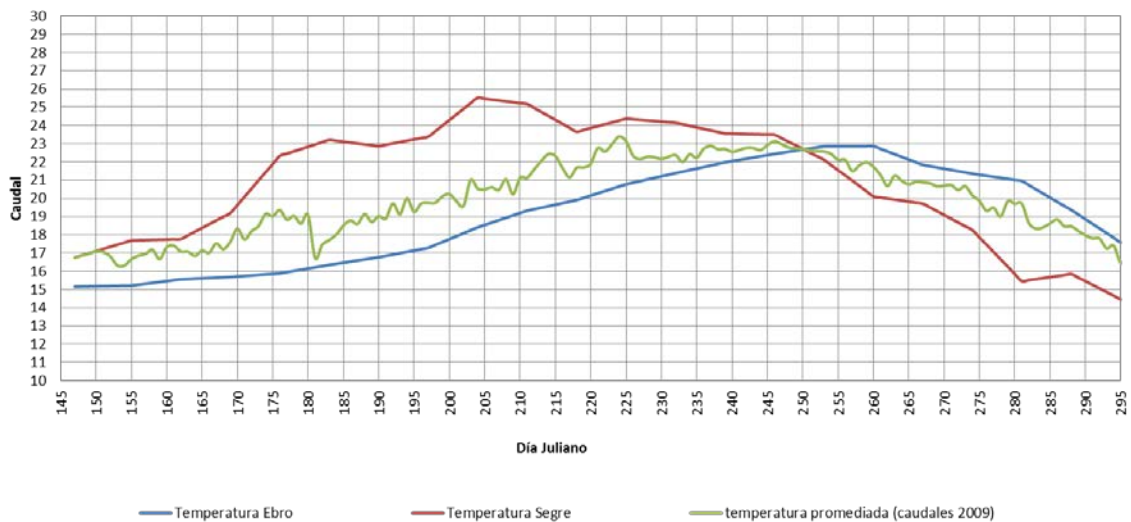


Figura 60. Evolución térmica del río Ebro, del río Segre y de la mezcla de ambos (temperatura promediada en función el caudal medio diario de cada entrada). Periodo de estudio del año 2009. Valores medios semanales.

En cuanto a las temperaturas del río Ebro es importante destacar que viene afectada por la presencia de la presa de Mequinenza, por lo que el agua sale del hipolimnion del embalse donde la temperatura es inferior a la de las capas superficiales. Así, desde finales de primavera a finales de verano las temperaturas son considerablemente más frías que las del río Segre; llegando a diferencias de hasta 7 °C. Esto provocará que entradas de caudal procedentes del río Ebro enfríen la temperatura media del embalse. La inercia al calentamiento del agua del embalse de Mequinenza hace que se alcancen los máximos en los días 250-260, del orden de los 23 °C. A partir de estos días la temperatura de entrada del

agua es superior a la temperatura del agua del embalse, por lo que para este periodo de tiempo el agua aportada por el río Ebro favorecería el calentamiento del embalse. A partir de esta fecha, las temperaturas van disminuyendo de los 23 a los 18 °C al final del periodo.

En la Figura 61 se compara la evolución de la temperatura del agua a diferentes profundidades en la boya de Almatret con los caudales en la entrada al embalse y su temperatura. Se destaca el efecto-respuesta entre los caudales de entrada y la modificación de la temperatura del agua en función de la profundidad. A fin de correlacionar los picos de caudal con las variaciones de temperatura en la columna de agua, en la misma Figura 61 se han marcado algunos de los eventos más claros.

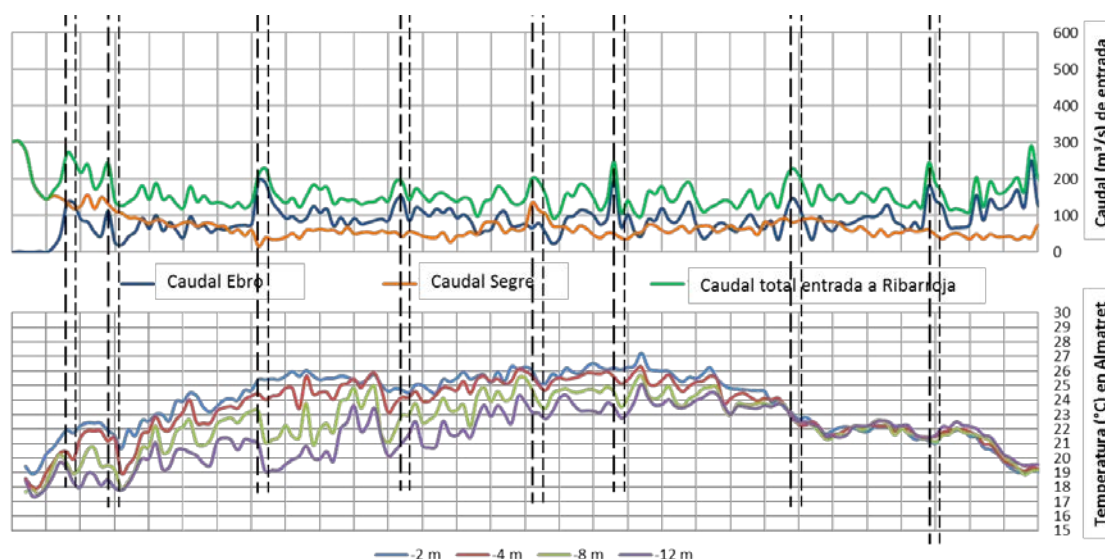


Figura 61. Correlación de la evolución térmica del agua a diferentes profundidades en la boya Almatret con los caudales de entrada al embalse de Ribarroja de Ebro (río Ebro en azul, río Segre en naranja y mezcla en verde). Periodo de estudio del año 2009. Valores medios diarios.

En la Figura 62 se correlacionan los caudales (río Ebro en azul y río Segre en rojo) correspondientes al año 2009 con la respuesta térmica del embalse en la zona de la plataforma Flumen. El retraso entre los picos de caudal y su respuesta en la columna de agua de la plataforma Flumen da una idea del tiempo de tránsito del pico de caudal entre la entrada y la llegada a la plataforma.

Es importante correlacionar los picos de caudal con su temperatura, especialmente en el caso del río Ebro. Durante los meses de primavera y verano se aporta agua considerablemente más fría que la del embalse, por lo que pequeños picos afectan enfriando la masa de agua especialmente en profundidad. En otoño la respuesta es la contraria, el efecto

del río Ebro calienta la masa de agua, aun así, la masa ya no se encuentra estratificada y el efecto queda diluido.

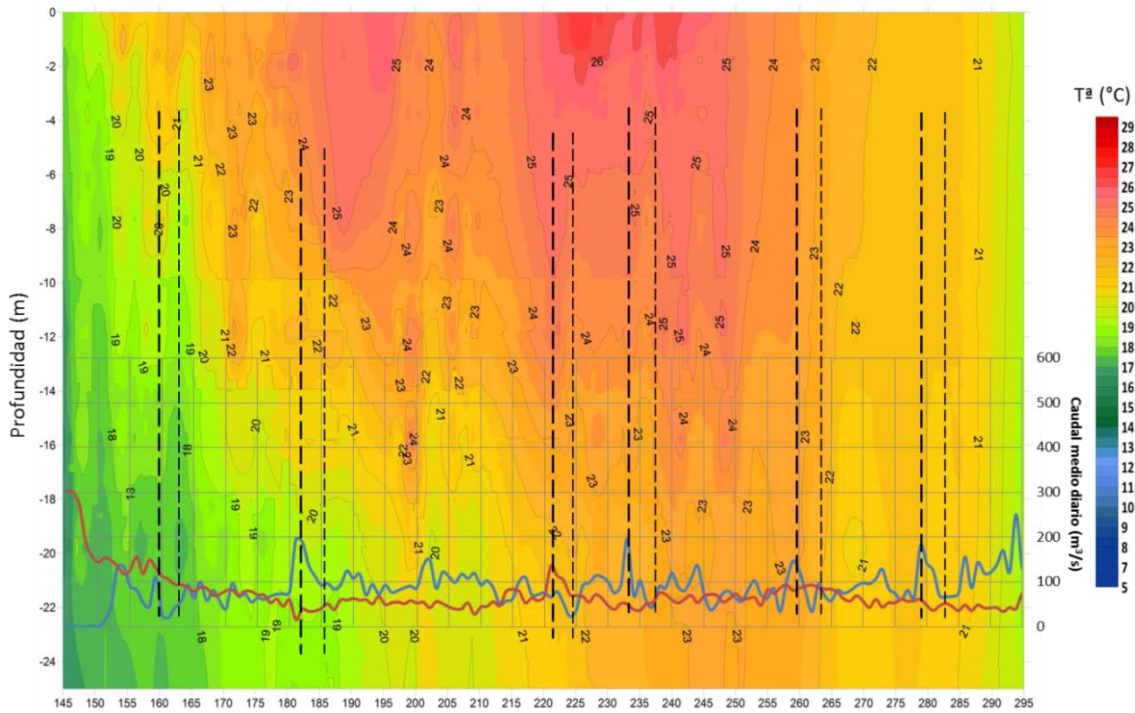


Figura 62. Correlación de las entradas de caudales medios diarios (río Ebro en azul y río Segre en rojo) con la evolución térmica de la columna de agua medida por la sonda multiparamétrica Flumen (medidas cada 6 h). Periodo de estudio del año 2009. Pico de caudal (línea discontinua gruesa), respuesta en la columna de agua (línea discontinua fina).

Para tener una idea de la posición en que se situaría el agua de las entradas Segre (rojo) y Ebro (azul) en función de su temperatura, y consecuentemente de su densidad, se presenta el esquema de la Figura 63.

Se puede observar una clara circulación profunda del río Ebro hasta el día 250, por lo que el caudal aportado por el río Ebro circularía por el fondo del embalse y abastecería la zona del hipolimnion. Suponiendo que no hay modificación importante de la temperatura del agua de las entradas y que no haya mezcla ni difusión térmica a lo largo del recorrido del tramo de río el agua aportada por el Segre circularía por la parte profunda al inicio del periodo de estudio 2009 pero a medida que el río Segre gana temperatura el agua reduce su densidad y se sitúa a niveles más superficiales. Durante el periodo 180-250 el caudal del Segre alimentaría la zona de la termoclina y el epilimnion. Es de especial interés la fecha 250 puesto que es cuando ambos ríos se intercambian los papeles y el Segre, con la consecuente disminución de temperaturas provocada por la meteorología, pasaría a circular por el hipolimnion mientras

que el Ebro aporta temperaturas similares a la temperatura del embalse, favoreciendo la mezcla.

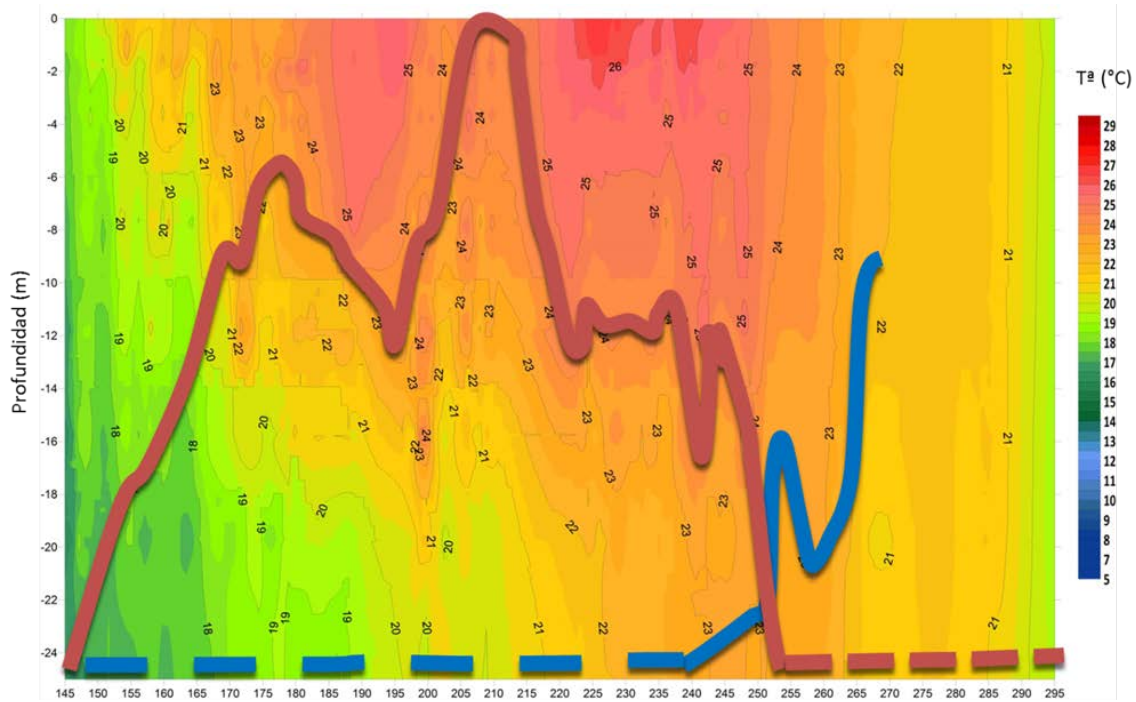


Figura 63. Suposición de la circulación de los caudales de entrada del río ebro (azul) y del río Segre (rojo) al embalse de Ribarroja en función de su temperatura en la zona de la plataforma Flumen Posición de la temperatura de los caudales de entrada al embalse en función de su temperatura (línea continua), agua de entrada con temperatura inferior a las del gráfico (línea discontinua). Periodo de estudio del año 2009.

La Figura 64 combina la información térmica proporcionada por la Boya de Almatret y la información de la columna de agua en la plataforma Flumen (proximidades de la presa de Ribarroja). Es de especial interés notar cierto retraso en los eventos que perturban la estratificación de ambos puntos. Se debe tener en cuenta que hay una distancia de aproximadamente 15 kilómetros entre ambos. Esta figura y sus correspondientes datos se han utilizado para el estudio del tiempo de tránsito entre ambos puntos de estudio que se presenta en el apartado 5.2.3.

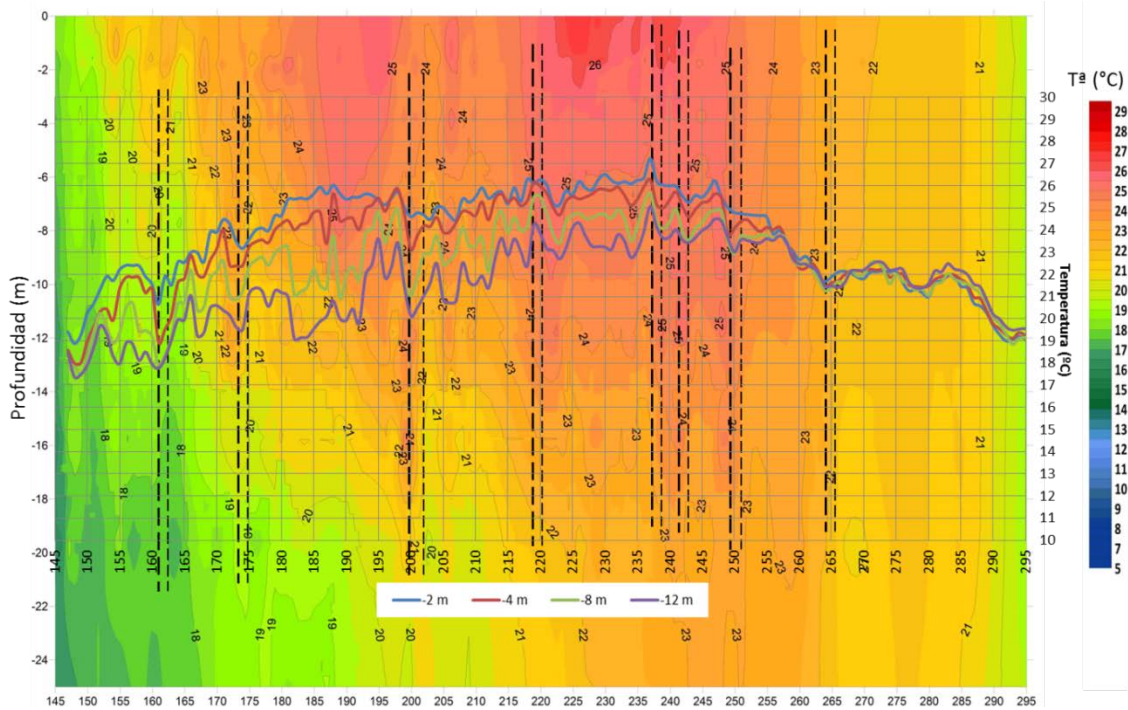


Figura 64. Comparación de la temperatura del agua medida en la boya de almatret con la temperatura del agua medida en la Plataforma Flumen (a unos 300 m aguas arriba de la presa de Ribarroja). Periodo de estudio del año 2009.

5.2.2.2 Año 2010

Para las series de temperatura de las entradas de caudal, se han utilizado los promedios semanales de la media de los años 1998 y 1999. La Figura 65 muestra la evolución térmica del caudal del río Ebro saliendo de la presa de Mequinenza (azul), el río Segre (rojo) y se ha calculado también la temperatura de la mezcla de aguas promediada en función de los caudales del río Ebro y del río Segre (lila). Se observa que la evolución de temperaturas es semejante a la del año 2009 (apartado anterior) y cabe hacer los mismos comentarios.

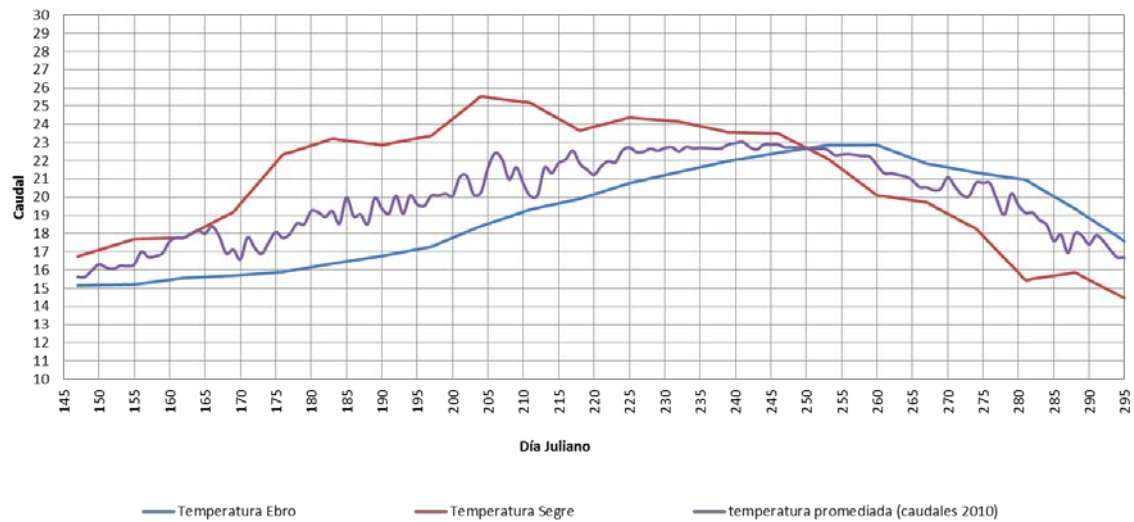


Figura 65. Evolución térmica del río Ebro, del río Segre y de la mezcla de ambos (temperatura promediada en función el caudal medio diario de cada entrada). Periodo de estudio del año 2010. Valores medios semanales.

En la Figura 66 se compara la evolución de la temperatura del agua en la boya de Almatret para distintas profundidades (2, 4, 8 y 12 m). Se correlacionan los picos de caudal con variaciones de temperatura en la columna de agua, y se han marcado algunos de los ejemplos más claros en líneas punteadas negras; en el apartado siguiente se analiza el tiempo de tránsito con más detalle.

Se destaca la entrada de caudales importantes durante los días julianos 160 a 175, provocando la rotura de la termoclina cuando el embalse se empezaba a estratificar. Otros efectos de picos de caudal y su respuesta en la columna de agua se pueden notar en verano, con los picos de los días 212, 220 y 243.

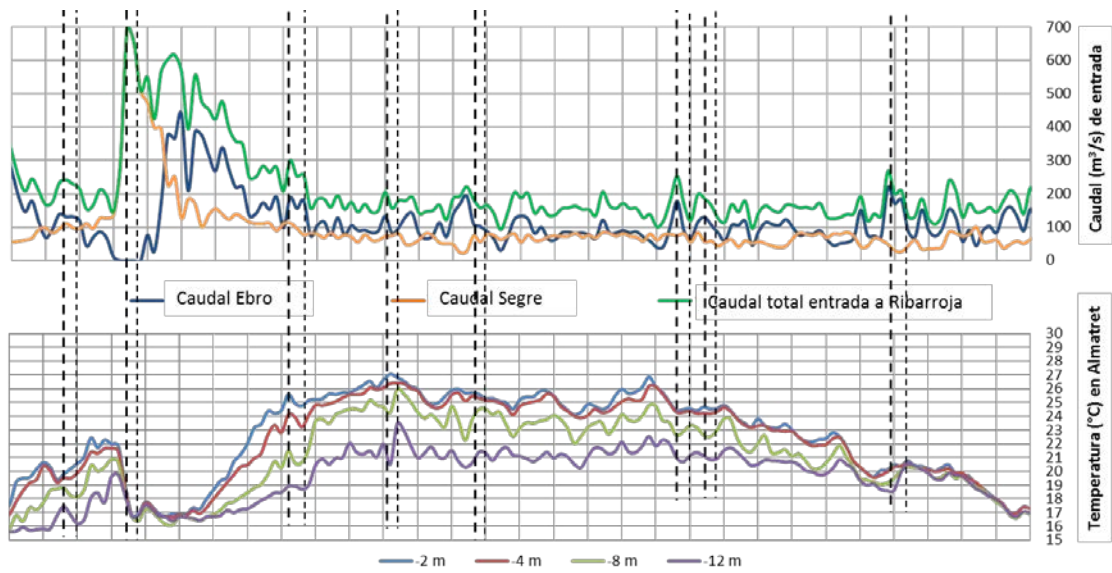


Figura 66. Correlación de la evolución térmica del agua a diferentes profundidades (boya de Almatret) con los caudales de entrada al embalse de Ribarroja de Ebro. Periodo de estudio del año 2010.

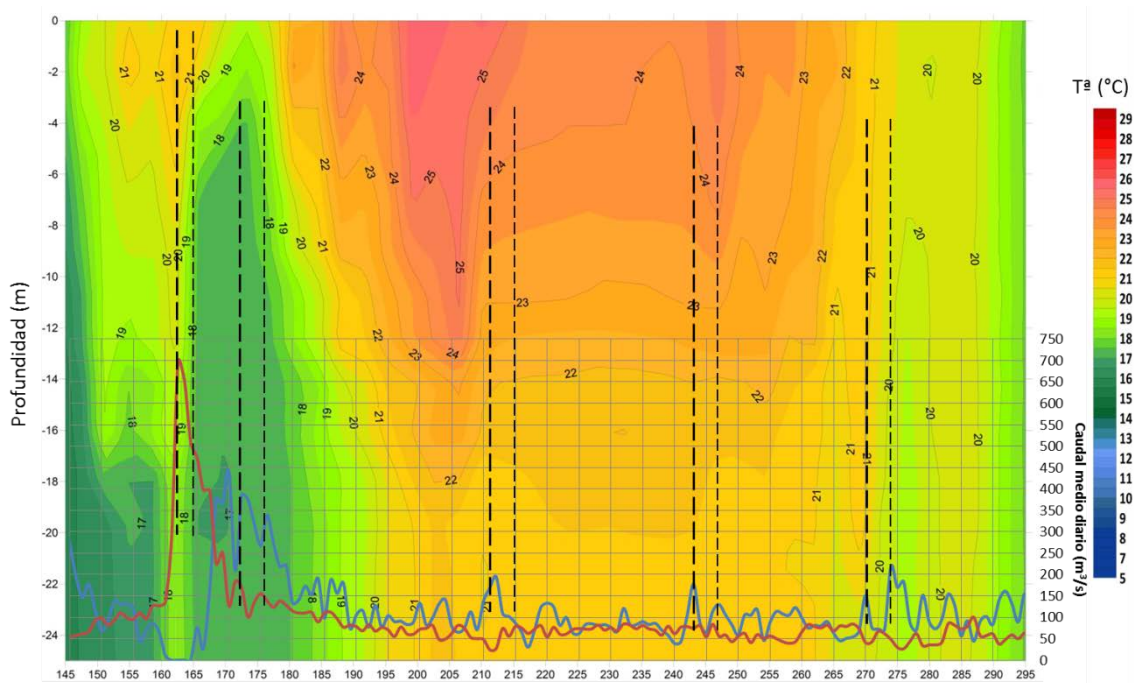


Figura 67. Correlación de las entradas de caudales medios diarios (río Ebro en azul y río Segre en rojo) con la evolución térmica de la columna de agua medida por la sonda multiparamétrica Flumen (medidas cada 6 h). Periodo de estudio del año 2010.

En la Figura 67 se correlacionan los caudales en el río Ebro (azul) y en el río Segre (rojo) correspondientes al año 2010 con la respuesta térmica del embalse en la zona de la plataforma Flumen. El retraso entre los picos de caudal y su respuesta en la columna de agua da una idea del tiempo de tránsito del pico.

Con el fin de discernir la posición y el efecto de los diferentes caudales de entrada y su temperatura en el embalse, se presenta la Figura 68, en la que se puede ver la evolución térmica de la columna de agua en la plataforma Flumen (fondo) y por dónde circularían los caudales del río Segre (rojo) y del río Ebro (azul) en función de su temperatura. Se supone que no hay mezcla de caudales a lo largo del tránsito desde la entrada hasta la plataforma y también se supone que no ha habido pérdidas de calor en el transcurso.

Se destaca una clara circulación hipolimnética del río Ebro hasta el día 240 en que empieza a ganar temperatura y consecuentemente pierde densidad. Mientras que el agua que llegaría por el Segre se situaría en las zonas más calientes y menos profundas, siguiendo la temperatura del epilimnion hasta aproximadamente el día 250.

En el día 250 los caudales de entrada tendrían la misma temperatura, y se posicionarían alrededor de los 8 m de profundidad. Análogamente al año 2009, a partir de este día, el río Ebro circularía más superficialmente y en toda la columna de agua, puesto que el embalse ya se encuentra mezclado, mientras que el río Segre se hundiría ya que llegaría con temperaturas inferiores a las que conserva el embalse por la inercia térmica.

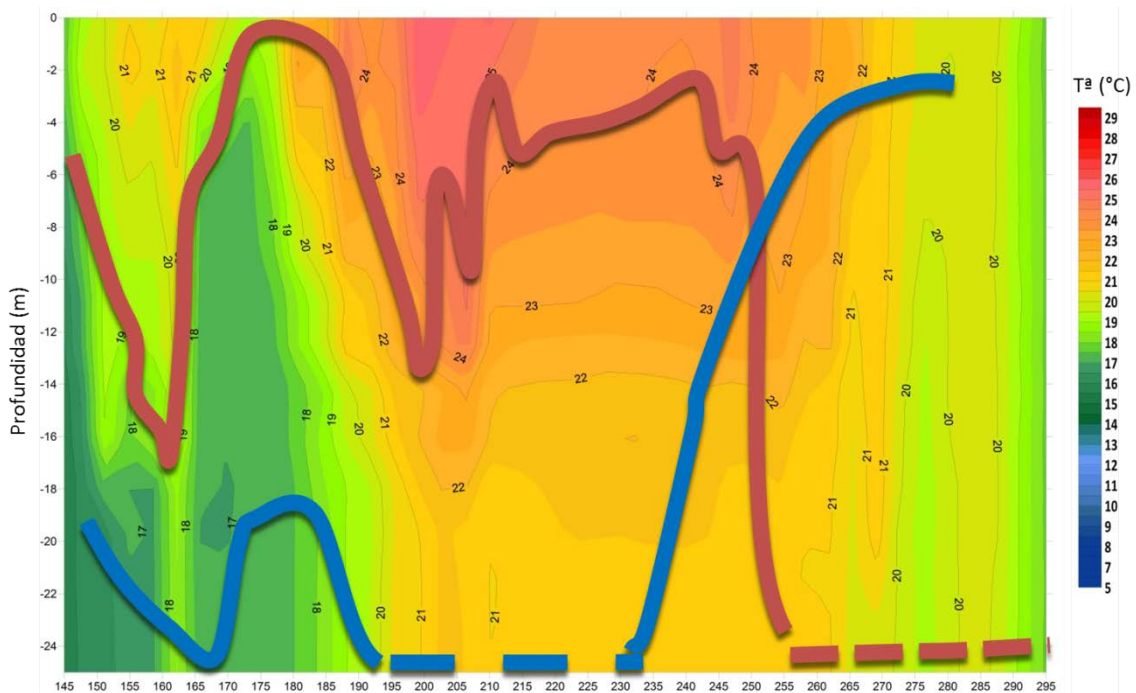


Figura 68. Suposición de la circulación de los caudales de entrada del río ebro (azul) y del río Segre (rojo) al embalse de Ribarroja en función de su temperatura en la zona de la plataforma Flumen Posición de la temperatura de los caudales de entrada al embalse en función de su temperatura (línea continua), agua de entrada con temperatura inferior a las del gráfico (línea discontinua). Periodo de estudio del año 2009 2010.

Cabe destacar la importancia de la temperatura de entrada, especialmente para el periodo entre los días 162 a 180 en que el agua entrante por el río Ebro se encuentra a unos 16 °C, efecto que enfría considerablemente el agua del embalse. Los picos que se dan en verano también enfrían la masa de agua, aunque los efectos son menos importantes y básicamente en la zona de mayor profundidad, puesto que el Ebro circula por el hipolimnion. A partir del día 250 los picos de caudal aportan caudales de la misma temperatura o un poco más calientes que el agua del embalse, por este motivo, los efectos de los picos son menos notorios aunque se trate de caudales del mismo orden de magnitud.

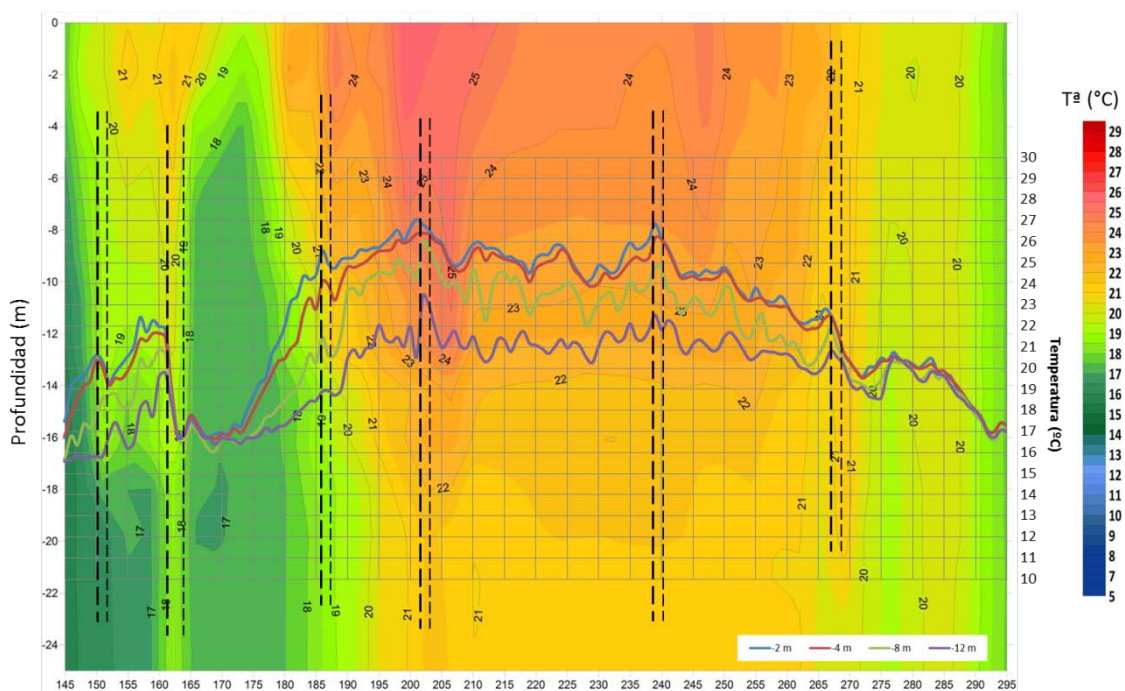


Figura 69. Comparación de la temperatura del agua medida en la boya de Almatret con la temperatura del agua medida en la Plataforma Flumen (a unos 300 m aguas arriba de la presa de Ribarroja). Periodo de estudio del año 2010.

En la Figura 69 se combina la información térmica proporcionada por la boya de Almatret y la información de la columna de agua en la plataforma Flumen situada en las proximidades de la presa de Ribarroja. Es de especial interés notar cierto retraso en los eventos de perturbación que afectan a la estratificación de ambos puntos. Se debe tener en cuenta que hay una distancia de aproximadamente 15 kilómetros entre ambos.

5.2.3 Tiempo de tránsito en el embalse

En este apartado se analiza el tiempo de viaje del transitorio entre las entradas y los puntos de muestreo, concretamente la boya de Almatret y la plataforma Flumen, en función del caudal y de las condiciones de estratificación del embalse. Para ello, se han tomado algunos picos de caudal como referencia para el año 2009 (Figura 61, Figura 62 y Figura 64) y el año 2010 (Figura 66, Figura 67 y Figura 69) señalados mediante líneas punteadas y se estudia el avance del frente cinemático desde el pico correspondiente (caudal de entrada) hasta la respuesta térmica provocada en la columna de agua aguas abajo en los dos puntos de muestreo (boya y plataforma).

La Figura 70 muestra los incrementos de tiempo correspondientes al avance los picos de caudal analizados.

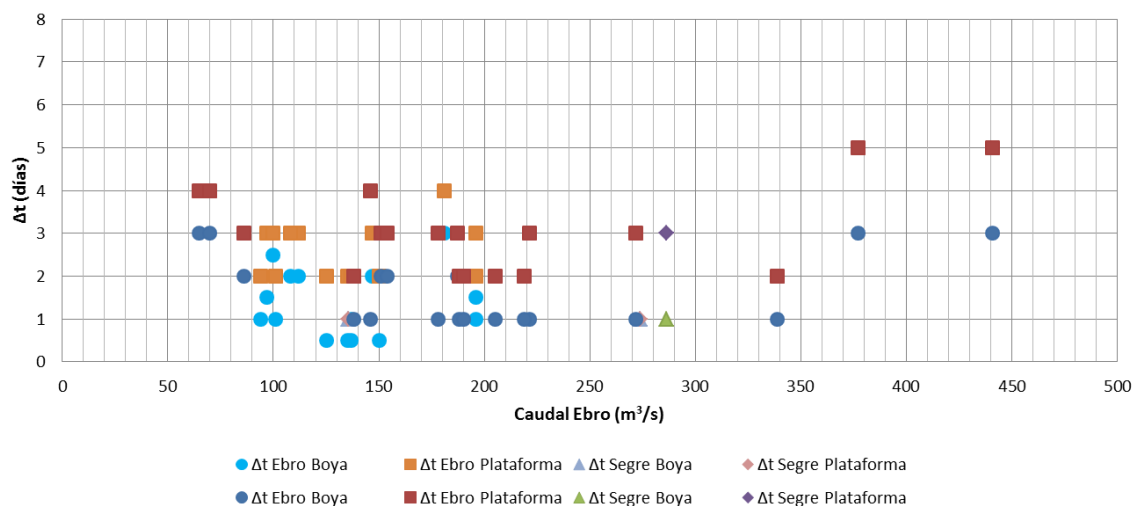


Figura 70. Incrementos de tiempo (Δt) del avance de los picos de caudal seleccionados, para el estudio de los años 2009 y 2010.

La tendencia observada en el avance de los transitorios tanto para caudales procedentes del río Ebro como del río Segre es la siguiente:

- Para caudales inferiores a los 80 m³/s el frente de onda tarda unos 3 días en llegar a la boya situada en Almatret y unos 2 días más en llegar a la plataforma, sumando unos 5 días de tránsito entre la entrada y la salida por la presa.

- Para caudales superiores a los 80 m³/s el tiempo de circulación se reduce, por lo tanto, el tiempo que tarda en llegar a la boya se encuentra entre 0.5 y 1 día alcanzando los 2 días

para caudales en el entorno de 100 m³/s; de la misma manera tarda entre 2 y 3 días en llegar a la plataforma multiparamétrica Flumen.

· Para los picos de caudal muestreados en el año 2010, superiores a los 350 m³/s, no se sigue la misma pauta y se puede observar una irregularidad en las tendencias generales. Esto es debido a efectos de la gestión y operación tanto de Ribarroja como de Mequinenza. Es de importancia señalar que los picos de los caudales superiores a los 350 m³/s supusieron avenidas importantes y se operó la presa de Ribarroja vertiendo por el aliviadero (días 168, 170 y 171 del año 2010).

Además, con el estudio térmico-hidrodinámico del embalse también se ha notado que la respuesta del mismo a los picos de caudal no depende únicamente de la magnitud de dicho caudal sino también de cómo se encuentre estratificado el embalse.

5.2.4 Discusión

Los fenómenos meteorológicos, concretamente el efecto de la radiación y de la temperatura del aire, afectan directamente a la temperatura del agua, especialmente la temperatura superficial; el efecto de la respuesta térmica es inmediato en la capa superficial mientras que para capas inferiores presenta cierto retraso debido a la inercia térmica del agua.

Se observa una correlación directa entre los picos de caudal y las modificaciones de la columna de agua. Especialmente para avenidas del río Ebro en primavera y principios de verano, el agua que entra es considerablemente más fría que la del embalse. En otoño la temperatura del caudal de entrada por el río Ebro equipara o supera la temperatura del embalse.

Durante la primavera y el verano se puede observar la tendencia del río Ebro a circular por la parte más profunda en función de su temperatura y densidad, por lo que los aportes de caudal se realizan al hipolimnion. En otoño, esta tendencia cambia y los aportes de caudal del río Ebro afectan a toda la columna de agua, favoreciendo la mezcla del embalse. Las entradas procedentes del río Segre circularían por las zonas más profundas en primavera y en otoño, pero se posicionarían más superficialmente en verano, siguiendo la evolución térmica del epilimnion.

El agua de entrada por el río Ebro es más fría que la del río Segre hasta aproximadamente el día 250, a partir de esta fecha el comportamiento se invierte, es decir el agua del río Segre es más caliente que la del río Ebro; esto influye tanto en la rotura de la termoclina como en la estratificación “inversa” débil que se puede apreciar al final del periodo de estudio.

Los años 2009 y 2010 presentan diferencias importantes en el comportamiento hidrodinámico; éstas son debidas a las condiciones meteorológicas de la zona de estudio. El año 2010 presenta una avenida importante en primavera que rompe totalmente la termoclina y se generan dos episodios de estratificación en un mismo año.

La rotura de la termoclina en el año 2009 es alrededor del día 255, cuando existe disminución importante de temperaturas del aire. Las capas superficiales se enfrían, por lo que las capas más profundas y más superficiales quedan aproximadamente a la misma temperatura y una pequeña avenida procedente del río Ebro desestabiliza la columna de estratificación débil; Ello hace que la estratificación se rompa. El agua queda mezclada a unos 22 °C o 23 °C. La rotura de la termoclina del año 2010 sigue el mismo patrón pero es alrededor del día 275. Una avenida de unos 250 m³/s procedente del río Ebro (día 274) desestabiliza la columna de estratificación débil hace que el agua se mezcle y quede alrededor de los 20 °C o 21 °C.

5.3 CASO 2: EMBALSE DE SAU (RÍO TER)

Como se mencionó en el Capítulo 3, el embalse de Sau está sujeto a notables variaciones del caudal de entrada y, por lo tanto, de volumen embalsado, por ello presenta una gran variabilidad interanual. Los periodos de estratificación y mezcla, así como la intensidad de esta estratificación, pueden verse influenciados por las características hidrológicas de cada año y de cada estación.

Según los informes y estudios realizados a lo largo del tiempo (Armengol *et al.*, 2005, 1999; Armengol, 2003; Han *et al.*, 2000; Ordóñez, 2010) se puede observar que la estructura térmica en el embalse de Sau se comporta de manera más o menos regular en invierno, pero que en función de los factores hidrometeorológicos puede sufrir variaciones importantes a partir de la primavera. También se observa una cierta dependencia interanual, es decir, un año puede venir influenciado por la historia del año anterior.

5.3.1 Campaña 2011

El periodo de estudio viene definido por la disponibilidad y calidad de los datos de campo de la instrumentación disponible. En concreto la instalada por Flumen así como de los datos cedidos por otros grupos o entidades: Departamento de ecología de la Universitat de Barcelona, Aigües Ter-Llobregat (ATLL), la Agència Catalana de l'Aigua (ACA) y la Red de Medidas agro-meteorológicas de la Generalitat de Catalunya (Meteocat).

La mayor parte de datos de temperatura del agua y datos meteorológicos analizados en este capítulo han sido recogidos en la campaña de campo realizada por Flumen durante el periodo de estratificación del año 2011, aunque también se ha podido disponer de datos cedidos por el Departamento de Ecología de la Universitat de Barcelona (recogidos en campañas de seguimiento) y por la empresa ATLL, encargada de gestionar el embalse. También se dispone de los datos de caudales y temperaturas en la entrada y la salida del embalse.

Las variables de estratificación hidrodinámica se han medido en las proximidades de la presa, zona más ancha, que se asemeja más a lo que es un lago (Thornton *et al.*, 1990). En esta zona el embalse presenta mayor profundidad, mayor tiempo de residencia, menor concentración de sólidos en suspensión, mayor transparencia y menor carga de nutrientes. Además, es la que tiene más relación con el agua de toma que se turbinará aguas abajo. Cabe recordar que el embalse de Sau, es el situado aguas arriba de un conjunto de tres embalses que se encuentran en cadena a lo largo del río Ter (ver apartado 3.4.1). El agua que sale de allí pasa al embalse de Susqueda y posteriormente al embalse del Pasteral, para finalmente pasar a la planta de potabilización y abastecimiento de Cardedeu.

En este apartado se presentan y describen los caudales de entrada y salida al embalse (apartado 5.3.1.1), la evolución del nivel del embalse (apartado 5.3.1.2), las variables meteorológicas (apartado 5.3.1.3), los datos de temperatura del agua en distintos puntos del embalse (apartado 5.3.1.4) y todo ello se correlaciona para describir el comportamiento hidrodinámico y la respuesta térmica del mismo (apartado 5.3.2).

5.3.1.1 Caudales de entrada y salida del embalse

Los datos hidráulicos consisten en las series de caudales de entrada y caudales de salida del embalse, correspondientes al periodo de estudio del día juliano 55 (correspondiente al 24

de febrero) al día juliano 273 (correspondiente al 30 de septiembre) de 20011, los cuales se muestran en la Figura 71 . Esta información junto con la evolución de la cota de agua en el embalse (apartado 5.3.1.2) permite caracterizar el balance de masa en él. Se destaca la avenida producida entre los días 74 y 75 (15 y 16 de marzo) en que se alcanzaron unos caudales del orden de los 270 m³/s. El día 135 (15 de mayo) tuvo lugar una pequeña avenida con un caudal punta del orden de 110 m³/s. Se observan dos avenidas más, pero de menor importancia, que se presentaron los días 160 (9 de junio) y 209 (28 de julio). En el resto del periodo de estudio los caudales oscilaron entre 20 y 60 m³/s. Cabe notar que las series de datos no están completas, no disponiéndose de datos entre los días 87 a 95, 120 a 125, 152 a 156, 182 a 186 y 265 a 267.

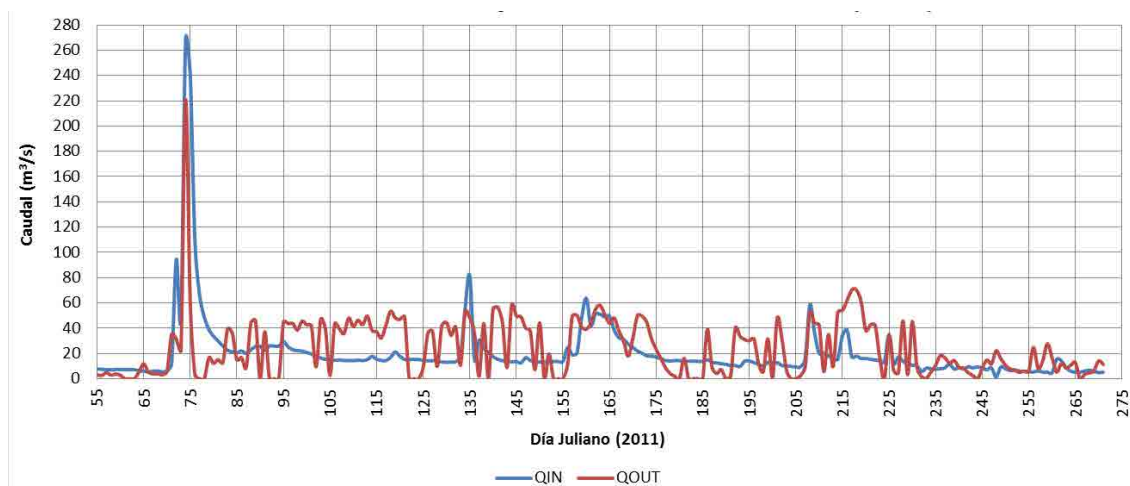


Figura 71. Serie de caudales medios diarios de entrada y salida del embalse de Sau. Periodo de estudio del día juliano 55 (24 de febrero) al 273 (30 de septiembre de 2011).

5.3.1.2 Nivel de embalse

La cota del embalse es congruente con la serie de caudales de entrada y salida (Figura 71). Se puede observar un aumento importante y brusco del nivel para los días 74 y 75 (caudal pico de 270 m³/s). Análogamente, se perciben pequeños incrementos de cota para los otros tres picos citados en el apartado anterior. Desde finales de primavera y hasta mediados del verano la cota se mantuvo bastante estable. La disminución importante de cota del embalse se dio a partir del día juliano 215, en que se observa el último pico de la curva en la Figura 72, correspondiente a inicios de agosto. A finales del periodo de estudio, se alcanzó una cota de un 412 m, 4 metros inferior que al inicio del mismo periodo de estudio.

La torre de captación de Sau dispone de tres compuertas (ver Capítulo 3) que pueden operar a diferentes cotas, ya sea individualmente o combinadas. Según la información proporcionada por ATTL, para el periodo de estudio, la compuerta I se encuentra a la cota de 384.5 m, la Compuerta II a la cota 399.0 m, y la compuerta III a cota 413.5 m (Figura 72).

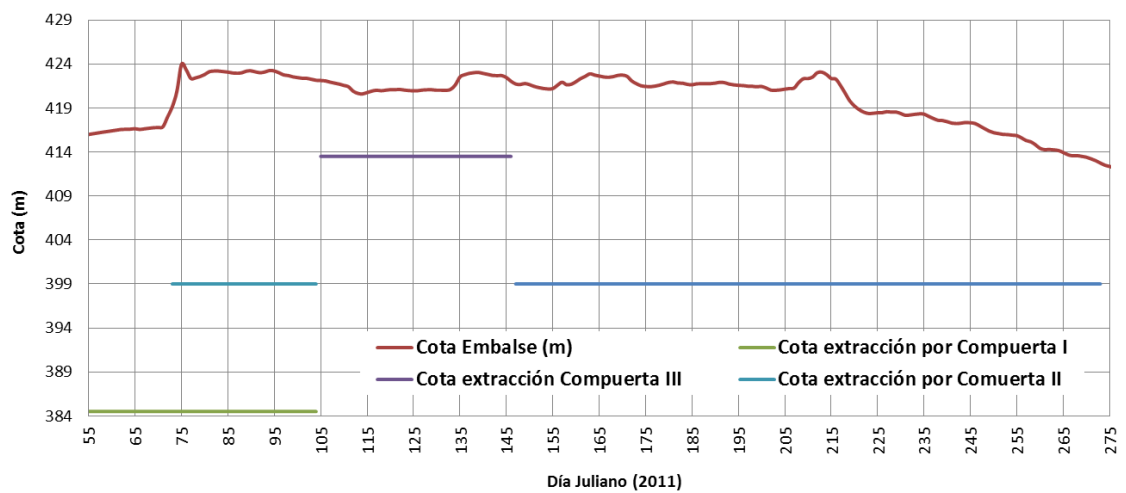


Figura 72. Evolución dea nivel del embalse de Sau y cota de extracción de las compuertas. Periodo de estudio del día juliano 55 (24 de febrero) al 273 (30 de septiembre de 2011).

5.3.1.3 Datos meteorológicos

La información meteorológica utilizada para el estudio de la hidrodinámica del embalse es: la temperatura del aire, la velocidad del viento, y la radiación solar incidente de onda corta.

Con el gráfico de la evolución de la temperatura del aire (Figura 73) medida en la estación meteorológica de Sau se puede observar el aumento progresivo de la temperatura a partir de finales de febrero (día 55) hasta el verano. Se destacan las bajadas importantes que tienen lugar en los días 60 (1 de marzo), 100 (10 de abril), o 150 (30 de mayo).

En verano las temperaturas medias diarias son de unos 20 °C (± 3 °C), desde mediados de junio a mediados de septiembre, sin caídas importantes hasta la del día 263 (20 de septiembre), en que hay un descenso de 7 °C en un día.

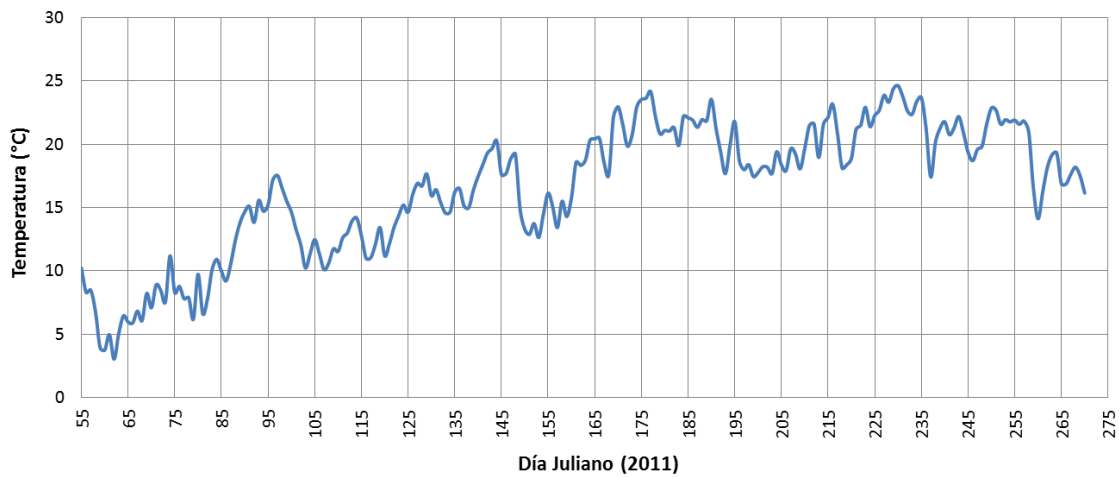


Figura 73. Temperatura media diaria del aire medida en la estación meteorológica de Sau. Periodo de estudio del día juliano 55 (24 de febrero) al 273 (30 de septiembre de 2011).

La humedad relativa es un parámetro mucho más variable. En la Figura 74 se puede observar una tendencia de mayor humedad en primavera (entre 50% y 60%) y una tendencia más seca desde el verano hasta mediados de otoño (entre el 30% y el 40%).

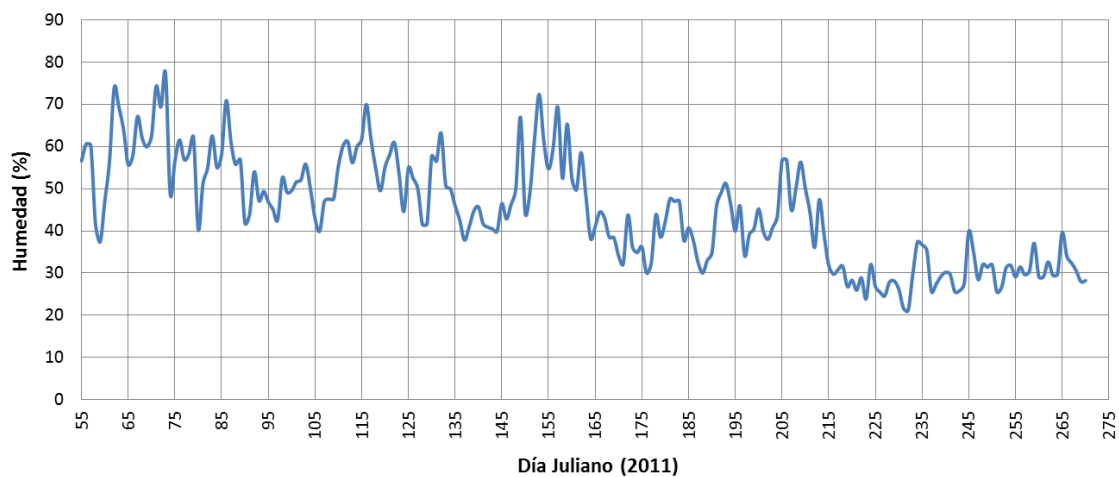


Figura 74. Humedad relativa (medias diarias) medida en la estación meteorológica de Sau. Periodo de estudio del día juliano 55 (24 de febrero) al 273 (30 de septiembre de 2011).

Respecto a la velocidad del viento también hay que comentar que las medias diarias pueden enmascarar de manera importante episodios concretos provocando que los valores pico se puedan ver disminuidos. En la Figura 75 se puede ver el resumen de los datos de velocidad del viento.

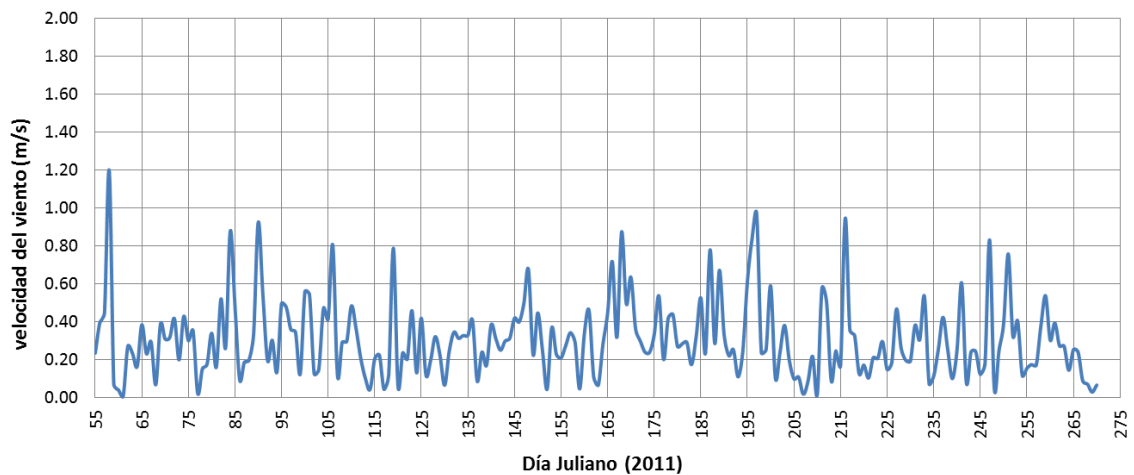


Figura 75. Velocidad media diaria del viento medida en la estación meteorológica de Sau. Periodo de estudio del día juliano 55 (24 de febrero) al 273 (30 de septiembre de 2011).

En cuanto a la serie de radiación solar incidente medida en la estación meteorológica de Gurb (Figura 76), destaca el descenso importante en el periodo 150 a 165 (del 4 al 14 de junio) que se correlaciona con la caída de temperaturas del aire (ver Figura 73). El día 185 (4 de julio) se aprecia otro descenso notable.

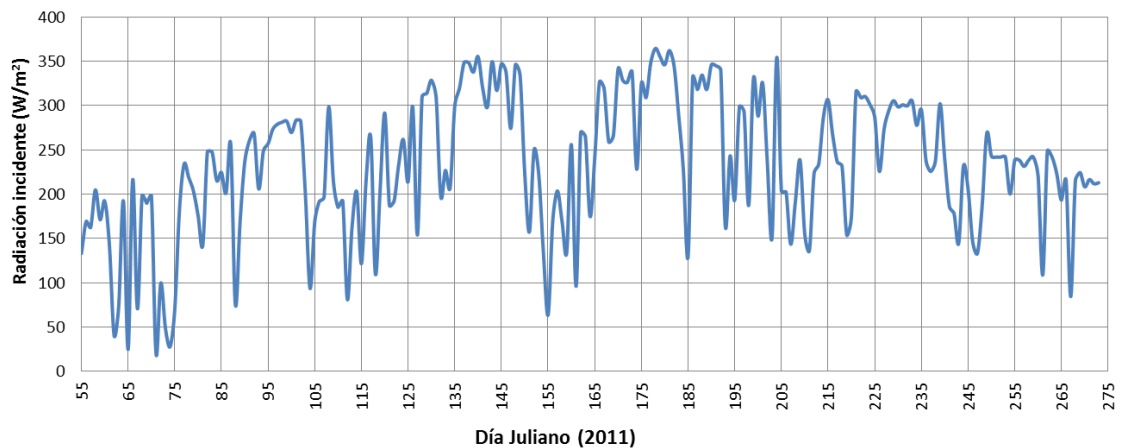


Figura 76. Radiación solar incidente medida en la estación meteorológica de Gurb. Periodo de estudio del día juliano 55 (24 de febrero) al 273 (30 de septiembre de 2011).

5.3.1.4 Temperatura del agua

5.3.1.4.1 Entrada al embalse

En la EDAR de Roda de Ter (propiedad del ACA) se registraron los caudales y la temperatura del agua de entrada al embalse. En la Figura 77 se muestra su registro, desde el

día 24 de febrero de 2011, con una temperatura de 9.5 °C, hasta el 30 de septiembre con 22.4 °C. Se aprecia cómo a partir del día 81 (22 de marzo) la temperatura del agua a la entrada del sistema empieza a mostrar la tendencia a aumentar, típico de los periodos de primavera y verano. A pesar de esta tendencia, se observan descensos (día 135 -15 de mayo-, entre 155 y 165 -4 a 14 de junio- o alrededor del día 205 -24 julio-) que se corresponden con fenómenos meteorológicos como se aprecia también en los registros de temperatura ambiente (Figura 73), de la humedad relativa (Figura 75), de la radiación solar incidente (Figura 76) o de los caudales de entrada y salida (Figura 71).

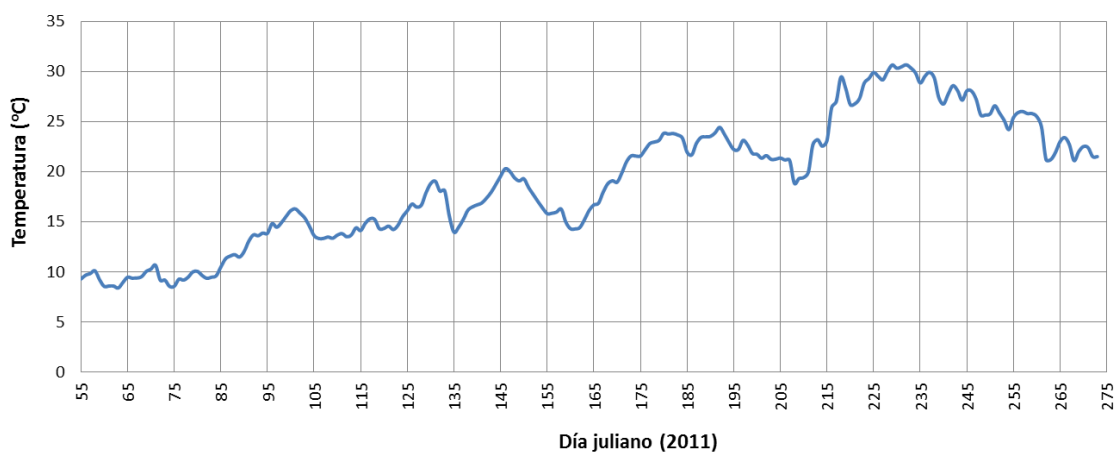


Figura 77. Evolución de la temperatura del agua de entrada al embalse de Sau. Periodo de estudio del día juliano 55 (24 de febrero) al 273 (30 de septiembre de 2011). Registro obtenido en la EDAR de Roda de Ter (fuente: ACA).

5.3.1.4.2 Embalse

En la Figura 78 y la Figura 79 se puede observar la evolución térmica de los sensores de temperatura de las boyas correspondientes a los puntos 2 y 3. Se nota mayor variabilidad térmica en superficie que en profundidad. La mezcla del embalse tiene lugar a finales de septiembre (según el punto 2, alrededor del día 265 el embalse se encuentra prácticamente mezclado).

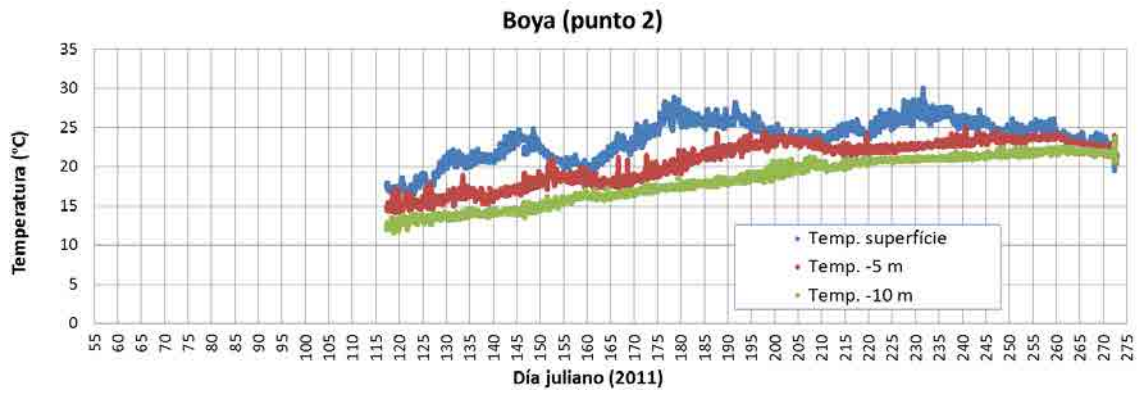


Figura 78. Evolución de la temperatura del agua en la boya pequeña (punto 2). Frecuencia diezminutal. Periodo de estudio del día juliano 55 (24 de febrero) al 273 (30 de septiembre de 2011).

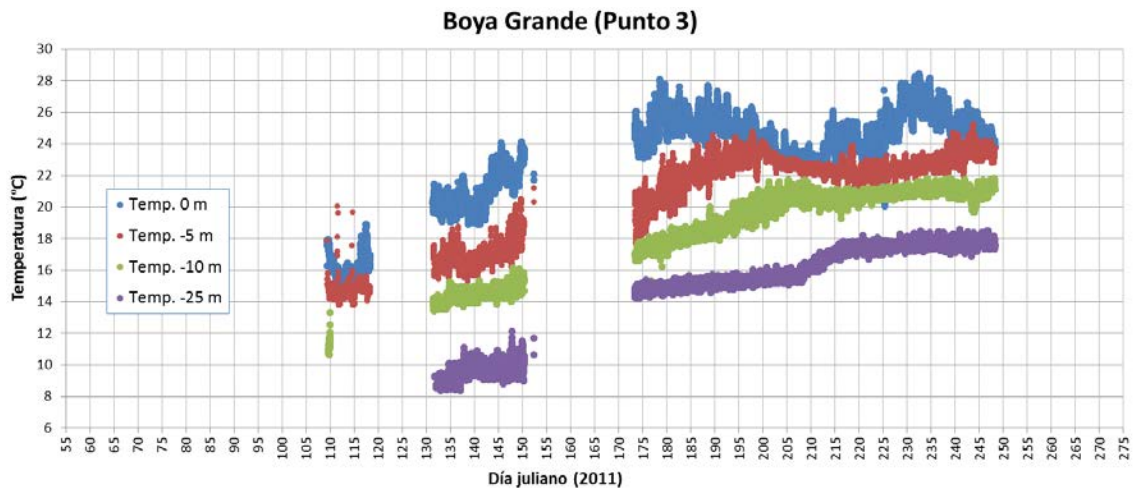


Figura 79. Evolución de la temperatura del agua en la boya grande (punto 3). Frecuencia diezminutal. Periodo de estudio del día juliano 55 (24 de febrero) al 273 (30 de septiembre de 2011).

En la Figura 80 y Figura 81 se muestran los perfiles de temperatura obtenidos durante el periodo de estudio del año 2011, en los puntos 2 y 3 que corresponden también a la boya pequeña y la boya grande respectivamente (Figura 35).

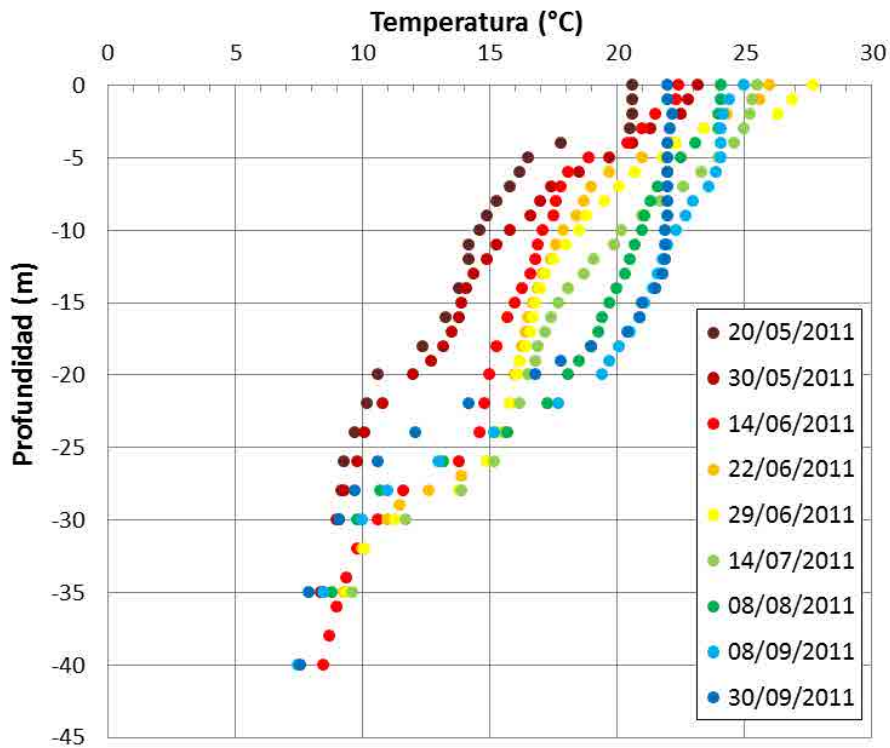


Figura 80. Perfiles periódicos registrados durante la campaña 2011; Punto 2 (boya pequeña, Figura 35).

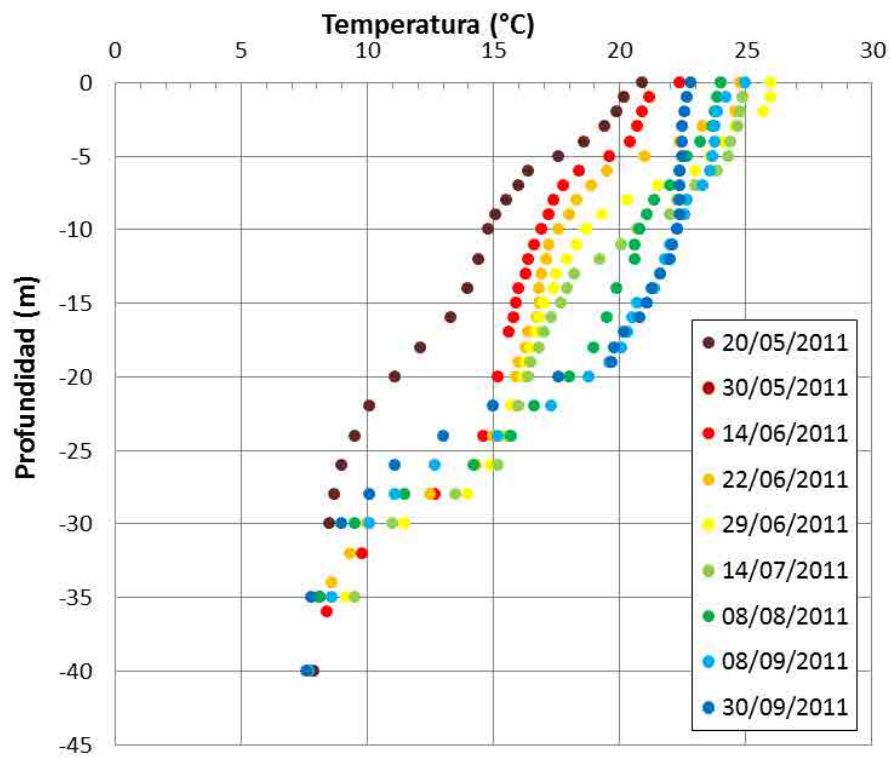


Figura 81. Perfiles periódicos registrados durante la campaña 2011; Punto 3 (boya grande, Figura 35).

Igualmente en la Figura 82 se muestran los perfiles obtenidos en el mismo periodo por el Departamento de Ecología de la Universitat de Barcelona situado en las cercanías del punto 3 (Figura 35). Se observan comportamientos análogos en cuanto a los valores de las temperaturas tanto en superficie como en profundidad. Así, por ejemplo, entre los 35 m y 40 m de profundidad se aprecia como todos los perfiles tienden a una misma temperatura alrededor de los 7.5 °C.

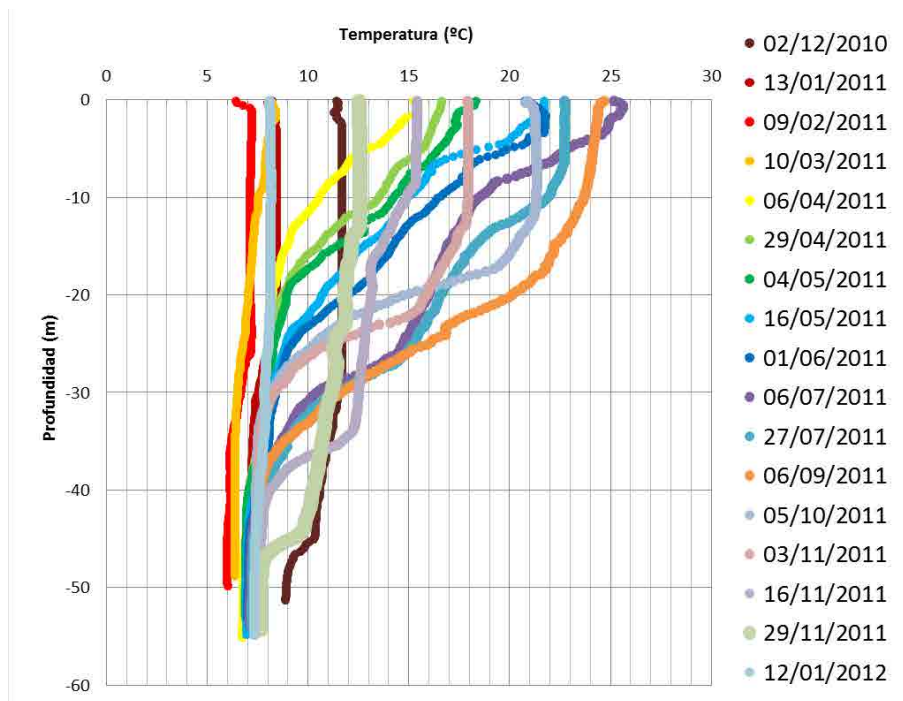


Figura 82. Perfiles de temperatura registrados durante el periodo de estudio (2011) por el Departamento de Ecología de la UB y Aigües del Ter del Llobregat. El punto de medida es cercano a la posición del punto 3 (Figura 35).

Mientras que los perfiles realizados corresponden al periodo que duró la campaña de campo de este estudio (20 de mayo a 30 de septiembre), los perfiles de la UB se extienden desde el inicio del año 2011. Estos aportan información para la determinación de las condiciones térmicas iniciales del embalse. El perfil de temperatura disponible medido más cercano al día que se eligió como de inicio de la simulación (24 de febrero) corresponde al del día 10 de marzo de 2011 en el que se muestra un temperatura suficiente homogénea, que va desde la superficie alrededor de 8 °C hasta los 6.4 °C a profundidades superiores a 30 m. Será este perfil el que se usará como condición de temperatura inicial de la masa de agua de todo el embalse. Se analizará la influencia en las simulaciones de estos valores.

5.3.2 Evolución térmica del embalse

Se puede apreciar que el inicio de la estratificación se produce entre los días 75 y 95, se constata en los perfiles de temperaturas medidos en el campo donde se observa un salto en la temperatura a los 10 m de profundidad.

La estratificación empieza a ser relevante a partir del día 95. Si bien, el agua había empezado a estratificarse previamente, se observa un descenso significativo de la temperatura entre los días 100 y 125, que hizo retrasar el proceso de calentamiento de la masa de agua. Se puede considerar que el embalse se encuentra plenamente estratificado a partir del día 125.

El proceso de enfriamiento mencionado se puede apreciar en la Figura 73 que se debe a un episodio de descenso de la temperatura ambiente junto con un descenso de la radiación solar incidente. Así se observa una tendencia creciente alrededor del día 95, alcanzando unos 18 °C el día 97, bajando durante los siguientes 20 días moviéndose entre 10 °C y 14 °C, hasta volver a recuperar los 18 °C el día 133. Igualmente en la Figura 76 se percibe la misma tendencia en cuanto a la disminución de la radiación solar incidente (cayendo cerca de los 300 W/m²).

Entre los días 125 y el 155 la tendencia de las temperaturas en el epilimnion es creciente alcanzando unos valores alrededor de los 22 °C. Del día 155 al 170, se puede observar una nueva caída repentina en los valores de la radiación solar incidente (Figura 76) que también se recoge en el registro de temperaturas con valores que pasan de alrededor de los 20 °C hasta valores por debajo de los 15 °C en ese periodo (Figura 73). La temperatura en el epilimnion también refleja este descenso. En los días siguientes entre el 170 y el 210 se vuelve a recuperar la tendencia al calentamiento del embalse, alcanzando valores entre 23 y 24 °C en el epilimnion. Este periodo también coincide con los picos de la temperatura del aire y de radiación solar incidente.

Entre el día 210 y 220 vuelve a percibirse un leve descenso en la temperatura del agua bajando hasta profundidades de unos 20 m en valores alrededor de los 21 °C y 22 °C. Como en los casos anteriores esta bajada coincide, de nuevo, con un episodio de bajada de temperaturas del aire (Figura 73) y de radiación incidente (Figura 76). A lo largo de este periodo la termoclina es más marcada.

Finalmente después de alcanzar un nuevo valor extremo de temperatura del agua (23 °C - 24 °C en el epilimnion), debido al episodio de calor. A partir de esta fecha, entre los días 225 a 245, comienza a apreciarse el proceso de enfriamiento típico de las últimas semanas de septiembre.

La máxima temperatura, entre 24 °C y 25 °C, se alcanza en profundidades inferiores a 10 m, en pleno verano. Por el contrario la temperatura mínima, 6.5 °C, se mantiene a lo largo de todo el periodo de estudio en las zonas profundas del embalse por debajo de los 30 m.

Al final del periodo de estudio no se llega a alcanzar la total rotura de la termoclina. Esto se debe a un final de septiembre de 2011 bastante caluroso, como se puede apreciar en la evolución meteorológica. Según los datos proporcionados el Departamento de Ecología de la UB, en 2011 se puede apreciar una mezcla vertical a partir de mediados de noviembre (Figura 82).

5.4 CONCLUSIONES

Una de las principales fuentes directas de energía en los embalses, es la radiación solar y consecuentemente la temperatura del aire. Gran parte de esta energía es absorbida por el agua superficial transformándose en calor, que es acumulado por el embalse. De manera indirecta, los aportes de los ríos en cola también son una fuente de calor.

Por ejemplo, durante primavera en el embalse de Sau, el río se calienta más rápidamente que el agua del embalse, lo que implica una inyección de calor en las capas superficiales, y durante el verano, el agua que entra al embalse es más fría que la que sale, con lo cual, el sistema se comporta como una trampa de calor (Han *et al.*, 2000). El caso de Ribarroja se complica especialmente debido a la gran diferencia entre los dos caudales de entrada (el río Segre y el río Ebro en la toma del embalse de Mequinzenza), y hace que los caudales relativos influyan muy directamente al comportamiento térmico del embalse.

La máxima estabilidad térmica en ambos embalses se da en los meses de verano, cuando la diferencia de densidad entre estratos es mayor y por lo tanto los procesos de mezcla son menos probables. El embalse de Sau funciona de manera mucho más irregular que el embalse de Ribarroja.

Al igual que con la mayoría de variables analizadas hasta ahora, el volumen del embalse juega un papel muy importante en la estabilidad térmica. La variabilidad de volumen del embalse de Sau puede influir a la hora de comparar el año de estudio con otros periodos de tiempo. El caso de Ribarroja es mucho más estable debido la alta regulación de caudal que tiene, el río Ebro aguas arriba y por lo tanto a las pocas variaciones de nivel que hay a lo largo del año. Estas variaciones de volumen también influirán de manera directa en los tiempos de residencia de los embalses.

La dinámica de las variables físicas, químicas y biológicas en el embalse de Sau está fuertemente influenciada por la estacionalidad, el volumen del embalse y el caudal del río Ter. Estos factores determinan la existencia de patrones más o menos claros a lo largo de los años de las principales características limnológicas del embalse. La variabilidad interanual en los aportes del río Ter permite hablar de años húmedos o años secos (Ordóñez, 2010). De acuerdo a todo lo dicho, la temperatura y el caudal del río Ter y en consecuencia el volumen del embalse, son las variables modificadoras más importantes en la dinámica de las variables físicas, químicas y biológicas del embalse de Sau.

En cuanto al embalse de Ribarroja, el factor estacional e interanual no modifica el volumen embalsado, pero si la temperatura y la procedencia de los caudales de entrada. Se observa una correlación directa entre los picos de caudal y las modificaciones de la columna de agua, especialmente para avenidas del río Ebro en primavera y a principios de verano (el agua que entra es considerablemente más fría que la del embalse).

La posición de las tomas de las presas (única en Ribarroja; y variable en tres posiciones en el caso de Sau) también afecta en la posición de la termoclina. Este efecto se nota a varios kilómetros aguas arriba de las presas y es un efecto importante a tener en cuenta a la hora de predecir comportamientos hidrodinámicos, especialmente en el caso del embalse de Sau.

5.5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARMENGOL, 2003. *Balanç tèrmic de l'embassament de Sau: Una aproximació basada en dades meteorològiques rutinàries*. Universitat Politècnica de Catalunya.

ARMENGOL, COMERMA, GARCÍA, ROMERO, RODRÍGUEZ, VALERO, & VIDAL, 2005. *Quaderns ATLL - Contribució al coneixement de l'ecologia aquàtica de l'embassament de Sau (evolució de l'embassament al 1999)*.

ARMENGOL, GARCÍA, COMERMA, ROMERO, DOLZ, ROURA, HAN, VIDAL, & SIMEK, 1999. *Longitudinal processes in canyon type reservoirs: the case of Sau (NE Spain)*. *Theor. Reserv. Ecol. its Appl.* 313–345.

COLE, & WELLS, 2008. *CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model. Version 3.6 User Manual, Version 3*. ed. Water Quality Group - Portland State University, Portland.

COSTA CASTRO, 2014. *Influencia de la temperatura de los ríos Ebro y Segre en el comportamiento térmico del embalse de Ribarroja*. Universitat Politècnica de Catalunya.

HAN, ARMENGOL, GARCÍA, COMERMA, ROURA, DOLZ, & STRASKRABA, 2000. *The thermal structure of Sau Reservoir (NE: Spain): a simulation approach*. *Ecol. Modell.* 125, 109–122. doi:10.1016/S0304-3800(99)00176-3

ORDÓÑEZ, 2010. *Limonología del embalse de Sau. Relaciones del zooplancton, la clorofila y los sólidos en suspensión con el clima lumínico del agua*. Universitat de Barcelona.

THORNTON, KIMMEL, & PAYNE, 1990. *Reservoir Limnology: Ecological Perspectives*.

Capítulo 6 MODELIZACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de modelos numéricos en dos dimensiones (2D) de la hidrodinámica y la evolución térmica de los embalses de Ribarroja (Caso 1, en el apartado 6.4) y Sau (Caso 2, en el apartado 6.5) mediante CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008).

La metodología seguida para la obtención de los modelos numéricos de los embalses de Ribarroja (Caso 1) y Sau (Caso 2) en 2D se explica de manera resumida en el apartado 6.3 y es prácticamente igual para ambos casos de estudio.

6.2 EL MODELO CE-QUAL-W2

La modelación numérica se ha realizado mediante el modelo CE-QUAL-W2. Para el caso del embalse de Ribarroja de Ebro se ha utilizado la versión 3.71 (de enero de 2013) mientras que para el estudio del embalse de Sau se utilizó una versión más antigua, la 3.7 (actualización del 16 de agosto de 2012).

Los ficheros necesarios para realizar una simulación hidrodinámica y térmica de un embalse mediante CE-QUAL-W2 se detallan en el apartado 6.2.1, las condiciones iniciales en el 6.2.2, las condiciones de contorno en el 6.2.4 y los datos meteorológicos en el 6.2.5.

6.2.1 Ficheros de entrada

Para una simulación básica de la hidrodinámica y la evolución térmica del embalse mediante CE-QUAL-W2 se precisan los ficheros siguientes con la información que se detalla:

- Batimetría (*bth.npt*).
- Cota de la lámina de agua: para el balance volumétrico (*el_obs.npt*).
- Coeficientes de extinción de la luz (*ext_1.npt*).
- Datos meteorológicos: velocidad y dirección del viento, temperatura del aire y temperatura del punto de rocío (*met.npt*).
- Coeficiente de protección del viento (*wsc.npt*).
- Serie de datos de precipitación y temperatura del agua aportada (*pre_br1.npt* y *tpr_br1.npt*). Si la precipitación no afecta de manera importante en el balance de masas puede ser prescindible.
- Serie de caudales de entrada en la cola del embalse y su temperatura (*qin_br1.npt* y *tin_br1.npt*).
- Serie de caudales de entrada correspondientes a los tributarios existentes (en el caso de Ribarroja, *qtr_tr1.npt* y *ttr_tr1.npt*).
- Serie de caudales de salida por la presa y sus posibles cotas de extracción (*qou_br1t.npt*).
- Coeficiente de sombra (*shade.npt*). Suele ser un parámetro difícil de obtener en campo, pues depende de la topografía, del día del año y de las condiciones de cada caso de estudio.
- Perfil inicial de temperaturas con el que se define el estado inicial del embalse en caso que no se encuentre mezclado, *vpr.npt*.

6.2.2 Discretización de la batimetría

El fichero de batimetría de CE-QUAL-W2 (*bth.npt*) se merece una mención especial puesto que es uno de los más importantes a la hora de la preparación de las simulaciones.

El fichero de batimetría contiene la malla en dos dimensiones que servirá de cuadrícula para la resolución del esquema numérico de CE-QUAL-W2. La discretización de la batimetría se realiza en las direcciones de la longitud del embalse y la profundidad mientras que el ancho es promediado por cada capa en cada segmento.

La discretización se realiza mediante capas y segmentos, las capas son las lonjas que dividen la malla del embalse verticalmente (en el eje z) mientras que los segmentos son las discretizaciones a lo largo del recorrido del embalse (esquema de la discretización en capas y segmentos en la Figura 83). Capas y segmentos pueden tener grosores y longitudes variables.

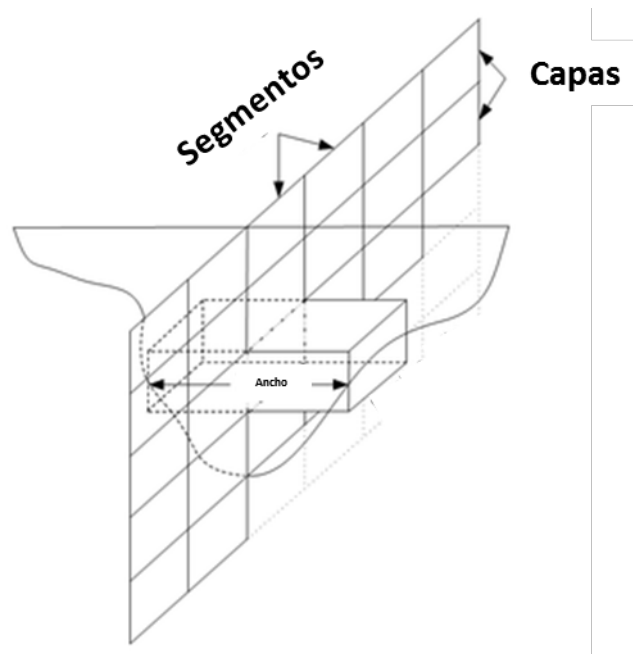


Figura 83. Discretización en capas y segmentos según CE-QUAL-W2.

6.2.3 Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales de la simulación corresponden al perfil de temperatura de partida de la columna de agua en el día de inicio de la simulación (con la discretización de las capas de la malla).

Los dos casos de estudio, que se discuten en esta tesis, pretenden caracterizar un ciclo anual de estratificación térmica. Por ello, en ambos casos, se inician las simulaciones previamente al periodo de estratificación, se toma como temperatura de partida en el instante inicial un perfil de temperaturas vertical registrado en campo el día del inicio de la simulación, caracterizando el estado de la masa de agua al inicio del ciclo.

6.2.4 Condiciones de contorno

Para analizar la hidrodinámica de los embalses mediante el modelo CE-QUAL-W2 incluyendo la predicción de temperatura, como condición de contorno aguas arriba se requieren los datos de caudales y la temperatura de entrada de los. En el caso de Ribarroja hay dos entradas correspondientes a los ríos Segre y el propio Ebro, en el caso de Sau únicamente el mismo río Ter.

En ambos casos de estudio, aguas abajo, la condición de contorno es la propia presa. En el caso de Ribarroja el agua puede circular por el desagüe de fondo o por el aliviadero de superficie. En el caso de Sau hay tres posibles cotas de extracción en la torre de toma de la presa además del aliviadero. Se han considerado las cotas de extracción en función del criterio de gestión del embalse a lo largo del periodo analizado.

El balance de masas inicial a partir de los aportes y/o extracciones de caudal al embalse se obtienen a partir del programa Water Balance Utility, proporcionado por los desarrolladores de CE-QUAL-W2.

6.2.5 Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos son otro de los componentes imprescindibles para la modelación de la evolución térmica del agua del embalse, y son determinantes en las condiciones de contorno de flujo térmico en la capa superficial del modelo.

Los datos meteorológicos requeridos de manera imprescindible por el modelo son: la temperatura del aire, la temperatura del punto de rocío, que se calculó a partir de los datos de temperatura del aire, presión atmosférica y humedad relativa, la velocidad y dirección del viento y el coeficiente de nubosidad que se estimó a partir de la radiación y de la precipitación.

En el Capítulo 5 se analizaron en detalle los datos meteorológicos para los periodos de estudio de cada caso.

6.3 METODOLOGÍA

A grandes rasgos, preparar una simulación de un embalse mediante CE-QUAL-W2 requiere seguir los siguientes pasos (esquematizados en el diagrama de flujo de la Figura 84):

1. Generar el fichero de batimetría (*bth.npt*) a partir de los datos de curvas de nivel o de un modelo digital del terreno. Se ha puesto en práctica una nueva metodología para generar discretizaciones batimétricas para casos de embalses con características similares mediante el software Geo-Ras® y ArcGis®.
2. Preparar el fichero de control (*W2_con.npt*) dónde se gestiona toda la información respecto al funcionamiento del modelo, los parámetros numéricos de cálculo, las características de la simulación, los ficheros utilizados y los que se generan. Este fichero es el que controla la simulación.
3. Generar el resto de ficheros necesarios para realizar las simulaciones. Ficheros de caudales de entrada y de salida, de caudales principales y tributarios, fichero de meteorología (*met.npt*), y perfil vertical de temperaturas iniciales (*vpr.npt*).
4. Verificar el correcto funcionamiento hidrodinámico del modelo mediante CE-QUAL-W2. Se hace un primer cálculo de los ficheros de caudales de entrada y salida, la cota

de embalse que servirán para comparar con el nivel de embalse medido (mediante el programa Water Balance).

5. Ejecutar el programa Water Balance Utility (*waterbal_ivf37.exe*) para asegurar una correcta conservación de la masa, a partir de los datos de caudales de entrada y salida, nivel, precipitación y evaporación.
6. Aplicar del modelo hidrodinámico activando el balance térmico y comparación de los resultados con los datos de campo. Reajustar los parámetros del modelo si es necesario.
7. Realizar un análisis de sensibilidad de las variables estimadas o de los parámetros del modelo que presenten mayor incertidumbre. Reajustar los parámetros que sean necesarios.
8. Realizar las simulaciones definitivas de la evolución térmica del embalse.
9. Analizar los escenarios hipotéticos y/o simulaciones de casos reales de estudio a partir del modelo hidrodinámico del embalse.

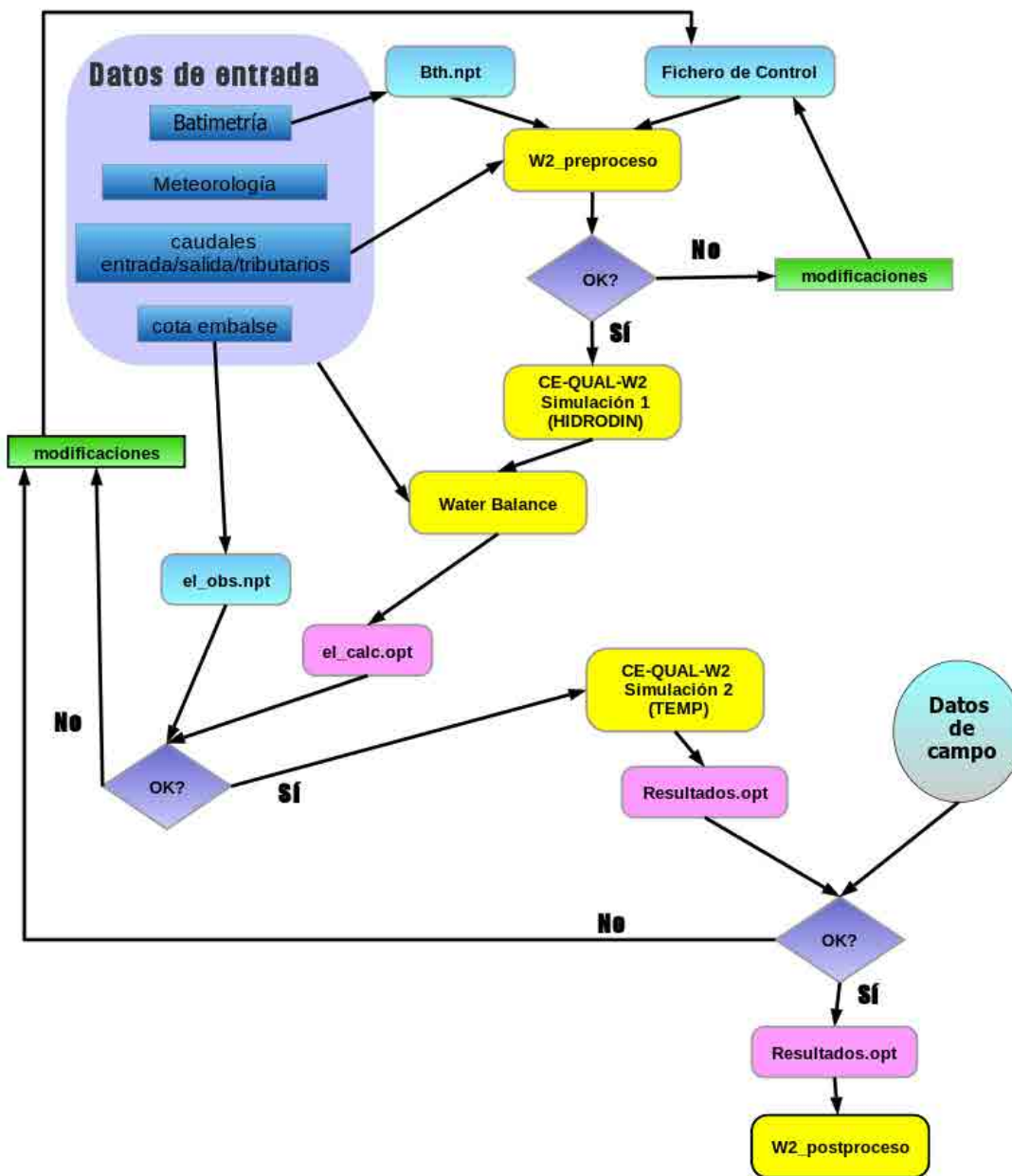


Figura 84. Esquema de los pasos a seguir a la hora de hacer una simulación mediante CE-QUAL-W2. En azul oscuro los datos de partida, en azul claro los archivos input (.npt), en amarillo los programas utilizados (Pre-procesador, Water balance Utility, CE-QUAL-W2 y Post-Procesador), en rosa los resultados del modelo (.opt).

6.3.1 Puesta a punto del modelo

En 2009 se realizó un proceso iterativo para ajustar los valores de temperatura obtenidos mediante CE-QUAL-W2, con los datos medidos en campo para un estudio del periodo de estratificación del embalse de Ribarroja, correspondiente al año 2004 (Arbat-Bofill *et al.*,

2009b). También se realizó un estudio de sensibilidad para los parámetros en el caso del embalse de Sau siguiendo la misma metodología (Arbat-Bofill *et al.*, 2011).

En ambos casos de estudio se han realizado estimaciones iniciales en función de las características del embalse de los parámetros de los que no se disponía de valores (rugosidad del fondo y coeficientes varios) y/o datos de campo (temperatura del sedimento del fondo, grado de protección del viento o coeficiente de sombra). La estimación inicial se validó con el análisis de sensibilidad de las simulación es al parámetro en cuestión. En otros casos, se tomaron los valores que aconseja el manual del modelo CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008) por defecto en función de las características del caso de estudio.

6.4 CASO 1: EMBALSE DE RIBARROJA DE EBRO (RÍO EBRO)

En este apartado se muestran los resultados de los procesos de calibración y validación realizados mediante el modelo CE-QUAL-W2 v.3.7. (Cole & Wells, 2008) y la comparación de las simulaciones con los datos de campo para el caso del embalse de Ribarroja de Ebro (se ha utilizado la versión 3.71 de enero de 2013).

Primero se presenta la obtención de la discretización de la geometría del embalse (apartado 6.4.1). La calibración del modelo se realizó a partir de los datos del año 2009 (apartado 6.4.2) y la posterior validación se hizo utilizando los datos del 2010 (apartado 6.4.3). En el apartado 6.4.4 se describe la evolución hidrodinámica (temperaturas y velocidades) a lo largo del tiempo mediante perfiles longitudinales. Finalmente, en el apartado 0, se presenta un estudio del tiempo de permanencia en el embalse.

6.4.1 Discretización de la geometría

Para una correcta simulación bidimensional es fundamental disponer de una batimetría detallada de la morfología del vaso (Dolz *et al.*, 2009). El modelo digital de la batimetría (Arbat-Bofill *et al.*, 2009a; De Pourcq *et al.*, 2007; Flumen & Casanovas-Bergé Topógrafos Asociados, 2008) del fondo del embalse utilizada para la discretización se presenta en la Figura 85 (más detalles en el Anejo 4).

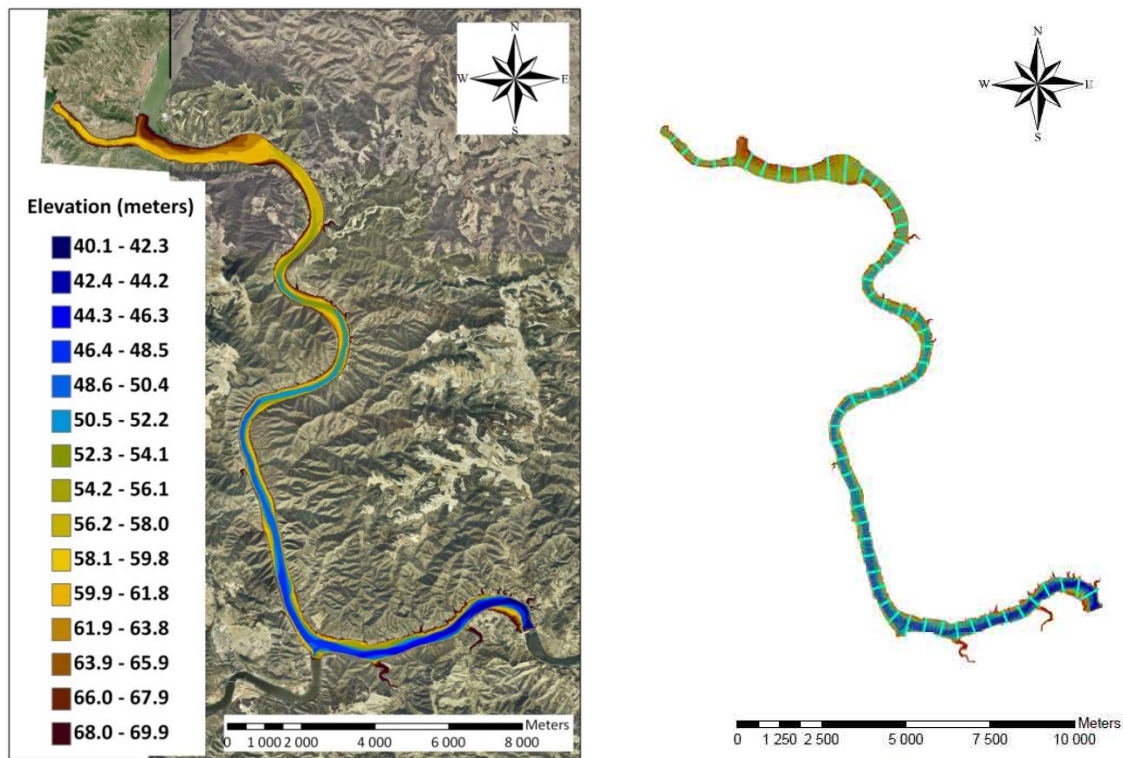


Figura 85. a) Batimetría de precisión del embalse de Ribarroja de Ebro. b) Discretización de la batimetría del embalse de Ribarroja de Ebro en 60 segmentos de 500 m de longitud.

En CE-QUAL-W2, el fichero de batimetría (*bth.npt*) lee la longitud media de cada segmento, su orientación y el ancho de cada capa del segmento. Además también se leen los datos de fricción del fondo, que se caracteriza a partir del coeficiente de fricción de Manning, y la cota de agua inicial (o a partir de la cual se ha generado la batimetría, es decir la cota máxima de la batimetría del embalse).

Para la definición del vaso se estableció un único cuerpo de agua y un solo cauce. Se discretiza el embalse en 60 segmentos longitudinales (Figura 85a), además de los dos correspondientes a las condiciones de contorno, en los extremos de aguas arriba y aguas abajo. Además, para cada segmento se considera una longitud media y también un ancho medio para cada capa, por este motivo se dice que CE-QUAL-W2 es un modelo casi-3D.

Así pues, se ha generado una malla de 62 segmentos que se muestra en la Figura 85b, formados por 60 reales y dos correspondientes a las condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo y 61 capas, constituidas por 59 capas reales más la inferior y la superior, correspondientes, de nuevo, a las condiciones de contorno. En la Figura 86 se puede observar

la discretización del perfil longitudinal de la malla. La malla generada es rectangular y los elementos tienen 0.5 Km de longitud de segmento por 0.5 m de alto de capa.

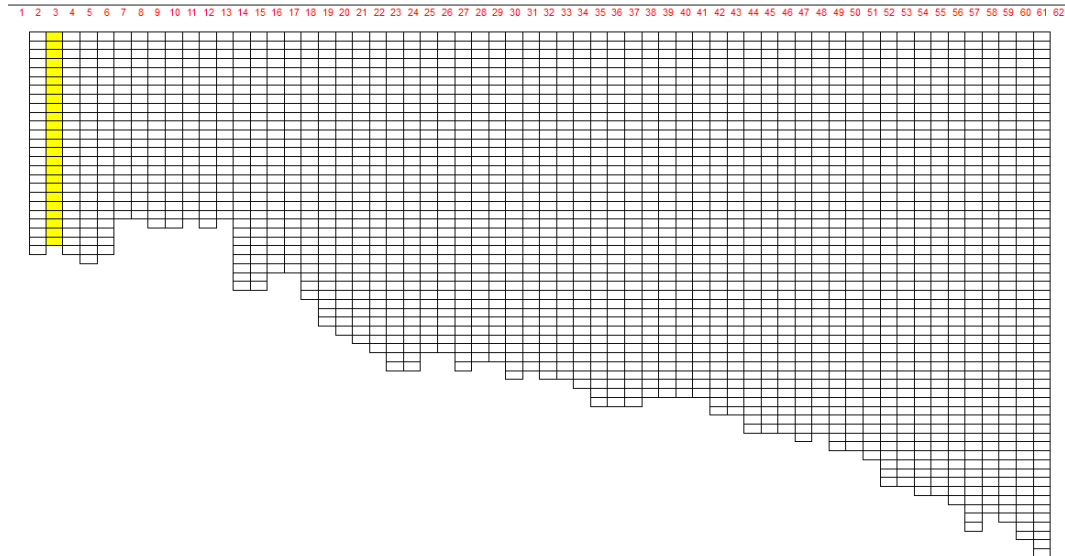


Figura 86. Perfil longitudinal de la malla del embalse de Ribarroja de Ebro. Elementos rectangulares de 0.5 Km de longitud (segmentos) por 0.5 m de alto (capas). En amarillo se muestra el segmento 3.

6.4.2 Calibración del modelo

El proceso de calibración consistió inicialmente en preparar los archivos y ficheros de datos, hacer un primer cálculo con el modelo e ir ajustando las variables mediante la realización de simulaciones de manera iterativa. Se calibran parámetros hasta conseguir el mayor ajuste con los datos de campo (boya de Almatret y plataforma Flumen); se realizaron más de 20 simulaciones para conseguir resultados satisfactorios. Para la calibración se utilizaron los datos del año 2009.

Los parámetros de calibración para estas simulaciones fueron: el grado de nubosidad, definido a partir de la radiación solar, suele ser del orden de 0.2-0.3, el coeficiente de sombra debido a la topografía (de 0.8 a 1.1, debido al encajonamiento del río y su disposición mayormente N-S) y el coeficiente de protección del viento (1.1).

6.4.2.1 Comparación datos de campo con el modelo CE-QUAL-W2

La boya de Almatret y la plataforma Flumen se corresponden con los segmentos 29 y 58 respectivamente. Estos dos segmentos se han usado como perfiles de control del modelo. En

las figuras siguientes se muestran los resultados finales de la calibración numérica mediante CE-QUAL-W2 y se comparan con los datos medidos en campo.

En la Figura 87 se presenta la temperatura media diaria medida a distintas profundidades (línea continua) y se compara con los resultados que proporciona el modelo CE-QUAL-W2 (línea punteada del mismo color). En la Figura 88 se puede observar la evolución de la diferencia entre los datos medidos y los calculados en la boya de Almatret en las capas correspondientes del modelo a las mismas profundidades en que midió la boya.

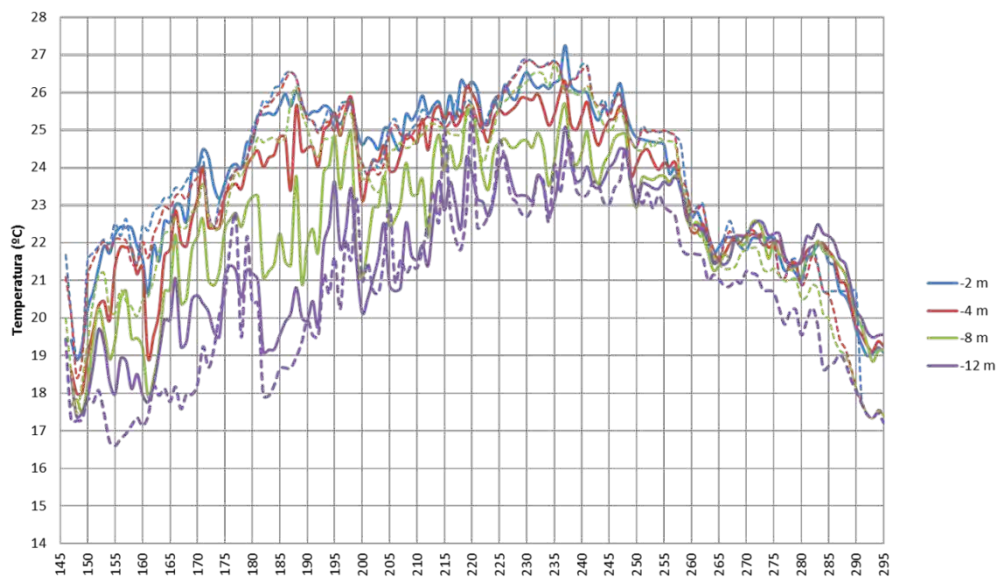


Figura 87. Comparación de la evolución térmica del agua a diferentes profundidades (2, 4, 8 y 12 m) en la boya de Almatret (segmento 29). Las líneas continuas muestran la temperatura media diaria medida y las líneas punteadas muestran la temperatura calculada. Año 2009.

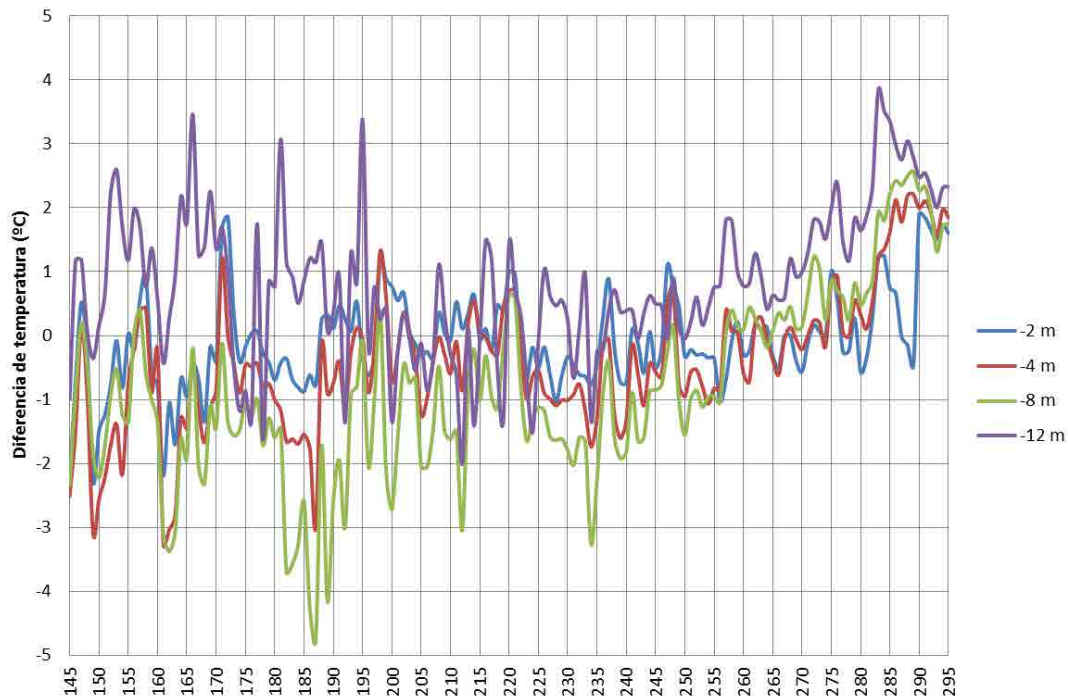


Figura 88. Diferencia de la evolución térmica del agua entre los datos medidos y calculados a diferentes profundidades (2, 4, 8, y 12 m) en la boya de Almatret (segment 29). Año 2009.

El perfil inicial de temperaturas (condición inicial del modelo) se ajusta a las condiciones iniciales de los datos de campo; el modelo calcula correctamente la bajada de temperaturas que tiene lugar el día 147 y el posterior aumento progresivo de temperaturas que tiene lugar del día 148 hasta el día 160 (especialmente en superficie). En profundidad (color lila) se observan mayores diferencias, las temperaturas simuladas quedan por debajo de las medidas (hasta 3 °C de diferencia). En el periodo 160-195 se aprecia una buena correlación en superficie, donde el modelo sigue los picos muestreados en campo; para este periodo de tiempo el modelo tiende a simular mejor la capa de 2 m de profundidad que la que se encuentra a 4 m de profundidad. La mayor diferencia entre los datos medidos y calculados se encuentra a los 8 m de profundidad superando puntualmente los dos grados entre los días 180 y 190. El hecho de que toda la columna se haya ido calentando hace que el ajuste de temperaturas sea aceptablemente bueno a partir del día 195 y durante todo el periodo de estratificación. En las capas superficiales (2 y 4 m de profundidad) se pueden observar los cambios debidos a las condiciones meteorológicas, para el periodo 225-235 el modelo calcula temperaturas del orden de 0.5 a 1 °C superiores a las medidas. Análogamente al periodo anterior, las mayores discrepancias se encuentran alrededor de los 8 m de profundidad aunque, en este caso, las diferencias máximas entre datos de campo y la simulación no llegan

a los 2 °C. En la evolución térmica de las capas inferiores (12 m de profundidad) se aprecian ciertos retrasos temporales de los picos simulados, además de ser un poco más exagerados que los medidos en campo. En cuanto a la disminución de temperaturas que se presenta en otoño, se puede ver que el modelo define los cambios de temperatura del agua y la rotura de la termoclina correctamente, aunque el perfil situado a los 12 m de profundidad queda aproximadamente medio grado por debajo de las temperaturas medidas. A partir del día 282, se puede apreciar que los perfiles de temperatura calculados por el modelo son unos 2 grados más fríos que los medidos en campo, esta diferencia se mantiene hasta el final del estudio.

En la Figura 89 se muestra la evolución térmica del perfil de la sonda multiparamétrica (datos interpolados cada 6 h) y en el gráfico superpuesto se presenta la evolución de la temperatura del agua a diferentes profundidades obtenidas mediante CE-QUAL-W2 (segmento 58, resultados diarios, líneas continuas).

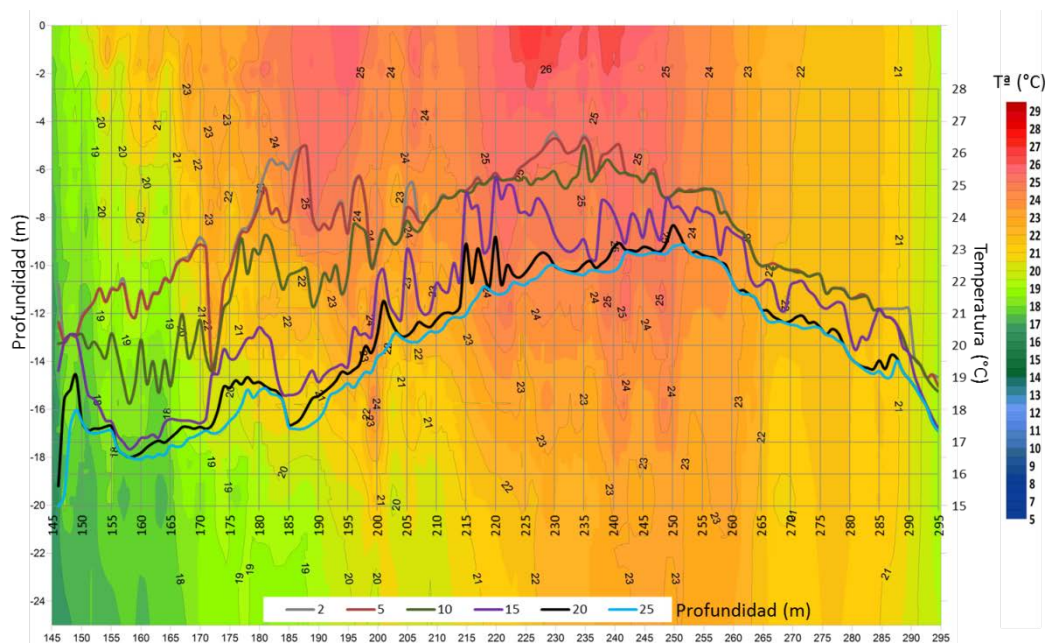


Figura 89. Comparación de la evolución térmica del agua a diferentes profundidades. La figura del fondo muestra la evolución térmica del agua medida por la sonda multiparamétrica (plataforma Flumen, datos cada 6h) y el gráfico de líneas superpuesto muestra la evolución de la temperatura del agua calculada por el programa CE-QUAL-W2 (segmento 58; promedio diario). Año 2009.

La evolución y las tendencias de los perfiles simulados presentados en la Figura 89 (segmento 58) se asimilan a los de la Figura 87 (segmento 29). Las principales diferencias son que, en este último, la columna de agua es mayor, el gradiente térmico no es tan acusado y se nota más el efecto de la extracción de la presa de Ribarroja debido a su proximidad. Como el segmento 58 se encuentra a unos 30 Km aguas abajo de la confluencia del río Segre

con el río Ebro, la columna de agua presenta mayor mezcla y la termoclina no suele ser tan brusca.

Para observar de forma detallada la evolución térmica del embalse, en las figuras siguientes se comparan los datos medidos con los datos calculados a profundidades de 2, 5, 10, 15 y 20 m respectivamente. Se puede apreciar buena tendencia de ajuste (con algunas singularidades), en prácticamente todas las profundidades salvo días puntuales.

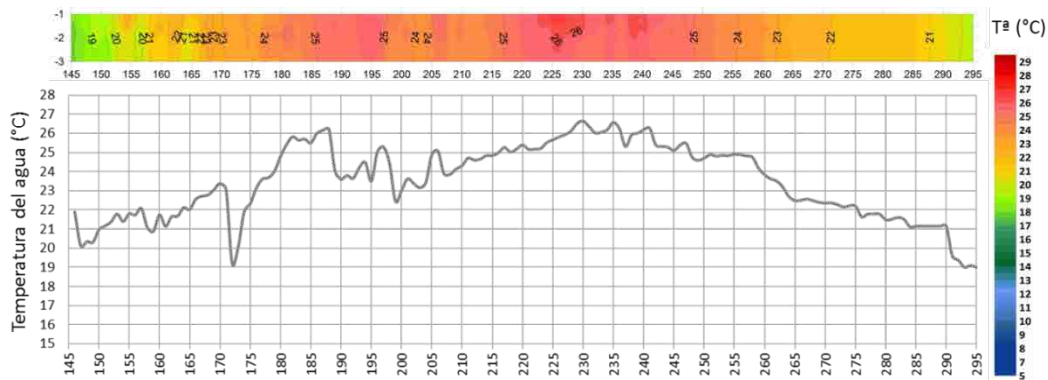


Figura 90. Año 2009. Gráfico superior: evolución térmica del embalse a 2 m de profundidad en la plataforma Flumen (datos cada 6 h, interpolados). Gráfico inferior: evolución térmica del embalse a 2 m de profundidad simulados por el modelo CE-QUAL-W2 (segmento 58, capa a 2 m de profundidad).



Figura 91. Año 2009. Gráfico superior: Evolución térmica del embalse a 5 m de profundidad en la plataforma Flumen (datos cada 6 h, interpolados). Gráfico inferior: Evolución térmica del embalse a 5 m de profundidad simulados por el modelo CE-QUAL-W2 (segmento 58, capa a 5 m de profundidad).



Figura 92. Año 2009. Gráfico superior: evolución térmica del embalse a 10 m de profundidad en la plataforma Flumen (datos cada 6 h, interpolados). Gráfico inferior: evolución térmica del embalse a 10 m de profundidad simulados por el modelo CE-QUAL-W2 (segmento 58, capa a 10 m de profundidad).

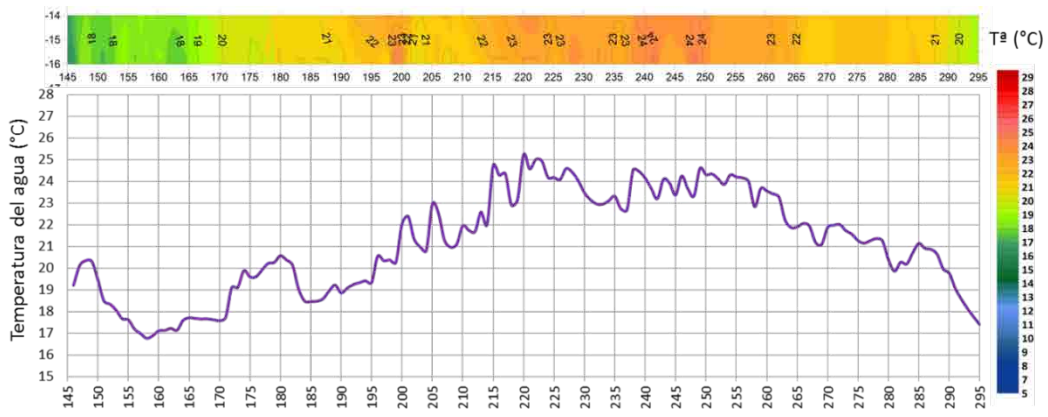


Figura 93. Año 2009. Gráfico superior: evolución térmica del embalse a 15 m de profundidad en la plataforma Flumen (datos cada 6 h, interpolados). Gráfico inferior: evolución térmica del embalse a 15 m de profundidad simulados por el modelo CE-QUAL-W2 (segmento 58, capa a 15 m de profundidad).



Figura 94. Año 2009. Gráfico superior: evolución térmica del embalse a 20 m de profundidad en la plataforma Flumen (datos cada 6 h, interpolados). Gráfico inferior: evolución térmica del embalse a 20 m de profundidad simulados por el modelo CE-QUAL-W2 (segmento 58, capa a 20 m de profundidad).

En la Figura 95 se muestra la comparación de la componente horizontal del vector velocidad en la dirección del eje del segmento de cálculo, que es equivalente a la dirección del eje del cauce, entre los datos medidos en la plataforma (Figura 95 inferior) y los datos calculados (Figura 95 superior). El orden de magnitud y las tendencias se han simulado correctamente. Se destaca la línea de los 20 m de profundidad (de color azul claro) en la que se aprecian los mayores valores, especialmente en época de estratificación (valores entre 4 y 8 cm/s). Se puede observar que, especialmente en la época de estratificación, la circulación predominante tiene lugar entre los 15 y los 22 m de profundidad llegando a superar los 10 cm/s puntualmente. Análogamente al estudio hidrodinámico, por encima de los 5 m de profundidad, se observan valores longitudinales de la velocidad muy pequeños en las proximidades de la presa (de 0 a 2 cm/s).

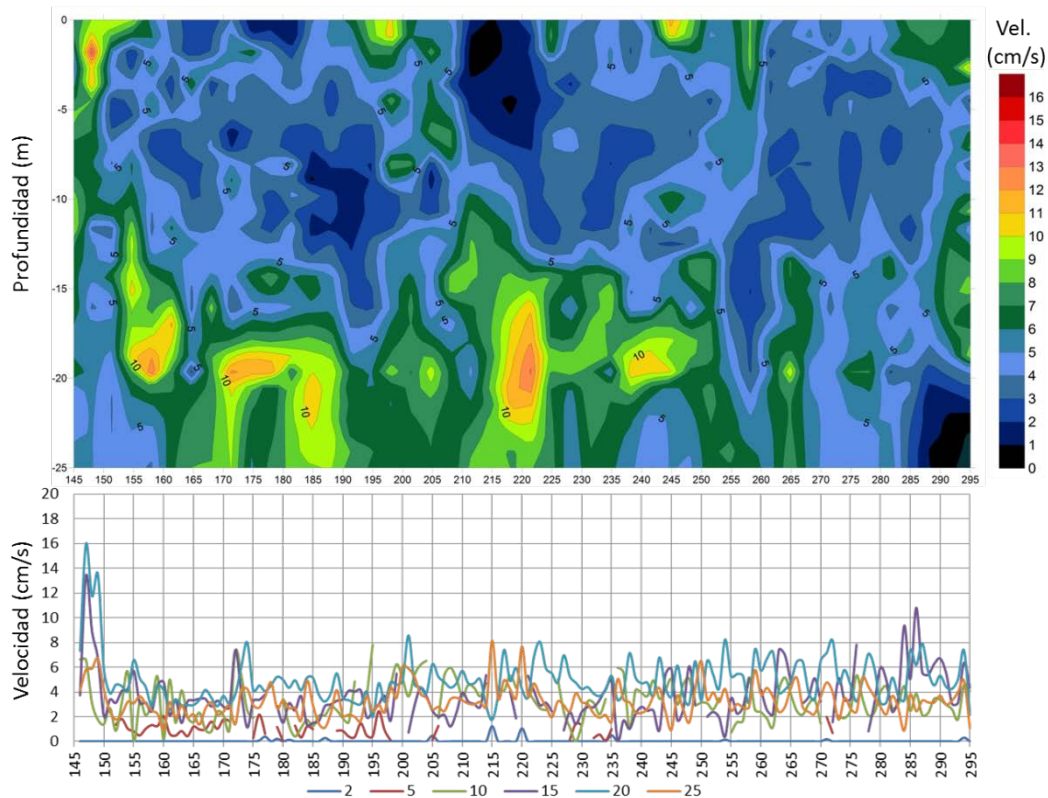


Figura 95. Comparación de la componente horizontal del vector velocidad del agua en dirección del segmento y a diferentes profundidades. Datos medidos en la figura superior (sonda multiparamétrica situada en la plataforma Flumen, datos cada 6h) y datos calculados en el gráfico inferior (segmento 58, modelo CE-QUAL-W2, medias diarias). Año 2009.

6.4.2.2 Discusión

El comportamiento hidrodinámico del embalse y consecuentemente también de las simulaciones numéricas se puede subdividir en dos grandes bloques (especialmente en época de estratificación): la circulación superficial y la profunda. La transición entre ambas (termoclina) es el punto más conflictivo y el que presenta mayor incertidumbre en el ajuste de las simulaciones. Al presentar un gradiente tan importante los cambios entre una celda de cálculo y las contiguas pueden ser importantes.

En cuanto a la circulación y el proceso de calentamiento y enfriamiento del bloque superficial se ha podido observar que:

- El modelo CE-QUAL-W2 es más sensible a los cambios meteorológicos que el propio embalse de Ribarroja, es decir, los cambios en la meteorología, especialmente radiación solar y efectos del viento, se notan más en los resultados del modelo que en las medidas de campo.
- Los picos de los datos de campo aparecen menos acusados que los resultados de las simulaciones mediante CE-QUAL-W2. Este hecho puede ser debido al promediado diario de los datos de campo.

En cuanto a la evolución térmica en profundidad se constata que:

- Las temperaturas que se presentan en profundidad (color morado, azul claro y naranja) se pueden ver afectadas por la suposición de las condiciones iniciales de temperatura. Debido a la falta de datos se utilizó la media semanal de los años 1998 y 1999, como se explicó anteriormente (apartado 5.2.1.4.1).
- En algunos casos, el modelo CE-QUAL-W2 presenta cierto retraso comparando los resultados de la simulación con la llegada del pico a la boya o a la plataforma en los datos muestreados. Este error puede ser de +/- un día, correspondiente al paso de tiempo de cálculo de los resultados.
- El modelo simula correctamente la forma del perfil de temperaturas, aunque para algunos periodos comprendidos entre los días 155-170 o 255-295, las temperaturas simuladas quedan entre uno y dos grados por debajo de las muestreadas en campo.

En cuanto al campo de velocidades, se observa que el modelo CE-QUAL-W2 es capaz de simular las tendencias, el orden de magnitud y las singularidades del flujo. Se distinguen dos zonas de circulación: la superior, correspondiente al epilimnion con velocidades muy pequeñas, y en el hipolimnion, zona de circulación predominante en la que se tienen valores de 8 a 10 cm/s.

6.4.3 Validación del modelo

Para la validación del modelo numérico del embalse de Ribarroja mediante CE-QUAL-W2 se han utilizado los datos meteorológicos de caudales y temperaturas correspondientes al año 2010. Para esta simulación se utilizaron las condiciones iniciales de temperatura correspondientes para este año, por lo que únicamente se modificó el fichero del perfil vertical de temperaturas (*vpr.npt*). En cuanto a los parámetros de cálculo propios del modelo CE-QUAL-W2 se utilizaron los resultantes del proceso de calibración (apartado 6.4.2).

Para la validación se compararon los resultados simulados con CE-QUAL-W2 a partir de los datos de 2010 con los datos de campo obtenidos durante la campaña de campo de 2010.

6.4.3.1 Comparación datos de campo con el modelo

En la Figura 96 se puede observar la comparación de la evolución térmica en los termistores de la boya de Almatret (línea continua) con los resultados obtenidos del modelo en las capas correspondientes (segmento 29) a las mismas profundidades (línea punteada), y en la Figura 97 la diferencia de las mismas.

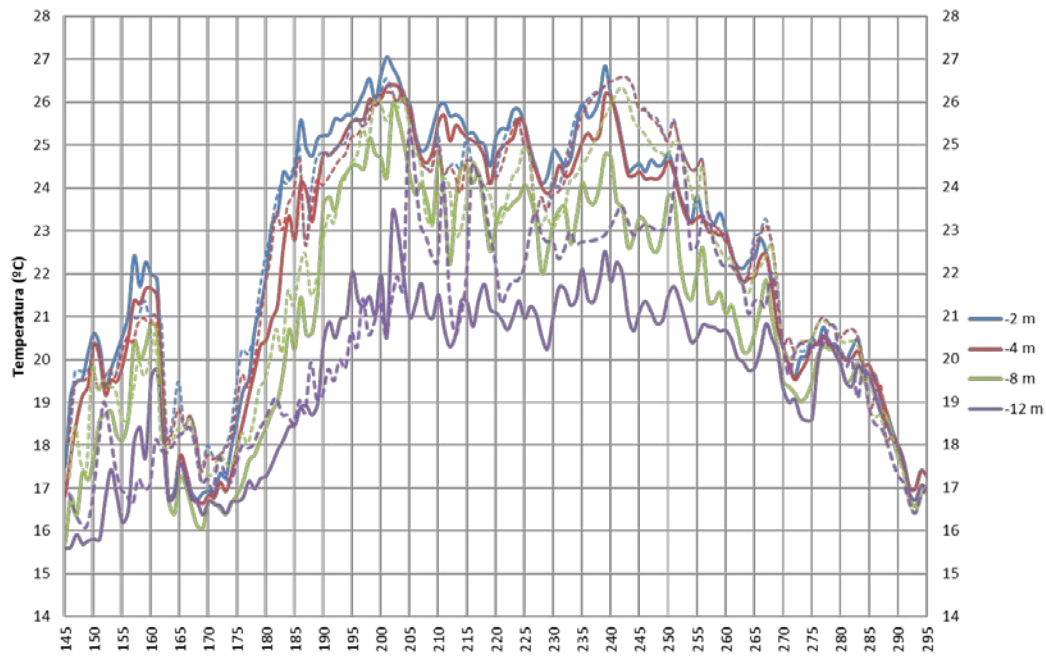


Figura 96. Comparación de la evolución térmica del agua a diferentes profundidades (2, 4, 8, y 12 m) en la boya de Almatret (líneas continuas, promedio diario) y los resultados calculados por el modelo CE-QUAL-W2 (líneas punteadas, segmento 29). Año 2010.

El modelo simula correctamente el primer periodo de estratificación. Se puede apreciar que las capas a 2, 4 y 8 m de profundidad se ajustan aceptablemente a las temperaturas medidas por los termistores. A mayor profundidad, la tendencia difiere en comparación con las medidas en campo, pero esto puede ser debido a la condición de temperatura del río impuesta en la entrada, aun así se puede observar el ajuste en los picos de caudal y su efecto en la columna de agua.

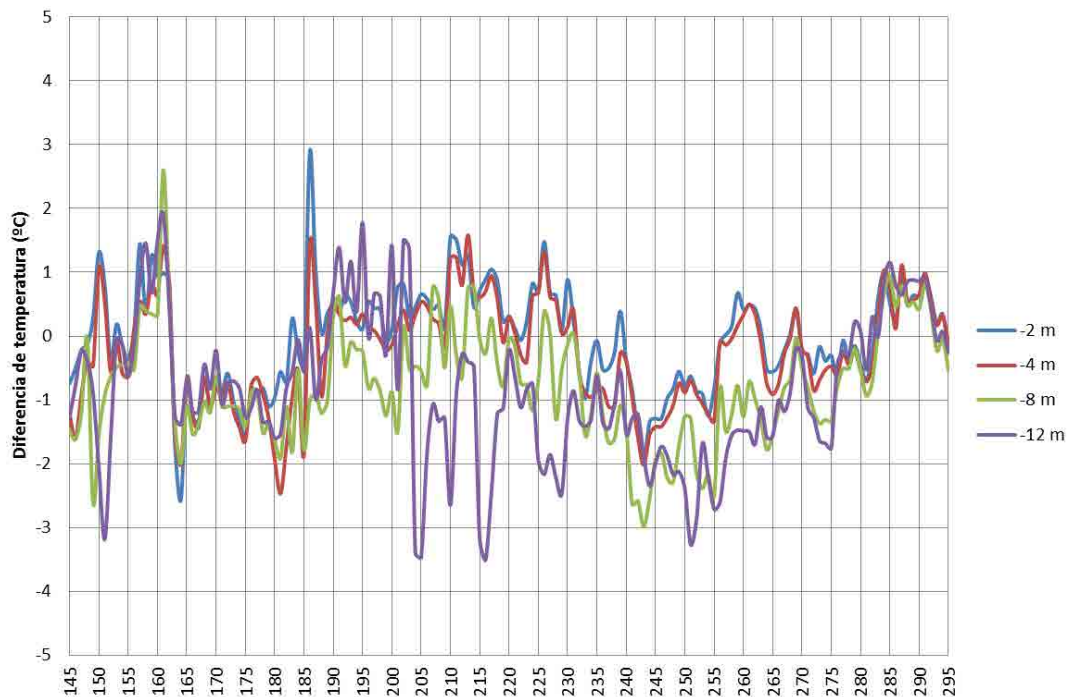


Figura 97. Diferencia de la evolución térmica del agua a diferentes profundidades (2, 4, 8 y 12 m) de los datos medidos (boya de Almatret) y calculados mediante CE-QUAL-W2 (segmento 29). Año 2010.

El modelo simula con exactitud la rotura de la termoclina (día 162) aunque la mezcla del embalse en la simulación llega a los 18 °C, mientras que en la boya se midieron temperaturas del orden de los 16.8 °C. Este error provoca que en el periodo de tiempo que va del día 162 al 175 las temperaturas simuladas sean un grado superiores a las medidas en la boya.

El segundo periodo de estratificación empieza alrededor del día 170 y el modelo sigue la tendencia de las temperaturas medidas hasta el día 205 (especialmente en superficie).

A partir del día 205 se presentan diferencias en las capas más profundas, especialmente notorias en los días de pequeños picos de caudal (en algunos casos superiores a los 2 °C), mientras que las capas superficiales siguen correctamente la tendencia de los datos medidos. En el periodo 220-260 el modelo CE-QUAL-W2 da resultados superiores en unos 2°C a los medidos en la capa de los 12 m. Durante el periodo 240-255, la temperatura del agua en la simulación queda unos 2 grados más caliente que las muestreadas en campo en prácticamente para toda la columna de agua. Esto puede ser debido al efecto de la condición de temperatura en la entrada al embalse (media diaria de los años 1998 y 1999, promediada según los caudales).

Desde el día 260, el modelo simula correctamente la segunda rotura de la termoclina, especialmente en cuanto a la temperatura de las capas superficiales.

A partir del día 275 la temperatura de la columna de agua (embalse prácticamente mezclado) se ajusta a la medida por la cadena de termistores.

En la Figura 98 se observa la evolución térmica del embalse medida en la plataforma Flumen (gráfico de fondo) y se compara con la calculada por el modelo en el segmento 58 (líneas continuas).

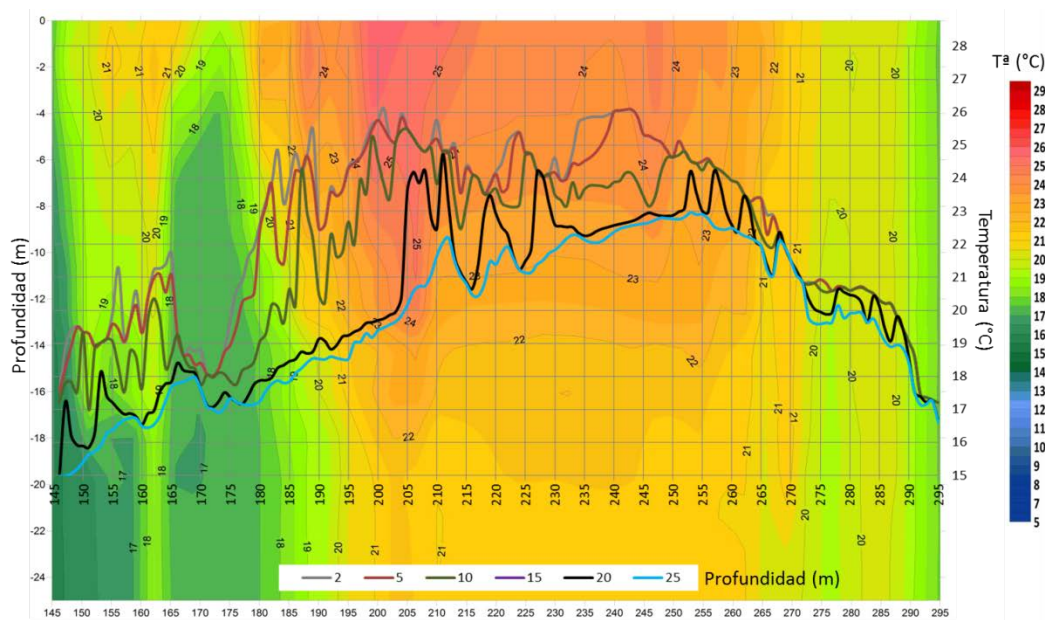


Figura 98. Comparación de la evolución térmica del agua a diferentes profundidades por la sonda multiparamétrica en la plataforma Flumen (gráfico de fondo, datos cada 6h) y calculada por el programa CEQUAL-W2 (líneas punteadas, segmento 58, promedio diario). Año 2010.

A grandes rasgos, la evolución y las tendencias simuladas presentadas en la Figura 98 (segmento 58) se asimilan a los de la Figura 97 (segmento 29). La principal diferencia es que la columna de agua es mayor por el hecho de estar en las proximidades de la presa de Ribarroja. Dado que el segmento 58 se encuentra unos 30 Km aguas abajo de la confluencia entre los ríos Ebro y Segre, la columna de agua presenta mayor mezcla y el gradiente de la termoclina no suele ser tan brusco.

Para obtener la evolución térmica del embalse en función de la profundidad se han comparado las simulaciones con los datos reales, resultando la Figura 99 a la Figura 103,

mostrando respectivamente 2 m, 5 m, 10 m, 15 m y 20 m. Se aprecia buena tendencia de ajuste prácticamente en todas las profundidades salvo días puntuales.

La singular rotura de termoclina del periodo 165-170, con el consecuente descenso brusco de temperaturas se puede apreciar en todas las profundidades pero más notablemente en las capas superficiales.

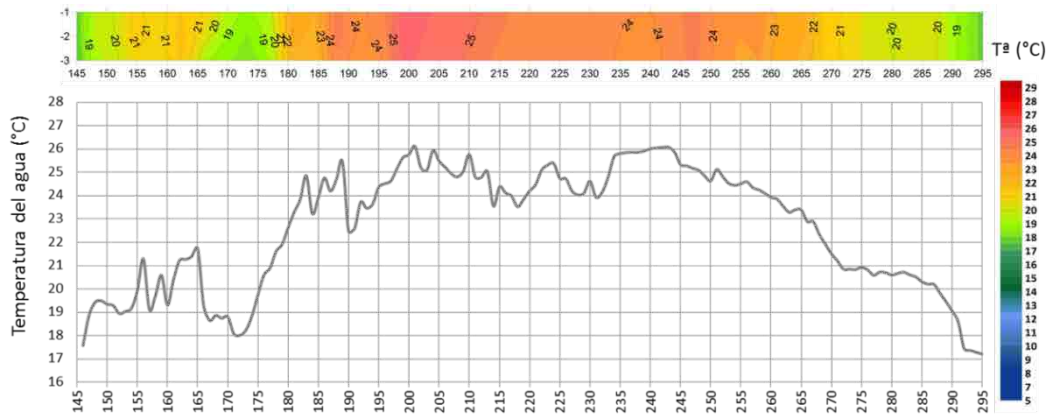


Figura 99. Año 2010. Gráfico superior: evolución térmica del embalse a 2 m de profundidad en la plataforma Flumen (datos cada 6 h, interpolados). Gráfico inferior: evolución térmica del embalse a 2 m de profundidad simulados por el modelo CE-QUAL-W2 (segmento 58, capa a 2 m de profundidad).



Figura 100. Año 2010. Gráfico superior: evolución térmica del embalse a 5 m de profundidad en la plataforma Flumen (datos cada 6 h, interpolados). Gráfico inferior: evolución térmica del embalse a 5 m de profundidad simulados por el modelo CE-QUAL-W2 (segmento 58, capa a 5 m de profundidad).



Figura 101. Año 2010. Gráfico superior: evolución térmica del embalse a 10 m de profundidad en la plataforma Flumen (datos cada 6 h, interpolados). Gráfico inferior: evolución térmica del embalse a 10 m de profundidad simulados por el modelo CE-QUAL-W2 (segmento 58, capa a 10 m de profundidad).



Figura 102. Año 2010. Gráfico superior: evolución térmica del embalse a 15 m de profundidad en la plataforma Flumen (datos cada 6 h, interpolados). Gráfico inferior: evolución térmica del embalse a 15 m de profundidad simulados por el modelo CE-QUAL-W2 (segmento 58, capa a 15 m de profundidad).

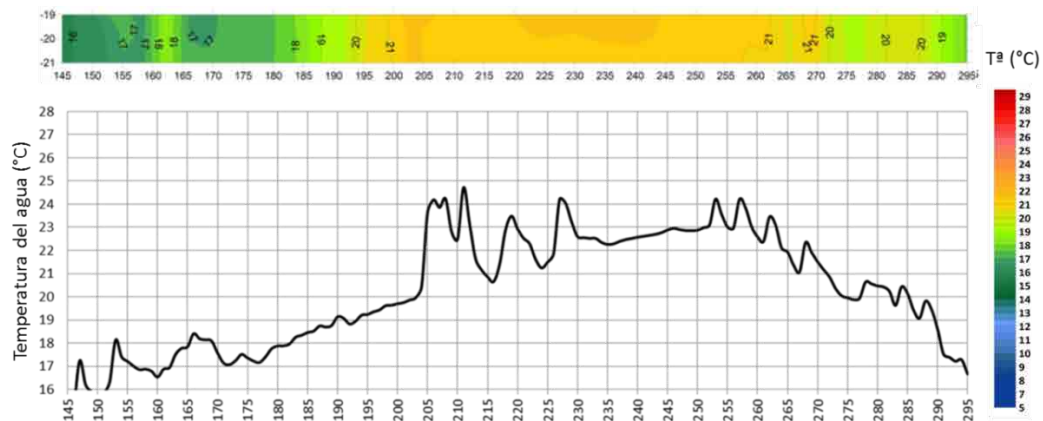


Figura 103. Año 2010. Gráfico superior: evolución térmica del embalse a 20 m de profundidad en la plataforma Flumen (datos cada 6 h, interpolados). Gráfico inferior: evolución térmica del embalse a 20 m de profundidad simulados por el modelo CE-QUAL-W2 (segmento 58, capa a 20 m de profundidad).

En la Figura 104 se presenta la comparación de la componente horizontal del vector velocidad horizontal en la dirección del segmento de cálculo entre los resultados del cálculo (Figura 104 inferior) con los datos medidos en la plataforma (Figura 104 superior). El orden de magnitud y las tendencias se han simulado correctamente. Se destaca el aumento de los valores, de acuerdo con los eventos de picos de caudal en el periodo de avenida, que tiene lugar entre los días 165-173, en los que se superan los 12 cm/s.

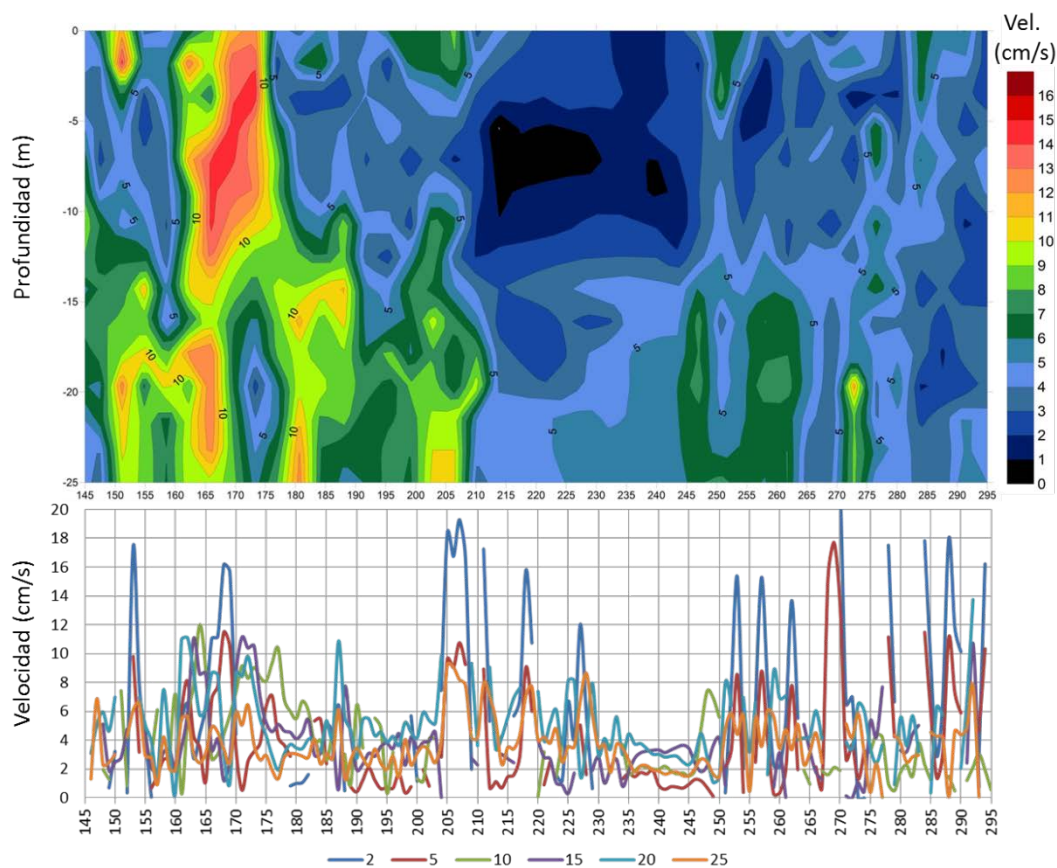


Figura 104. Comparación de la componente horizontal del vector velocidad del agua a diferentes profundidades entre los datos medidos en la plataforma Flumen (gráfico superior, datos cada 6h) y los calculados por el programa CE-QUAL-W2 (segmento 58, medias diarias). Año 2010.

6.4.3.2 Discusión y comentarios

Los parámetros de calibración del modelo, obtenidos en la calibración realizada para el año 2009 se utilizaron para la validación del modelo, usando los datos del año 2010. El año 2010 es un año con condiciones muy diferentes a las utilizadas para la calibración. Aun así, el modelo CE-QUAL-W2 es capaz de simular los resultados con precisión, especialmente en cuanto a temperaturas superficiales, intervalos de tiempo, inicio de la estratificación y roturas de la termoclina.

Como ya se apreció en el estudio de calibración, el modelo CE-QUAL-W2 es más sensible a los cambios meteorológicos que la gran masa de agua del embalse.

En cuanto al campo de velocidades se observa que el modelo CE-QUAL-W2 es capaz de simular las tendencias, el orden de magnitud y las singularidades del flujo. Se distinguen dos zonas de circulación diferenciadas: la superior, correspondiente al epilimnion con magnitudes muy pequeñas, y la inferior, zona de circulación predominante en la que para eventos de caudales importantes se llega a los 15 cm/s en la zona de la plataforma Flumen.

6.4.4 Evolución temporal de la hidrodinámica del embalse

Después de analizar la bondad del ajuste del modelo para calcular las temperaturas del agua y de las componentes horizontales de los vectores de velocidad (en la dirección de los segmentos) en los puntos de muestreo de datos (boya de Almatret y plataforma Flumen) se describe la evolución térmica e hidrodinámica para los perfiles a lo largo del embalse obtenidos mediante CE-QUAL-W2.

En los perfiles longitudinales que se presentan a continuación, la posición de la boya (segmento 29) y de la plataforma (segmento 58) se señala mediante una línea vertical de color negro; la posición de las dos entradas al embalse (ríos Ebro y Segre) y la posición de la toma de fondo se ha marcado con una flecha negra.

Se debe tener en cuenta el efecto producido por las condiciones de contorno en los primeros y últimos segmentos, por lo que los resultados en los contornos pueden verse alterados por dichos efectos y no dar valores acordes con la realidad.

6.4.4.1 Año 2009

En este apartado se describen la evolución temporal de la temperatura del agua y de las componentes horizontales de los vectores de velocidad (en la dirección de los segmentos) en las dos dimensiones de estudio (longitudinal, a lo largo del embalse y vertical).

6.4.4.1.1 Evolución térmica del embalse

Al inicio de la simulación (día 147), el embalse se encuentra débilmente estratificado, en la Figura 105a se puede observar el paso del pico de caudal por la zona de la boya

correspondiente al día 145 en la entrada al embalse y el efecto de enfriamiento la columna de agua que provoca. Al cabo de unos tres días la estratificación ya se vuelve a restablecer en todo el embalse (Figura 105b).

A mediados de junio (alrededor del día 160-165), la estratificación empieza a hacerse más acusada y las temperaturas aumentan (Figura 105c). En la Figura 105c se puede observar que en los segmentos de aguas arriba, la entrada del río Ebro (agua más fría que la del embalse) hace que se enfríe la columna de agua, y que el agua procedente del embalse de Mequinenza se sitúe en el hipolimnion debido a su mayor densidad. La estratificación es más marcada en la zona de la boya que en la plataforma.

En la Figura 105d se puede observar el calentamiento superficial del embalse, así como la circulación del agua más fría procedente del río Ebro por el fondo, entrando con una temperatura de 17 °C. A medida que el agua de entrada al embalse avanza hacia aguas abajo, gana de uno a dos grados debido a la transferencia de calor. Se puede apreciar también la entrada del caudal de unos 200 m³/s procedentes del río Ebro que corresponde al pico del día 180.

Al cabo de una semana, en el día 186, Figura 105e, la circulación de agua más fría ha seguido su curso por la parte más profunda del embalse, mientras que el epilimnion ha seguido calentándose progresivamente debido a las condiciones meteorológicas.

Las temperaturas del epilimnion siguen la evolución meteorológica, por lo que el evento del periodo comprendido entre los días 195-200 hace que las temperaturas superficiales del embalse disminuyan unos 2 grados, como se puede observar en la Figura 105e. Debido a la debilitación de la termoclina y al poco aporte de caudal, también se calienta el hipolimnion llegando a los 20°C desde la boya a las cercanías de la presa. Aguas arriba se aprecia la división entre el caudal de entrada y el hundimiento hacia capas más inferiores (alrededor del segmento 8).

A partir de esta fecha y para el resto del verano, el calentamiento superficial es gradual, debido a las condiciones meteorológicas. Al final del verano se llega a tener una estratificación máxima (máximo gradiente) alrededor del día 230, Figura 105f. Esta estratificación se mantiene aproximadamente hasta el día 245 y a partir de este momento, debido a las condiciones meteorológicas las temperaturas superficiales del agua del embalse empiezan a disminuir.

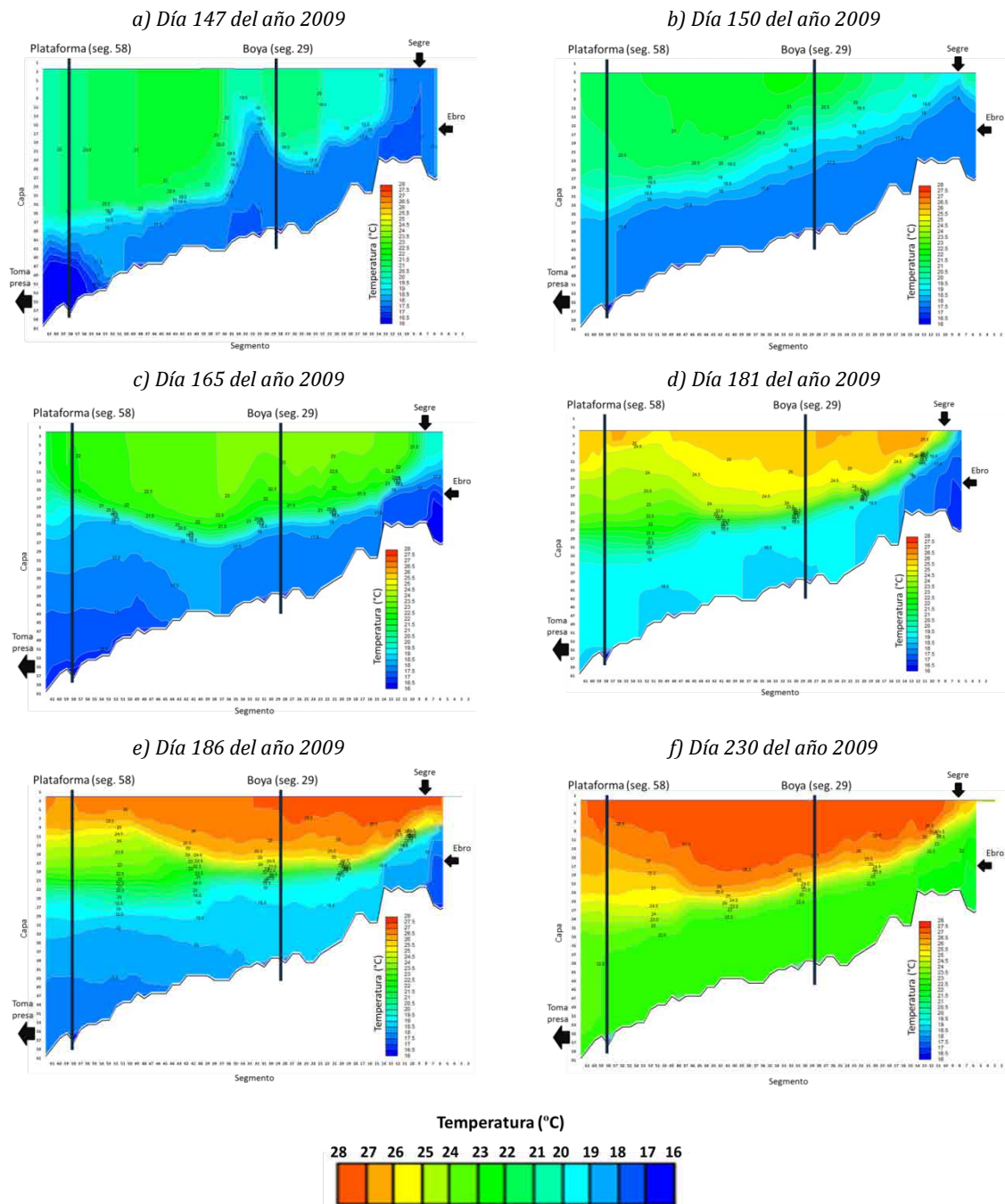


Figura 105 Resultados de la simulación mediante CE-QUAL-W2. Perfiles longitudinales de temperaturas del agua a lo largo del embalse de Ribarroja de Ebro, en los días julianos 147, 150, 165, 181, 186 y 230.

Como se observa en la Figura 106a, correspondiente al día 251, en verano las temperaturas del fondo se mantienen en los 22 °C, mientras que las temperaturas superficiales del agua han disminuido de los 26-27 °C a los 24-25 °C, por lo que el gradiente de la termoclina ya no es tan acusado. Este efecto, unido al pico de caudal del día 260,

propicia la rotura de la termoclina alrededor del día 250. En la Figura 106b, correspondiente al día 265, ya se puede observar que el embalse se encuentra prácticamente mezclado en su totalidad, el agua se encuentra a unos 21-22 °C.

A partir de esta fecha, las temperaturas de todo el embalse van disminuyendo gradualmente hasta el final del periodo de estudio. Se destaca un pequeño pico de entrada de agua fría procedente del río Segre en el día 289 que hace que el agua se enfríe, especialmente por la parte inferior y en el tramo aguas arriba.

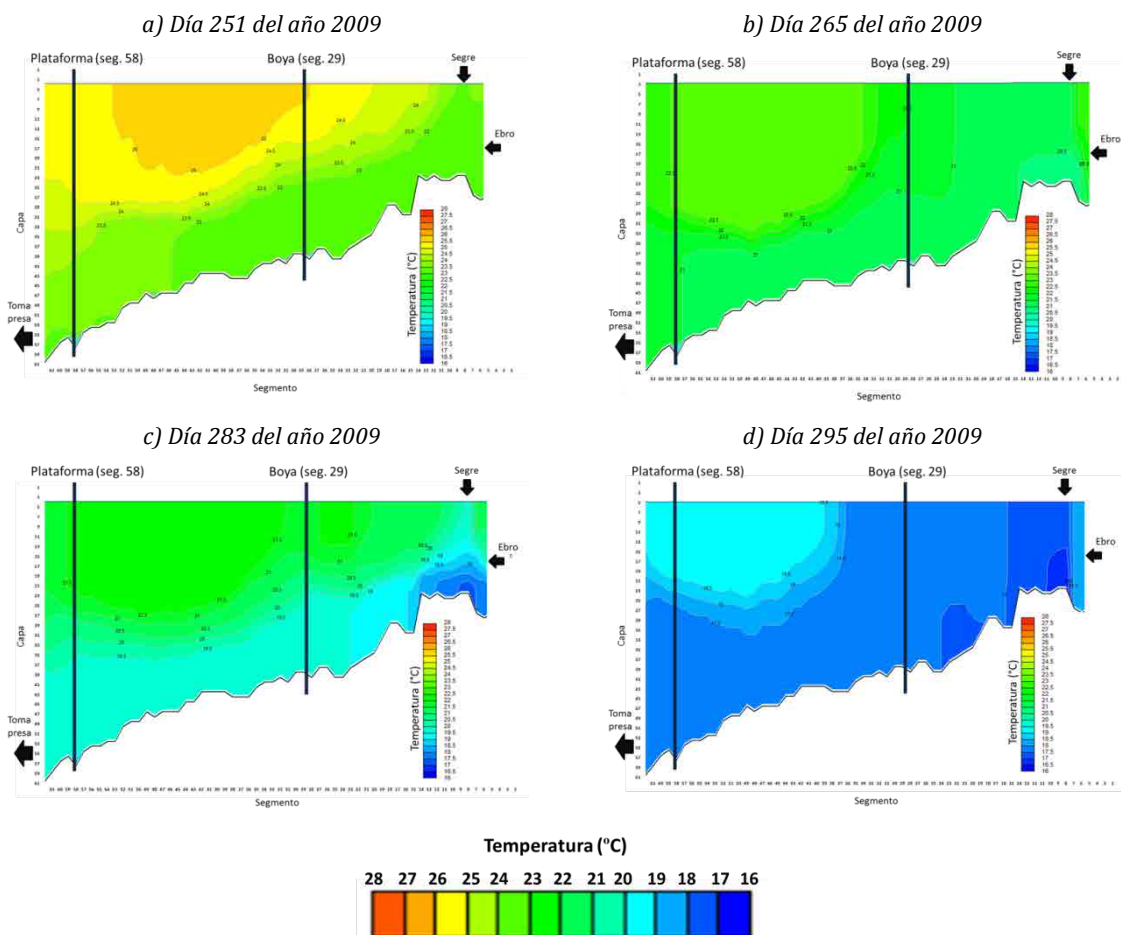


Figura 106 Perfiles longitudinales de temperaturas del agua a lo largo del embalse de Ribarroja de Ebro mediante CE-QUAL-W2, en los días julianos 251, 265, 283 y 295.

6.4.4.1.2 Velocidades horizontales

En la Figura 107 se presenta la evolución de la componente horizontal de la velocidad según el eje del río (m/s), o lo que es lo mismo en la dirección del segmento obtenida mediante CE-QUAL-W2, para el año 2009.

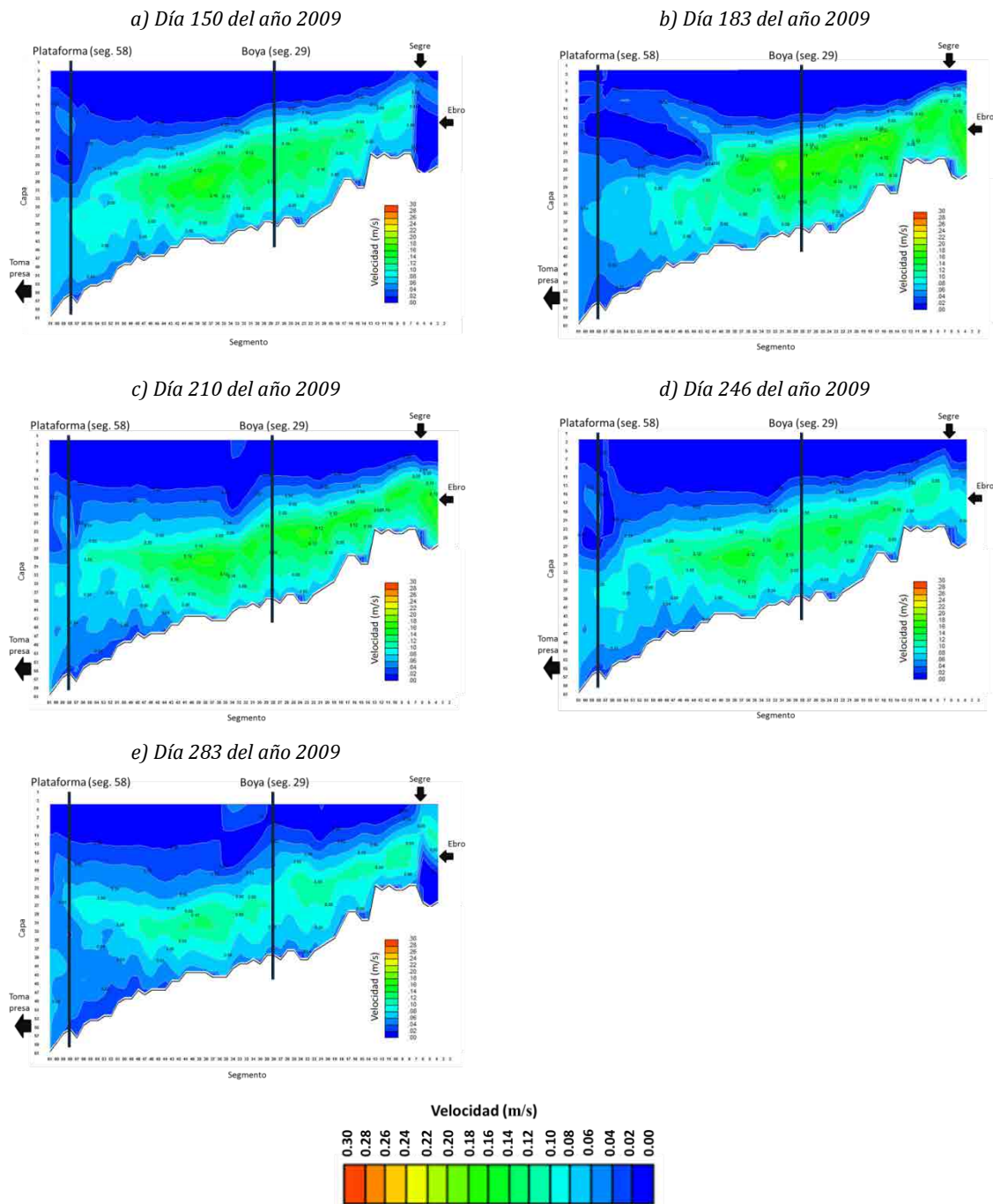


Figura 107 Perfiles longitudinales de la componente horizontal del vector de velocidad del agua en dirección del eje del cauce, en el embalse de Ribarroja de Ebro, mediante CE-QUAL-W2, para los días julianos 150, 183, 210, 246 y 283.

En la Figura 107a se observa el campo de velocidades para el día 150, en esta época la estratificación es débil y los caudales fueron importantes en los días anteriores (145 a 147). Las velocidades son superiores en el tramo medio del embalse (0.12 m/s) y disminuyen unos

pocos kilómetros antes de llegar a la presa (0.04 m/s). Se destaca la tendencia de velocidades máximas en la zona del hipolimnion, pero no en el fondo del embalse.

Como se puede apreciar, desde la Figura 107a hasta la Figura 23e en 2009 no hay mucha variación de valores de velocidad ni de la posición de la zona de circulación prioritaria, debido a que este periodo es muy constante en cuanto a caudales. Durante todo el periodo de estratificación se puede considerar que el agua está circulando mayormente por el hipolimnion, por lo que esta será mayormente el agua captada por las tomas de fondo de la presa de Ribarroja.

6.4.4.2 Año 2010

Después de realizar la validación del modelo para el año 2010 en los puntos de muestreo de datos (boya y plataforma Flumen), se describe para este mismo año, la evolución térmica y la evolución de la componente horizontal según el eje (en la dirección del segmento) de los vectores de velocidad.

6.4.4.2.1 Evolución térmica del embalse

Al inicio de la simulación, ver Figura 108a, el embalse está empezando a estratificarse. Antes de la entrada caudal pico correspondiente al día 160, el embalse se encuentra estratificado débilmente. En superficie se llegan a los 20-21 °C, mientras que en profundidad se tienen 17 °C. En días posteriores, ver Figura 108b y 24c, justo después del caudal pico en que se llega a los 700 m³/s, se puede observar una clara mezcla y una consiguiente disminución de temperaturas en todo el embalse (del orden de los 18 °C). La estratificación es más marcada en la zona de la boya que en la plataforma.

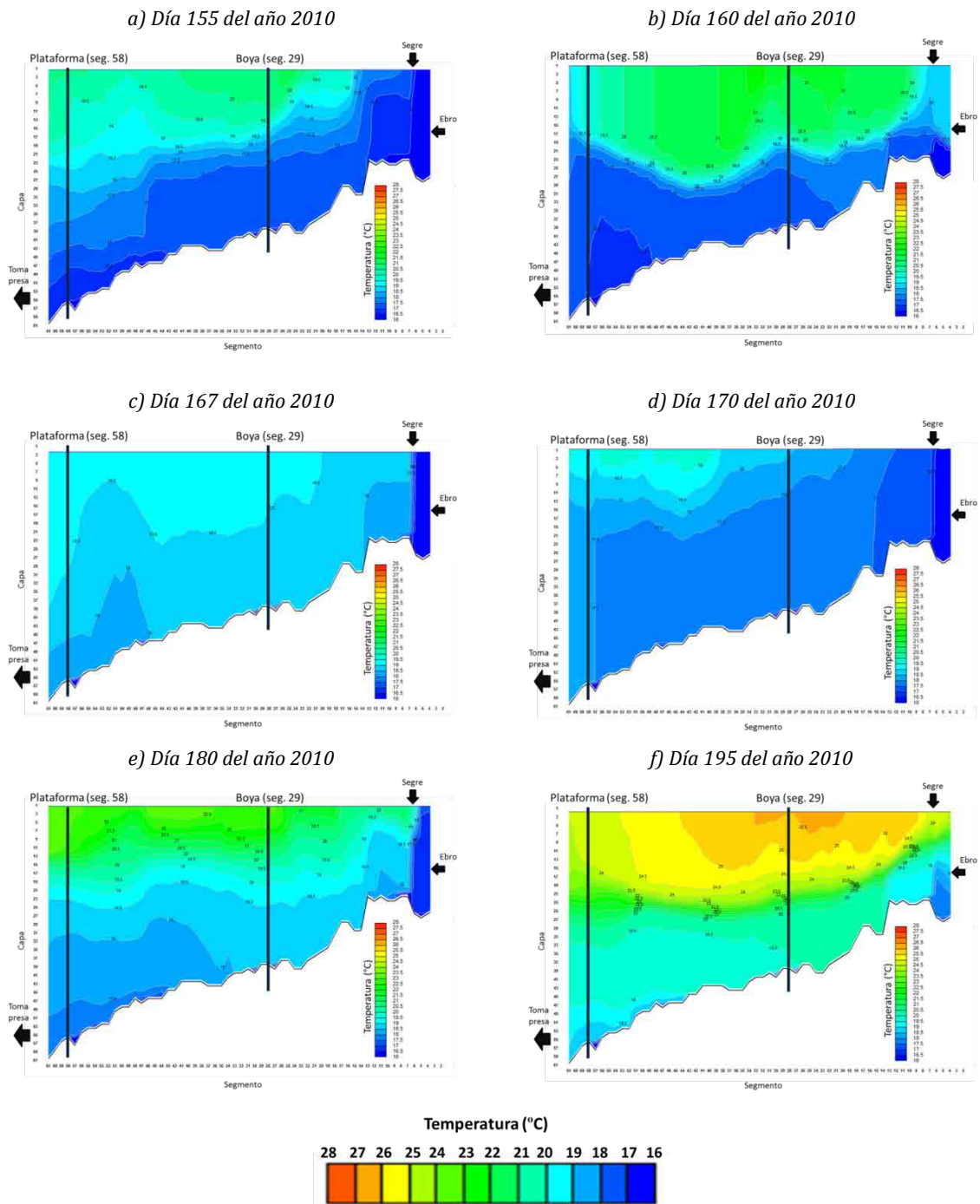


Figura 108 Perfiles longitudinales de temperaturas del agua a lo largo del embalse de Ribarroja de Ebro, mediante CE-QUAL-W2, para los días julianos 155, 160, 167, 170, 180 y 195.

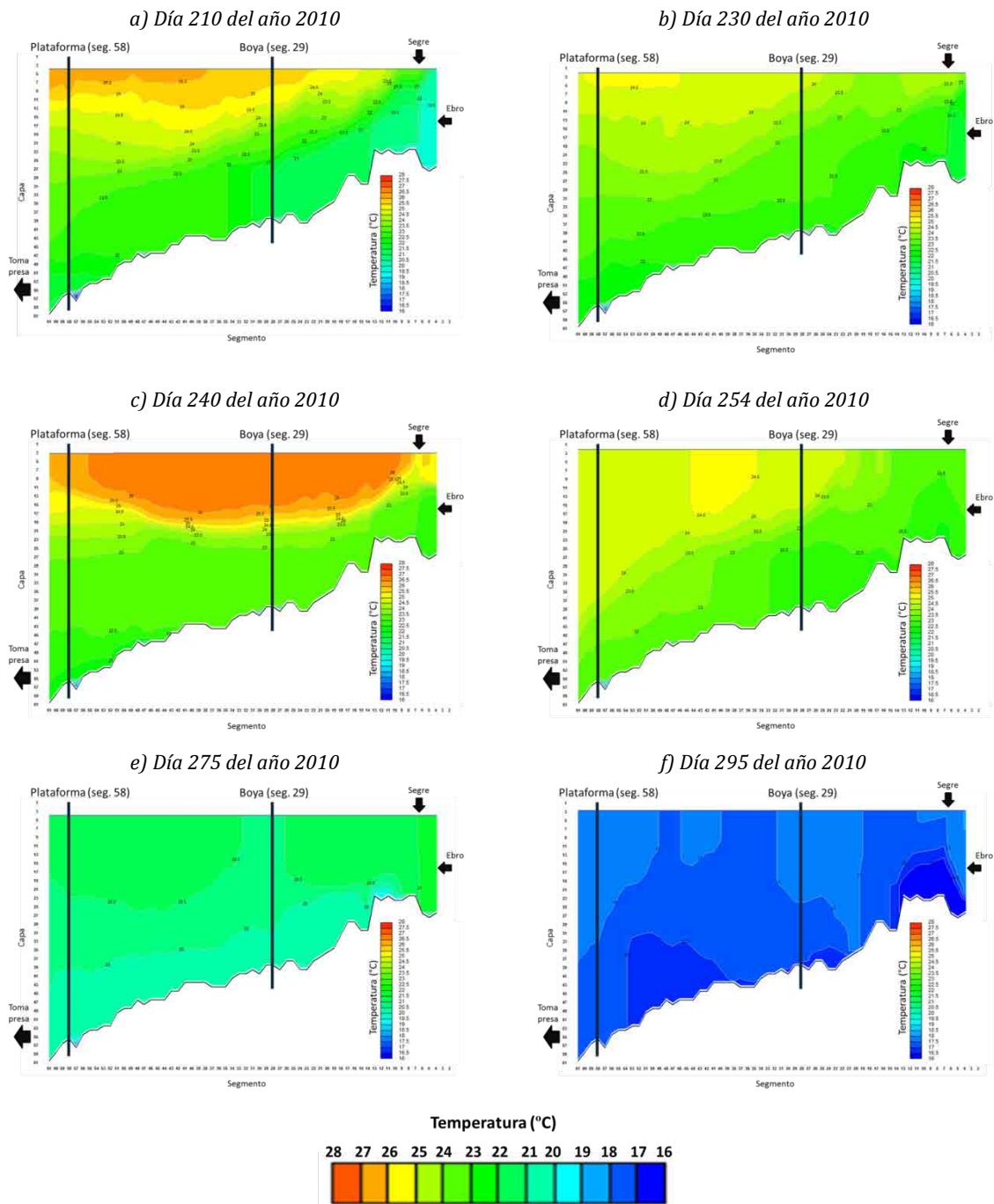


Figura 109 Perfiles longitudinales de temperaturas del agua a lo largo del embalse de Ribarroja de Ebro, mediante CE-QUAL-W2, para los días julianos 210, 230, 240, 254, 275 y 295.

A partir del día 170 se empieza a notar el inicio de la segunda etapa de estratificación, aunque los caudales de entrada siguen siendo importantes (Figura 108d). Diez días más tarde (Figura 108e, correspondiente al día 180), la estratificación ya es más notable (17.5 °C en profundidad y unos 22.5 °C en superficie).

El avance del verano, con el consecuente aumento de radiación solar, de la temperatura del aire y la disminución de los caudales de entrada, provoca el calentamiento del epilimnion, como se puede apreciar desde la Figura 108f hasta la Figura 109c.

Aguas arriba del embalse se aprecia la división entre el caudal de entrada (procedente del río Ebro a temperaturas más frías, a unos 16-17 °C) y el hundimiento del agua más fría hacia capas inferiores (alrededor del segmento 8, Figura 109c).

La estratificación máxima se mantiene aproximadamente hasta el día 250. Debido a las condiciones meteorológicas y a la entrada del otoño, las temperaturas superficiales del agua del embalse empiezan a bajar (Figura 109d).

La temperatura de todo el embalse va disminuyendo progresivamente hasta el final del periodo de estudio; en la Figura 109e se puede apreciar la estratificación débil correspondiente al día 275.

Las temperaturas del aire y la radiación solar siguen bajando y la gran masa de agua va perdiendo calor, al final del periodo de estudio (Figura 109f), el embalse se encuentra prácticamente mezclado en su totalidad a una temperatura entre los 17-19 °C.

6.4.4.2.2 Velocidades horizontales

En las figuras siguientes se presenta la evolución de la componente horizontal según el eje (en la dirección del segmento) de los vectores de velocidad obtenidos de la simulación mediante CE-QUAL-W2 para el año 2010.

En la Figura 110a se observa el campo de velocidades para el día 156, en esta época la estratificación aún es débil y los caudales han sido importantes en los días anteriores. Las velocidades son superiores (0.12 m/s) en el tramo medio del embalse (colores verdes) y disminuyen a unos pocos kilómetros antes de llegar a la presa (0.04 m/s).

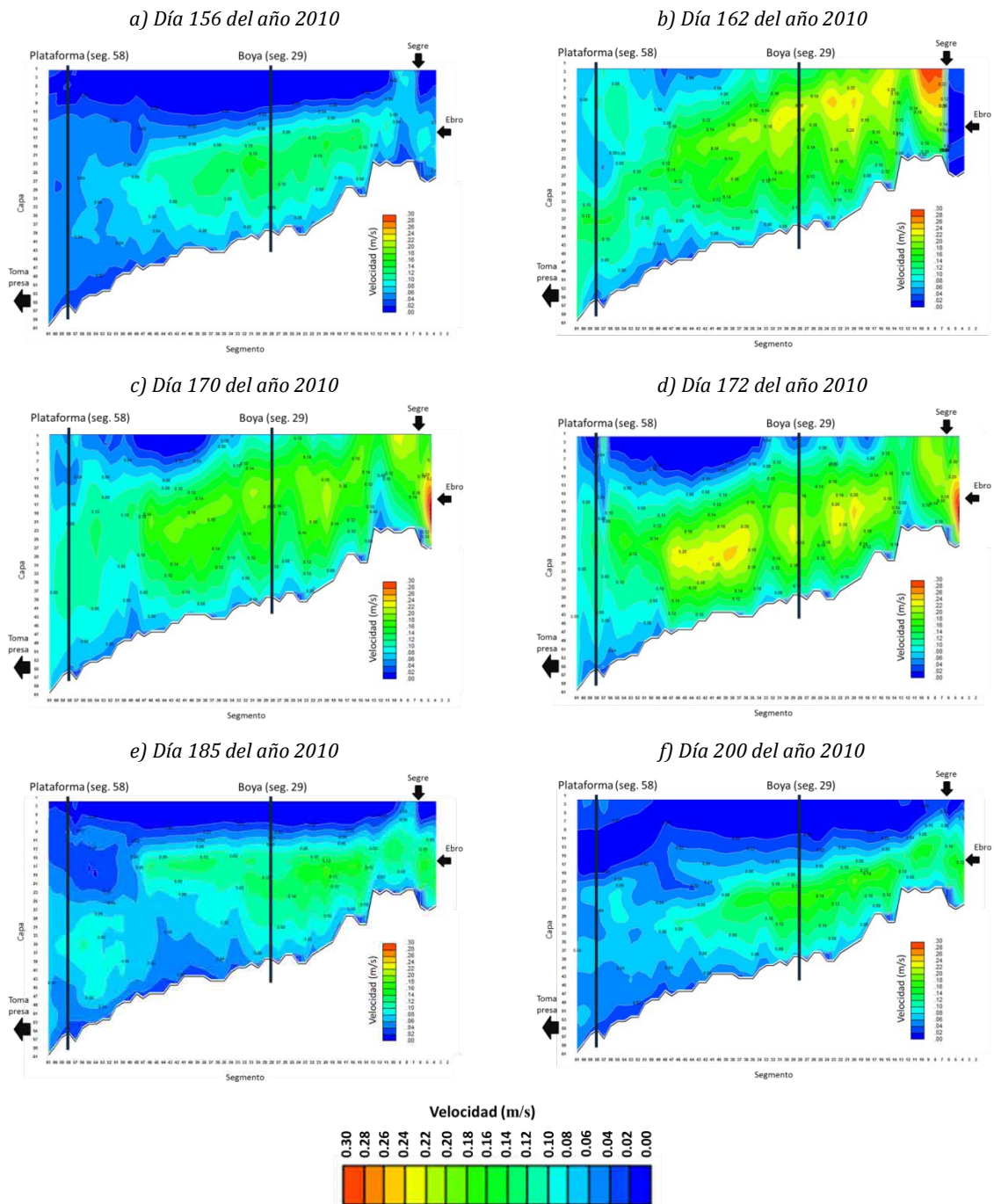


Figura 110 Perfiles longitudinales de la componente horizontal del vector de velocidad del agua a lo largo del embalse de Ribarroja de Ebro, obtenidos con CE-QUAL-W2, para los días julianos 156, 162, 170, 172, 185 y 200.

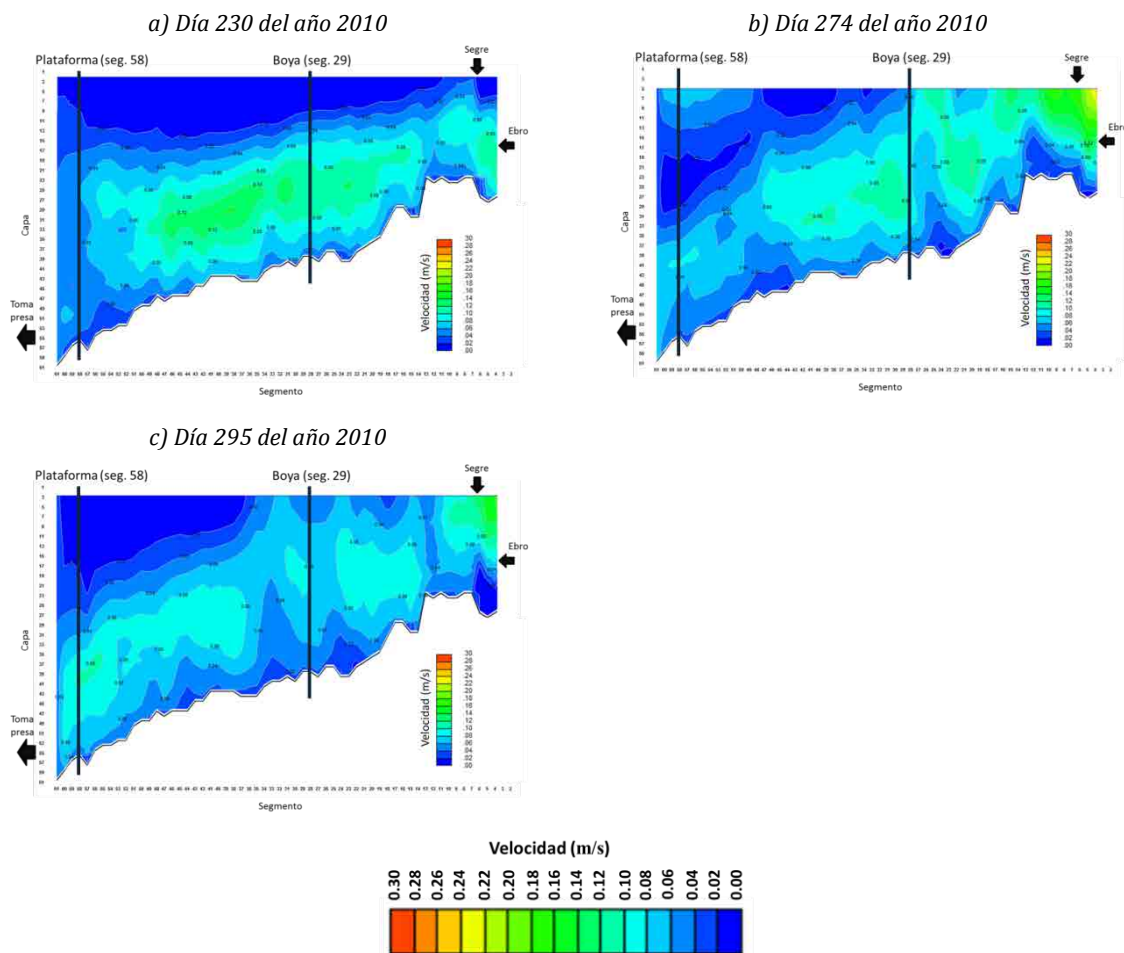


Figura 111 Perfiles longitudinales de la componente horizontal del vector de velocidad del agua a lo largo del embalse de Ribarroja de Ebro, obtenidos con CE-QUAL-W2, para los días julianos 230, 274 y 295.

En el periodo de avenidas del año 2010 hay un aumento importante de velocidades, especialmente en la entrada del embalse, inicialmente procedente del río Segre con agua caliente y posteriormente del río Ebro con agua fría, en la que se llegan a valores ente 0.24 m/s y 0.26 m/s. La posición de circulación (colores amarillos y verde de la Figura 110b), en los primeros kilómetros de la zona de estudios es más superficial, en la zona de la boya se encuentra entre los 6 m y los 8 m de profundidad y en la zona de la plataforma las mayores velocidades longitudinales tienen lugar entre 18 m y 20 m de profundidad. Se destaca la disminución de la magnitud de las velocidades a lo largo de la longitud del embalse, a medida que se gana profundidad, pasando de los 0.20 m/s en la zona de la boya a los 0.10 m/s en la zona de la plataforma.

Se destaca un importante cambio de grosor del epilimnion a lo largo de la longitud del embalse: en el tercio aguas arriba el grosor de esta capa se encuentra entre los 3 y los 5

metros, a lo largo del embalse va ganando en profundidad, hasta llegar a tener más de 10 m en las proximidades de la presa.

Debido a la circulación del agua en función de la temperatura, el emplazamiento del agua más fría por densidad provoca una circulación predominante por el hipolimnion.

Con el avance de la estratificación se nota una clara división vertical entre capas de agua. En este periodo de tiempo, el agua del epilimnion está prácticamente quieta (Figura 110a-d). Las velocidades mayores (0.20 m/s) se concentran en los dos tercios del extremo aguas arriba del embalse (colores amarillo y naranja) y disminuyen al acercarse a la presa debido al aumento de calado.

Durante todo el periodo de estratificación, se puede considerar que el agua está circulando por el hipolimnion y será mayormente el agua captada por las tomas de fondo de la presa. Como se puede apreciar, de la Figura 110f (día 200) a la Figura 111b (día 274) no hay mucha variación de los valores de velocidad hasta la rotura de la termoclina y las variaciones de estas magnitudes dependen de los caudales de entrada.

Después de la rotura de la termoclina (día 295) junto con la disminución de valores de los caudales entrantes, las velocidades disminuyen hasta unos 0.06 m/s en la zona de circulación predominante, mientras que se observa mayor movimiento en el epilimnion debido a la mezcla (ver Figura 111c).

6.4.5 Tiempo de permanencia

El tiempo de residencia se define como el tiempo preciso para que un volumen de agua que se encuentra en un cierto momento en una determinada posición salga del embalse. El tiempo de residencia más el tiempo de permanencia es el tiempo de tránsito a lo largo del embalse considerado (Hasanloo & Etemad-Shahidi, 2011; Rueda *et al.*, 2006).

De este modo es importante destacar que al inicio de la simulación y en los segmentos de entrada al embalse el parámetro tiempo de permanencia es 0; por lo que es bueno empezar la simulación en un estado inicial en que el embalse se encuentre mezclado.

6.4.5.1 Año 2009

Como se comprobó con el estudio del campo de velocidades, se distinguen dos zonas claramente diferenciadas en cuanto a circulación del agua: la superficial y la profunda. La circulación principal o superficial tiene lugar por el hipolimnion, donde se puede observar que el tiempo de permanencia del agua, en las proximidades de la presa y a profundidades superiores a 12-15 m, es de unos 7-8 días. Los valores en profundidad llegan a unos 8-10 días en verano debido a caudales inferiores (Figura 112a) pero los valores en las capas superficiales pasan de 25 en el día 196 (Figura 112b) a valores de 38 días para el día 255 (Figura 112c).

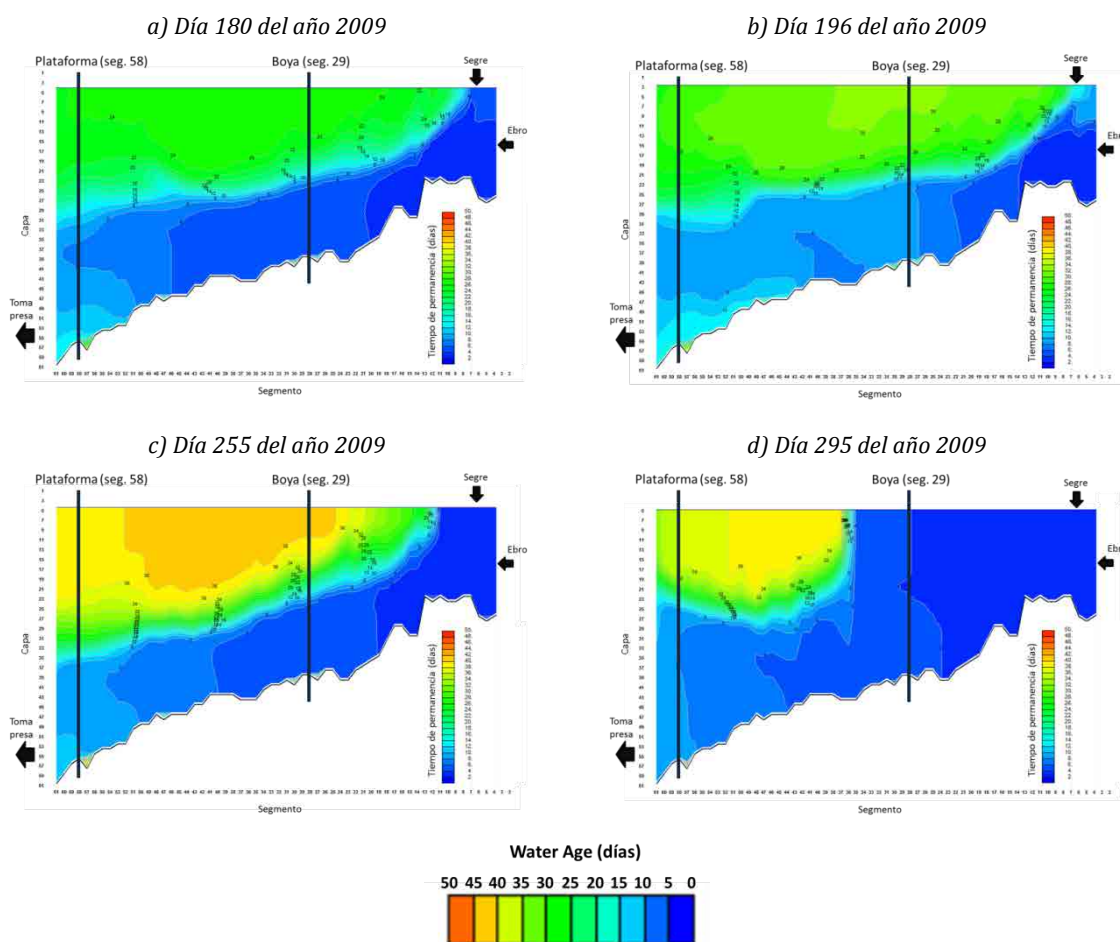


Figura 112 Perfil longitudinal del tiempo de permanencia del agua a lo largo del embalse de Ribarroja de Ebro, para los días julianos 180, 196, 255 y 295.

Hacia el final del periodo de estudio, el embalse se encuentra prácticamente mezclado en su totalidad por lo que el tiempo de permanencia es aproximadamente el mismo en toda la

columna vertical de agua. El tiempo de permanencia aumenta desde cero en la entrada, 3-4 días en la zona de la boya de Almatret y de hasta 6-8 días cerca de la presa (Figura 112c-d).

En la Figura 112d se destaca una zona superficial en las cercanías de la presa con valores del orden de hasta 30 días, esto es debido al efecto barrera de la presa y a la circulación principal que se muestra en los gráficos de velocidades del apartado anterior.

6.4.5.2 Año 2010

Si se comparan con el año 2009, los tiempos de permanencia obtenidos para el año 2010 son considerablemente menores debido a las características hidrodinámicas y meteorológicas de ese año.

En la Figura 113a correspondiente al día 160 (justo antes de una avenida importante), se puede observar que los tiempos de permanencia son del orden de los 10-12 días en superficie y 4-6 días en las proximidades de la presa. Con la llegada de la avenida de primavera, los consecuentes incrementos de caudal y de velocidades, el avance del frente de onda hace que los tiempos de permanencia disminuyan en todo el embalse. Durante el periodo de la avenida se presentan valores de 2 a 4 días en las proximidades de la presa, aunque en la parte superficial se pueden observar valores de unos 8-10 días (día 165, Figura 113b). En el día 170 se observa la mezcla del embalse, presentando tiempos de permanencia del orden de los 2-3 días, también en superficie (Figura 113c). Durante este periodo los caudales que entran al embalse son superiores a los 300 m³/s, favoreciendo la persistencia de la mezcla y disminuyendo los tiempos de permanencia.

Después de este importante evento, el segundo periodo de estratificación empieza a separar de nuevo las dos masas de agua (Figura 113d, día 185). Los tiempos de permanencia empiezan a incrementarse y especialmente en superficie. En la Figura 113e (día 200) ya se tienen valores del orden de los 14-16 días en superficie y de alrededor de 4-6 días en el fondo.

Como se comentó anteriormente, durante el periodo de estratificación la circulación es mayormente profunda y los tiempos de permanencia van aumentando a medida que avanza el verano (ver Figura 114a, día 251), en que se puede llegar a máximos de 28 días en superficie.

La rotura de la termoclina tiene lugar alrededor del día 265; en el perfil de la Figura 114b se puede observar el avance del frente de onda, los tiempos de permanencia son similares en cada columna de agua (de 5 días en la zona de la boya y de 18 días en la zona de la plataforma).

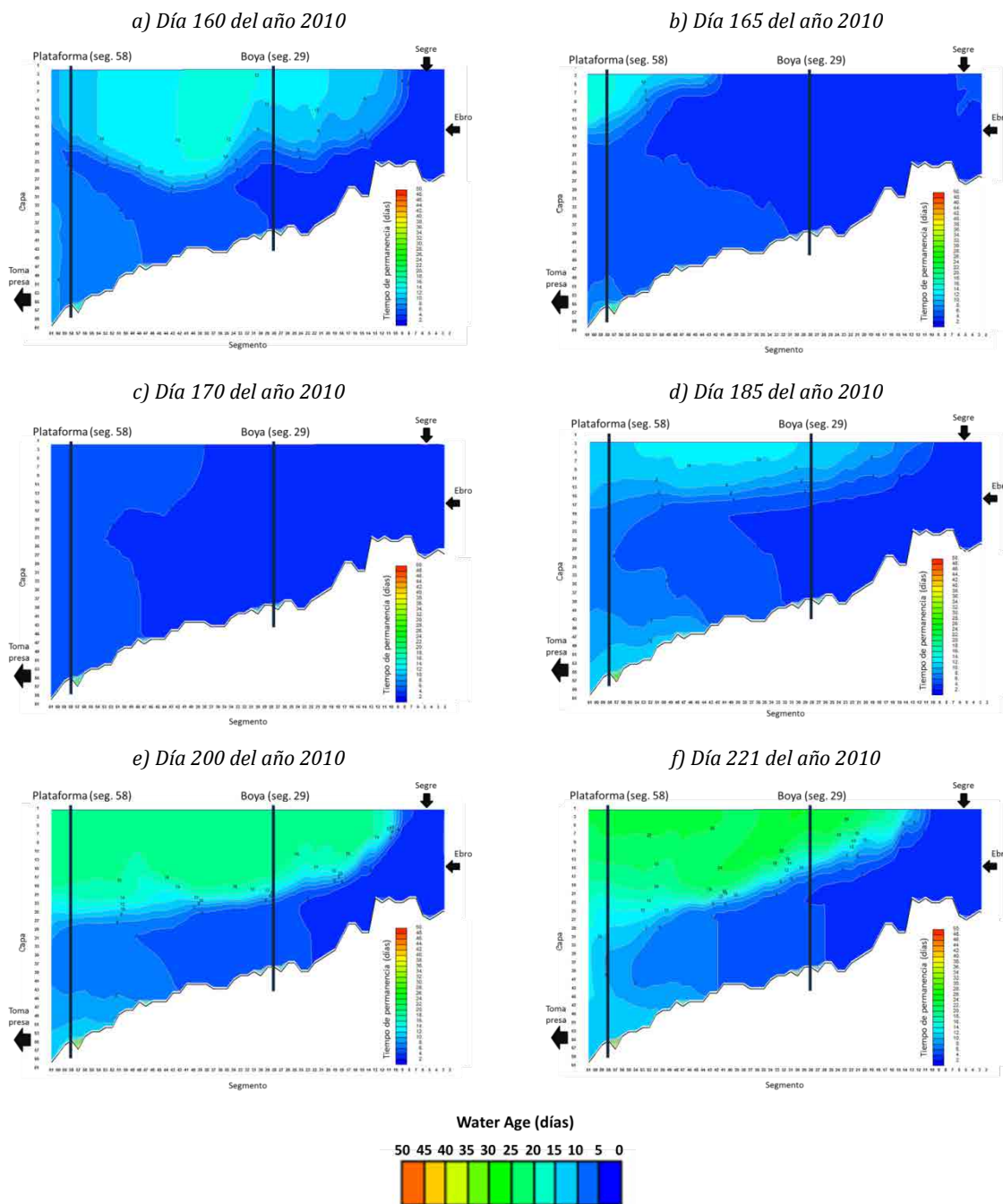


Figura 113 Perfil longitudinal del tiempo de permanencia del agua a lo largo del embalse de Ribarroja de Ebro, para los días julianos 160, 165, 170, 185, 200 y 221.

En el final del periodo de estudio, debido a la mezcla y llegada de los caudales del periodo comprendidos entre los días 275-295, el tiempo de permanencia se reduce a los 3 días en la zona de la boya y a 9-10 días en la zona de la plataforma (Figura 114c).

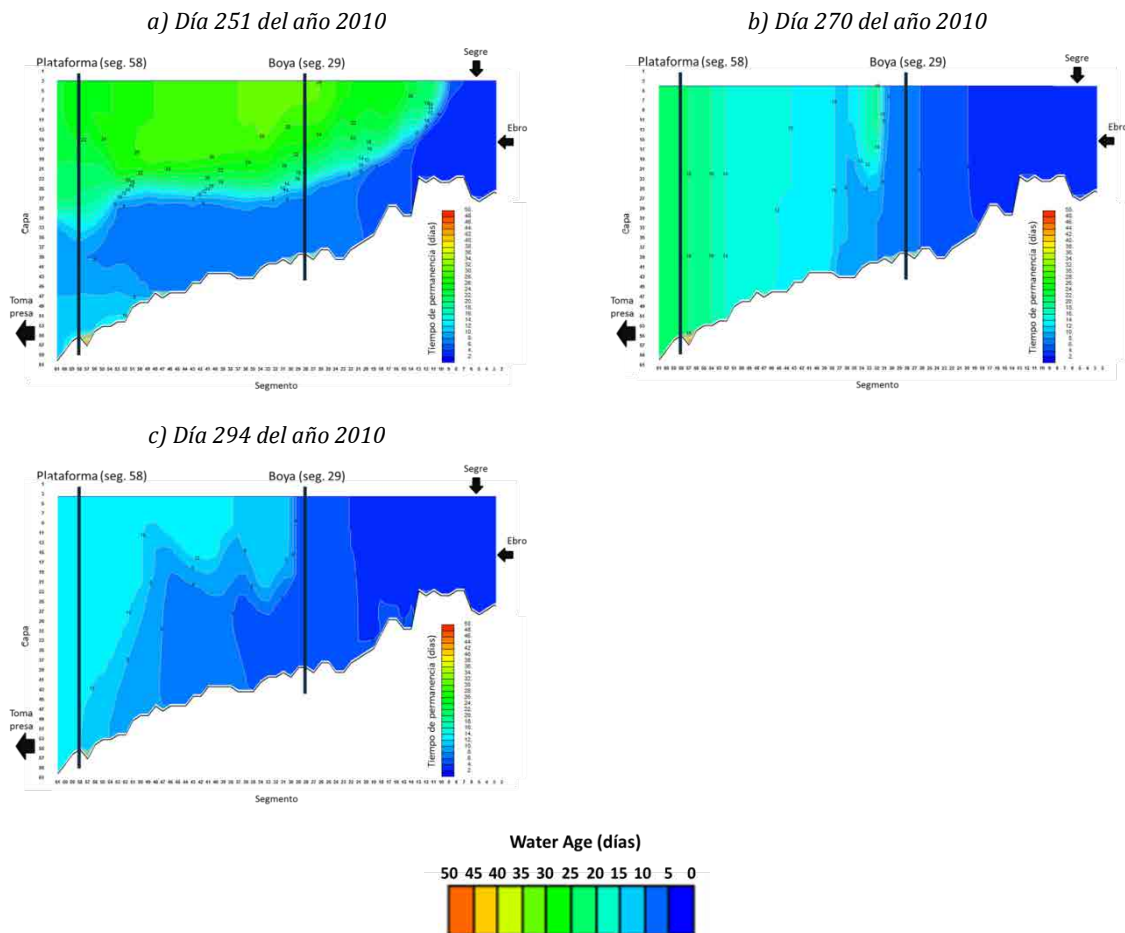


Figura 114 Perfil longitudinal del tiempo de permanencia del agua a lo largo del embalse de Ribarroja de Ebro para los días julianos 251, 270 y 294.

6.4.6 Discusión

6.4.6.1 Hidrodinámica

Comparando los resultados obtenidos mediante CE-QUAL-W2 con los datos de campo, se observa una correlación directa entre los picos de caudal y las modificaciones de la columna de agua, especialmente para avenidas del río Ebro en primavera- verano. Aun así, en algunos casos se notan retrasos de un día en algunos picos de la simulación. Esto se debe a la discretización diaria de los datos de entrada.

El modelo CE-QUAL-W2 simula los procesos de calentamiento, estratificación y la consecuente circulación del Ebro por el fondo. Las mayores diferencias se concentran en la zona de la termoclina y se debe al gradiente importante de temperatura que hay en muy pocos metros. El modelo de Ribarroja muestra algunas dificultades para capturar el día exacto de rotura de la termoclina.

Con el estudio meteorológico e hidrodinámico se pone en evidencia la clara diferencia de comportamiento de los años 2009 y el 2010. El año 2009 muy estable en cuanto a caudales y sólo presenta un único episodio de estratificación. Curiosamente, los resultados de la validación han sido mejores que los de la calibración. Esto puede ser debido a la importancia del efecto de los caudales de entrada en el año 2010 y en la correcta simulación con CE-QUAL-W2.

Se puede considerar que la estratificación es más acusada en el año 2010 que en el año 2009, puesto que hay mayor diferencia de temperaturas entre capas superficiales y profundas. Igual que en los datos de campo, también en los resultados numéricos se nota mayor estratificación en la zona de la boya que en la zona de la plataforma Flumen. En la plataforma se observan los mismos efectos de los picos de caudal que en la boya, pero más suavizados. Este podría ser uno de los motivos por los que la simulación del año 2010 ha dado mejores resultados que la calibración del año 2009.

El modelo numérico permite obtener los perfiles del vector de velocidades en la dirección del segmento, además del tiempo de permanencia del agua en el embalse; dos datos muy útiles para conocer el funcionamiento hidrodinámico y el tiempo de residencia del agua.

6.4.6.2 Calibración/Validación

El comportamiento hidrodinámico del embalse y consecuentemente también de las simulaciones numéricas se puede subdividir en dos grandes bloques, especialmente en época de estratificación: la circulación superficial y la profunda. La transición entre ambas es el punto más conflictivo y también el que presenta mayor incertidumbre en el ajuste de las simulaciones, puesto que al presentar un gradiente tan importante, los cambios entre una celda de cálculo y la que queda por encima o por debajo de la misma pueden ser significativos.

En cuanto a la circulación y calentamiento/enfriamiento del bloque superficial se ha podido observar que:

- El modelo CE-QUAL-W2 es más sensible a los cambios meteorológicos que el propio embalse de Ribarroja, es decir, los cambios en la meteorología, especialmente radiación solar y efectos del viento, se notan más en los resultados del modelo que en los datos de campo.
- CE-QUAL-W2 simula correctamente el efecto de la meteorología en la gran masa de agua, aunque en cada caso de estudio se tienen que ajustar algunos parámetros hasta llegar a obtener resultados óptimos. Los datos que más influyen en las simulaciones son la radiación y la temperatura del aire.
- El hecho de suavizar los picos, se debe al empleo de datos de campo promediados diariamente, en cambio, la discretización del dominio de cálculo mediante el modelo CE-QUAL-W2, puede aumentar dicho efecto aún más.

En cuanto a la evolución térmica en profundidad se ha observado lo siguiente:

- Las temperaturas que se presentan en profundidad (color lila) se pueden ver afectadas por las condiciones iniciales empleadas, a falta de datos se utilizó la media semanal 1998-1999.
- En algunos picos, los resultados obtenidos con el modelo CE-QUAL-W2, presentan cierto retraso comparado con la llegada del pico a la boya o a la plataforma, esta diferencia suele ser de un día, que corresponde al intervalo de tiempo de los resultados, por lo que puede ser aceptable en la simulación.
- El modelo simula correctamente la forma del perfil de temperaturas aunque en algunos periodos (días 155-170 o 255-295) las temperaturas simuladas quedan entre uno y dos grados por debajo de las medidas en campo.
- El modelo CE-QUAL-W2 no es capaz de simular correctamente el fenómeno de estratificación inversa débil que tiene lugar al final del periodo de estudio.

- En el caso de una gran masa de agua como Ribarroja de Ebro, el efecto de la temperatura del sedimento de fondo no es importante, puesto que se puede considerar que tiene la misma temperatura que el agua.

El año 2010 empleado en la etapa de validación, este es un año con condiciones considerablemente diferentes al año 2009 y diferentes a las comunes que se presentan en el embalse de Ribarroja de Ebro. Aun así, el modelo CE-QUAL-W2 es capaz de modelizar los resultados con suficiente precisión, especialmente en cuanto a las temperaturas superficiales, intervalos de tiempo así como los procesos de estratificación y mezcla.

El efecto del perfil vertical de temperaturas es importante para definir el estado inicial del embalse, por lo que es importante utilizar el estado correspondiente al momento de inicio de la simulación tal y como se realizó en este estudio.

6.4.6.3 Tiempo de permanencia

El modelo CE-QUAL-W2 ha permitido realizar un seguimiento (tipo trazador) de la antigüedad que tiene el agua cada elemento de la malla. El parámetro de Water Age permite saber qué “edad” tiene el agua en cada punto del embalse (apartado 6.4.5).

Es interesante observar que a partir de que el embalse se encuentra estratificado, se marcan claramente dos tendencias. En las capas superficiales, por encima de la termoclina, el tiempo de residencia va aumentando progresivamente debido al efecto de tapón que separa los dos estratos de agua. En las capas inferiores tiene lugar la circulación principal de los caudales.

En época de estratificación la termoclina juega su papel de tapón horizontal y separa el epilimnion del hipolimnion. Las capas superficiales tienen poca mezcla y circulación, si existe, es únicamente dentro de la misma capa, por lo que el tiempo de residencia del agua en las capas superficiales aumenta a medida que avanza el verano, si no hay ninguna perturbación meteorológica o avenida. Los valores a finales de verano, antes de la rotura de la termoclina, pueden llegar a ser del orden de los 30-40 días.

A partir del día 255 y debido a la disminución de gradiente térmico y a la consiguiente mezcla del embalse, los tiempos de residencia disminuyen considerablemente, especialmente ayudados por los picos de caudal, hasta estabilizarse entre 2 y 4 días en la boya y entre 4 y 6 días en la zona de la plataforma.

El tiempo de residencia está muy relacionado con el tiempo de permanencia y depende de tres factores importantes: lo estratificado que se encuentre el embalse, especialmente para capas superficiales, la magnitud de caudal circulante y el avance del frente de onda.

6.5 CASO 2: EMBALSE DE SAU (RÍO TER)

En primer lugar se presenta la obtención de la malla de cálculo (apartado 6.5.1). A continuación se comenta el análisis de sensibilidad de varios parámetros se realizó a partir de los datos del año 2009 (apartado 6.5.2) y la posterior validación del modelo con los datos de campo de 2011 (apartado 5.2). En el apartado 6.5.4 se describe la evolución térmica a lo largo del tiempo mediante perfiles longitudinales.

La versión de CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008) utilizada en este estudio es la 3.7 (actualización del 16 de agosto de 2012).

6.5.1 Malla de cálculo

Para el embalse de Sau se dispuso de las batimetrías realizadas por el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) en los años 1979 y 2001. Se compararon las respectivas curvas cota-volumen del embalse, sin apreciar diferencias significativas entre ambas. Se decidió utilizar la del año 1979 porque la correspondiente al año 2001 contenía errores en los archivos de curvas de nivel (Arbat-Bofill *et al.*, 2011). La discretización de la batimetría se mejoró con el fin de disponer de un modelo batimétrico más detallado y que definiera con mayor precisión las características del embalse (Triadú i Galí, 2014). Con la ayuda del software ArcGis 9.3® y de Hec-GeoRas® se desarrolló una metodología semi-automatizada para discretizar la batimetría de forma más simple. De esta manera se generó la segmentación y la discretización en capas (Arbat-Bofill *et al.*, 2012; Triadú i Galí, 2014).

Se hicieron distintas pruebas de discretización en cuanto a variar la cantidad y longitud de los diferentes segmentos, así como del grosor de las capas.

La discretización finalmente elegida está conformada por 64 segmentos longitudinales más dos segmentos ficticios (inicial y final), usados para la imposición de las condiciones de contorno. Además, se generaron 59 capas de 1 m de grosor a las que también hay que añadir

dos capas ficticias, superior e inferior. El resultado final se muestra en la Figura 116 con 66 segmentos y 61 capas (Arbat-Bofill *et al.*, 2012).

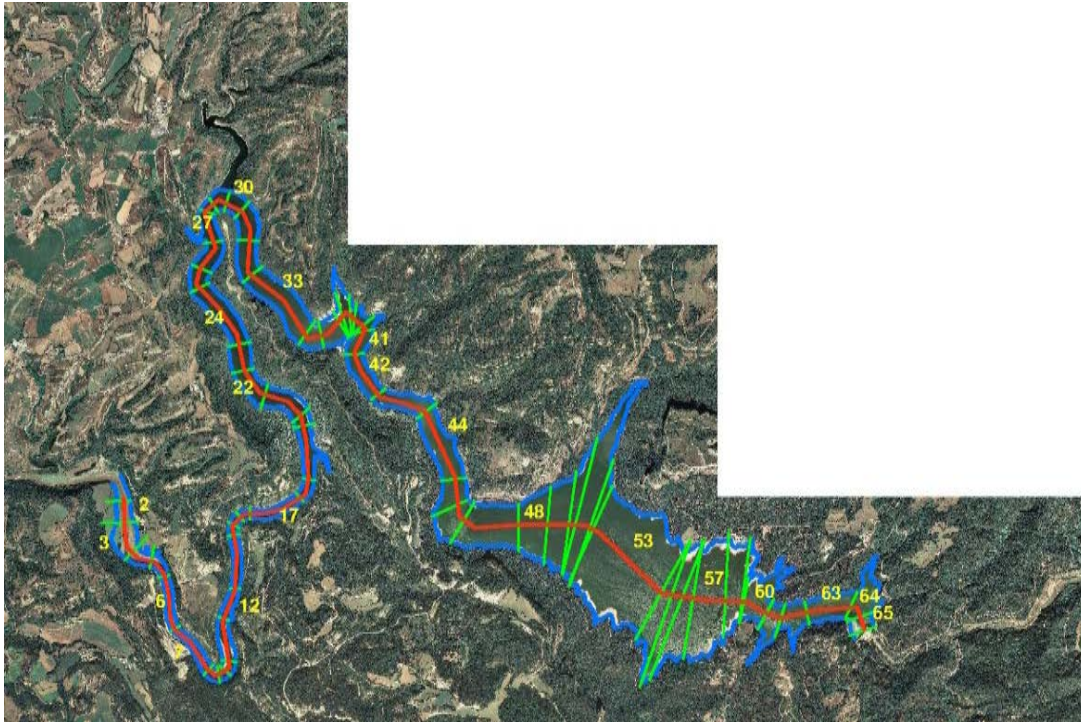


Figura 115 Discretización del embalse de Sau por segmentos.

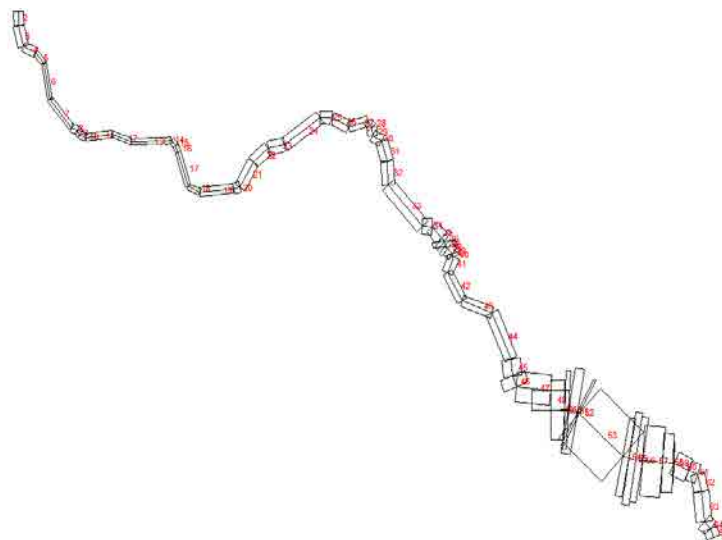


Figura 116. Discretización de la batimetría del embalse de Ribarroja para CE-QUAL-W2.

6.5.2 Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad inicial utilizando los datos de caudales y meteorología del año 2009 (Arbat-Bofill *et al.*, 2011). En este estudio se analizó el balance de masas del embalse, la interpolación del perfil inicial de temperatura o el posicionamiento del caudal de agua entrante según de la densidad del agua, el coeficiente de sombra, el coeficiente de protección del viento, la consideración o no de la evaporación, el coeficiente de Manning y la temperatura del sedimento de fondo. Los parámetros más influyentes son la consideración o no de la interpolación lineal entre los datos de entrada y el valor que se da a los coeficientes de sombra y de protección del viento (Arbat-Bofill *et al.*, 2012).

Con toda la información de campo del año 2011 presentada en los capítulos anteriores, se simuló el comportamiento térmico del embalse de Sau (periodo de 24 de febrero a 30 de septiembre de 2011) y se comparó con los perfiles verticales de temperatura obtenidos en los puntos de control del embalse (boyas 2 y 3, Figura 35).

6.5.3 Validación del modelo

Para validar el modelo CE-QUAL-W2 para el embalse de Sau, se realizó una comparación entre el comportamiento del embalse y la evolución de las simulaciones.

Al no disponer de datos de otros años para realizar la calibración y la posterior validación, lo que se hizo fue comparar los perfiles de temperatura en los puntos de control 2 y 3 de las boyas con los perfiles generados por el modelo CE-QUAL-W2 (Figura 117). Como se puede apreciar, de forma general se logró una aceptable coincidencia entre los perfiles calculados y los de campo. La principal dificultad se ha encontrado en simular la termoclina; por ejemplo, en los días 165, 173, 180, 195 en el punto 3 (Figura 118), los datos de campo muestran una doble termoclina, mientras que los resultados numéricos con CE-QUAL-W2, reportan solamente una. Sin embargo, la simulación de las temperaturas en superficie es aceptable, así como también los inicios de los procesos de estratificación del embalse, tal como se puede apreciar en los perfiles de campo de la Figura 119.

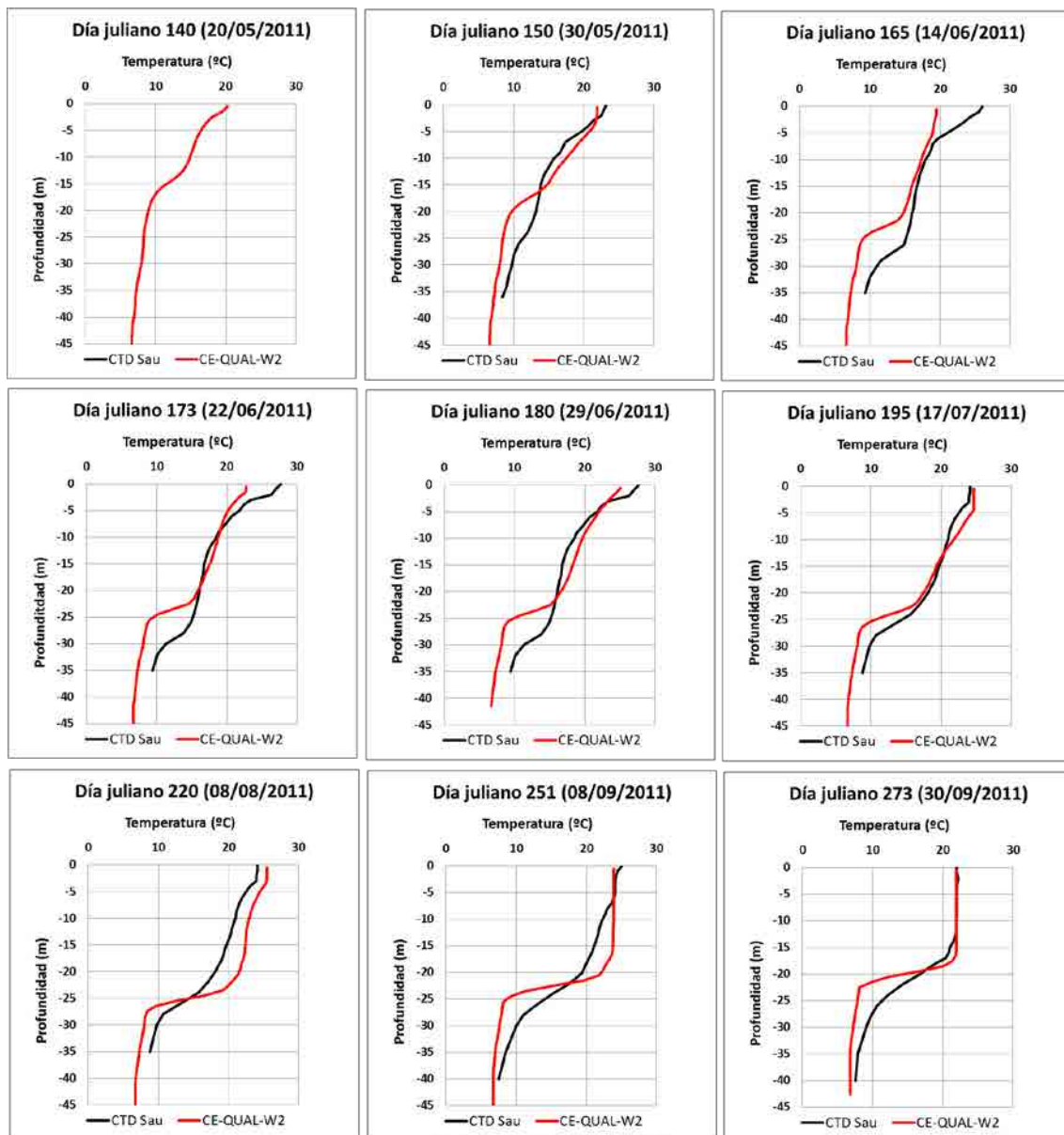


Figura 117. Comparación de los perfiles de temperatura obtenidos a partir de la simulación mediante CE-QUAL-W2 (rojo) y los perfiles de temperatura registrados en campo (negro) en el entorno del punto 2 (Figura 35) durante la campaña 2011.

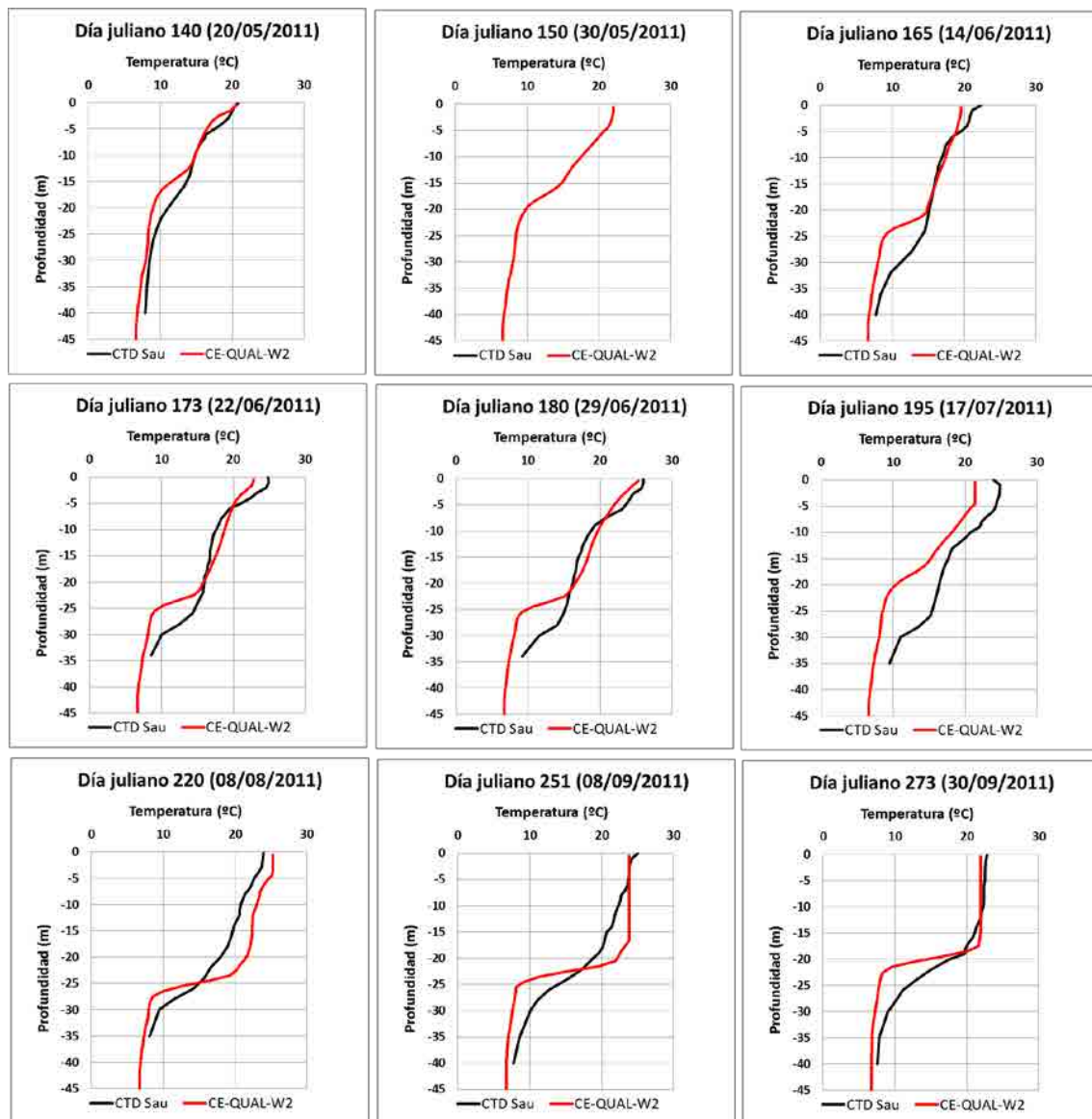
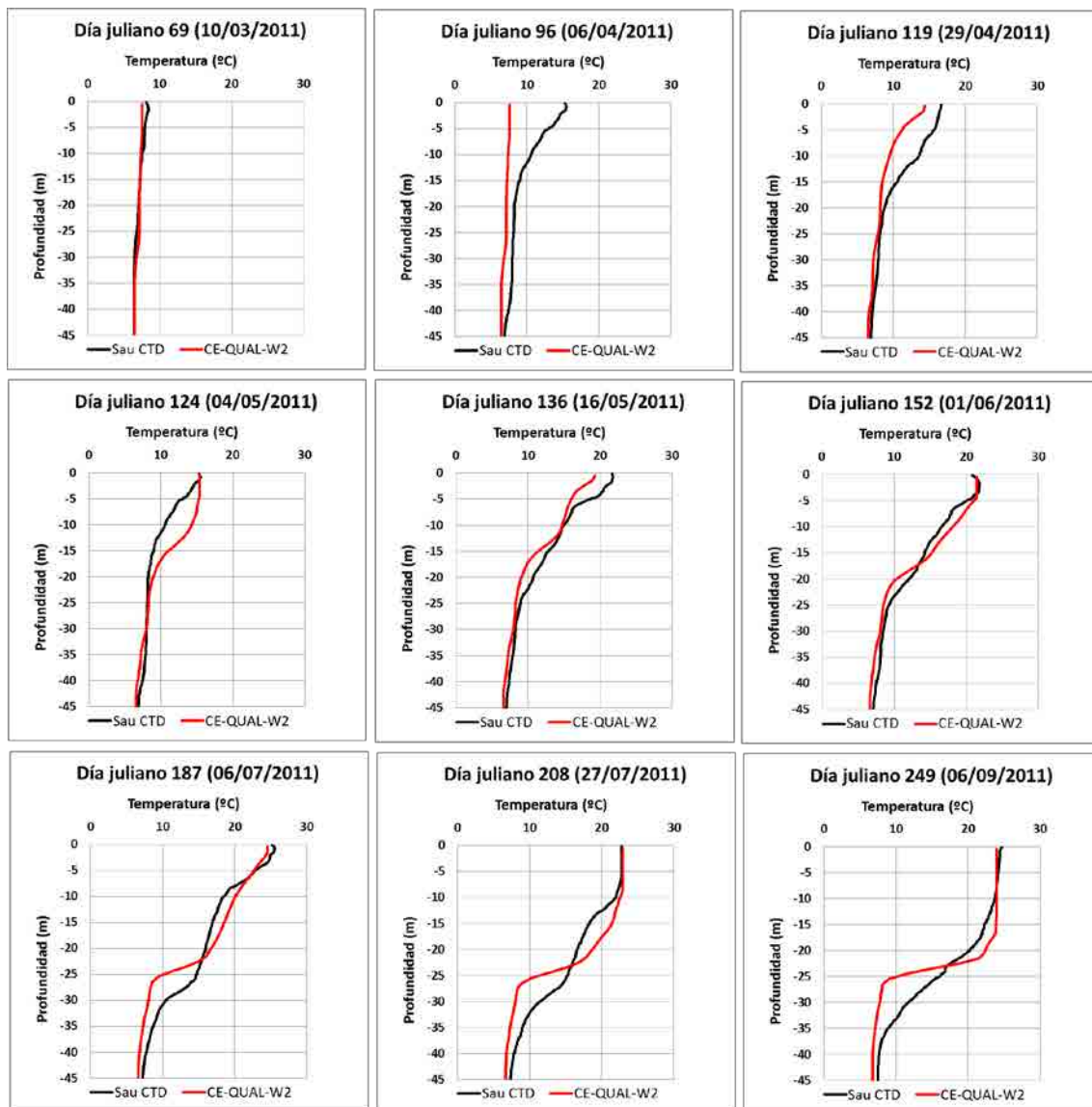


Figura 118. Comparación de los perfiles de temperatura obtenidos a partir de la simulación mediante CE-QUAL-W2 (rojo) y los perfiles de temperatura registrados en campo (negro) en el entorno del punto 3 (Figura 35) durante la campaña 2011.



6.5.4 Evolución temporal de la hidrodinámica: año 2011

Se puede apreciar que la estratificación se produce entre los días 75 y 95, esto se constata también en los perfiles de temperaturas medidos en campo (), donde se observa un salto en la temperatura a los 10 m de profundidad en los alrededores de los días mencionados.

La estratificación empieza a ser relevante a partir del día 95. Si bien el agua había empezado a estratificar previamente, se observa una bajada significativa de la temperatura

entre los días 100 y 125. Esto hizo retrasar el proceso de calentamiento de la masa de agua. Así, el embalse se muestra plenamente estratificado a partir del día 125 aproximadamente. Este proceso de enfriamiento mencionado se debe a un episodio de descenso de la temperatura ambiente junto con un descenso de la radiación solar incidente (Figura 76), donde la temperatura que tenía una tendencia creciente alrededor del día 95, alcanza unos 18 °C el día 97, bajó los siguientes 20 días moviéndose entre 10 °C y 14 °C, hasta volver a recuperar los 18 °C hacia el día 133. Igualmente, en la Figura 119 se percibe en esa secuencia de días una reducción notable de la radiación solar, pasando de la tendencia creciente que había previamente, con valores cercanos a los 300 W/m² y cayendo bruscamente con un comportamiento oscilante pero siempre inferior al valor mencionado.

Entre el día 145 y el 155 la tendencia de las temperaturas en el epilimnion es creciente alcanzando unos valores alrededor de los 22 °C.

Del día 155 al 170, se puede observar como la temperatura del epilimnion recoge la caída de temperatura debido a los datos meteorológicos (Figura 73 y Figura 76). En los días siguientes (entre el 170 y el 210), se vuelve a recuperar el calentamiento del embalse alcanzando valores entre 23 °C y 24 °C al epilimnion. Este periodo coincide con los picos de temperatura del aire y de radiación.

Entre el día 210 y 220 vuelve a percibirse un leve descenso en la temperatura del agua (21-22 °C) alcanzando profundidades de unos 20 m. Como en los casos anteriores, esta disminución coincide de nuevo, con un episodio de bajada de temperaturas del aire y de radiación incidente. A lo largo de este periodo, la termoclina presenta un mayor gradiente de temperatura.

Después de alcanzar un nuevo valor extremo de temperatura del agua (23 °C a 24 °C en el epilimnion), debido al episodio de calor ambiental (alta temperatura del aire y alta radiación) durante los días 225 a 245, comienza a apreciarse el proceso de enfriamiento típico de las últimas semanas de septiembre hasta el final de la simulación.

La máxima temperatura se alcanza en profundidades inferiores a 10 m, en pleno verano, oscilando entre 24 °C y 25 °C. Por el contrario, la mínima temperatura se mantiene a lo largo de todo el periodo en las zonas profundas del embalse por debajo de los 30 m y alrededor de los 6.5 °C.

Al final del periodo de simulación, análogamente a los datos de campo, no se alcanza la rotura de la termoclina. Esto se debe a un final de septiembre del año 2011 bastante caluroso, como se puede apreciar de la evolución de la temperatura ambiente (Figura 73).

De la en la Figura 120 y en la Figura 121 se muestra la evolución de la distribución longitudinal de las temperaturas simulada mediante CE-QUAL-W2 entre los días julianos del 85 al 273 de 2011.

Lo primero que se puede concluir de una visión global de todos estos perfiles longitudinales, es el comportamiento marcadamente unidimensional de la distribución de la temperatura. Este, sólo se ve alterado cuando se produce la entrada en el embalse de algún episodio de avenida, como se puede ver en el día 135 (Figura 120d), o el 155 (Figura 120f).

Se aprecia como en los primeros estadios, del día 85 (Figura 120a) al 125 (Figura 120c), las capas superiores del embalse van ganando temperatura, pasando de los 10 °C a 11 °C el día 85, a unos 16 °C el día 125 (Figura 120c); alrededor de los 15 m de profundidad, la temperatura es de 11 °C

El día 135 (Figura 120d) se produce la entrada de una punta de caudal en la cola del embalse. Esto provoca una perturbación en la distribución longitudinal de la temperatura que irá propagándose hacia aguas abajo hacia a su atenuación en toda la masa del embalse. Este fenómeno vuelve a percibirse el día 155 (Figura 120f).

Posteriormente, a medida que avanza el verano, de los días 195 (Figura 121a) a 235 (Figura 121b), se puede apreciar cómo continúa el proceso de calentamiento superficial, lográndose los valores máximos de temperatura en superficie, hasta aproximadamente unos 10 m de profundidad. A partir de esta profundidad, se observa el gradiente térmico (termoclina), que actúa como barrera de los estratos inferiores más fríos (hipolimnion), que en pleno verano mantienen unas temperaturas alrededor de los 7 °C a 9 °C.

Finalmente, entre los días 245 a 273, días de finales de verano e inicio de otoño (Figura 121c-f) se observa como la temperatura en superficie inicia un claro enfriamiento que acabará a finales de octubre con la rotura de la barrera térmica (rotura de la termoclina), ya descrita en el embalse de Sau por otros autores (Armengol *et al.*, 2005, 1999).

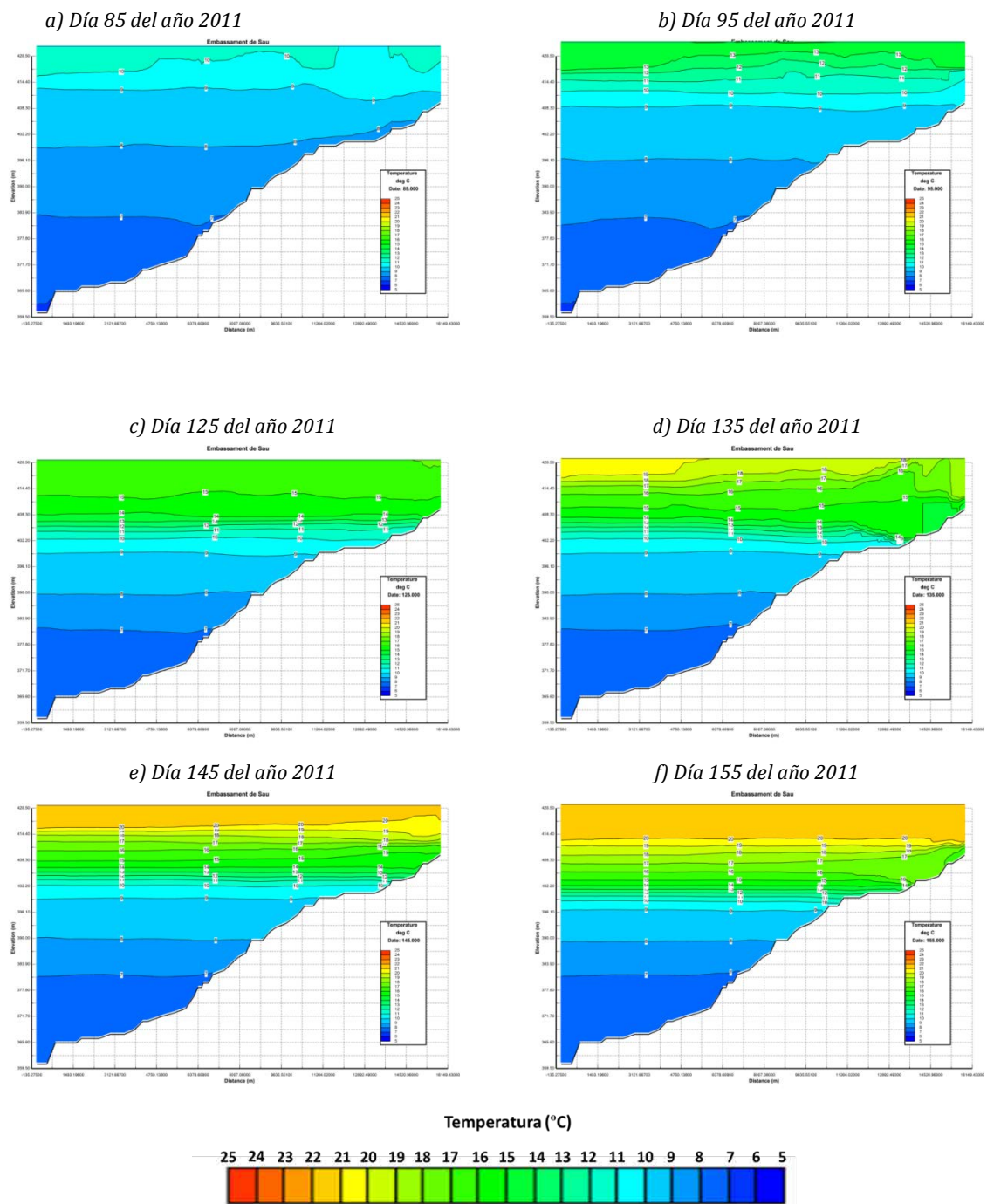


Figura 120 Perfiles longitudinales de temperaturas del agua a lo largo del embalse de Sau, simulados mediante CE-QUAL-2D. Días julianos 85, 95, 125, 135, 145 y 155.

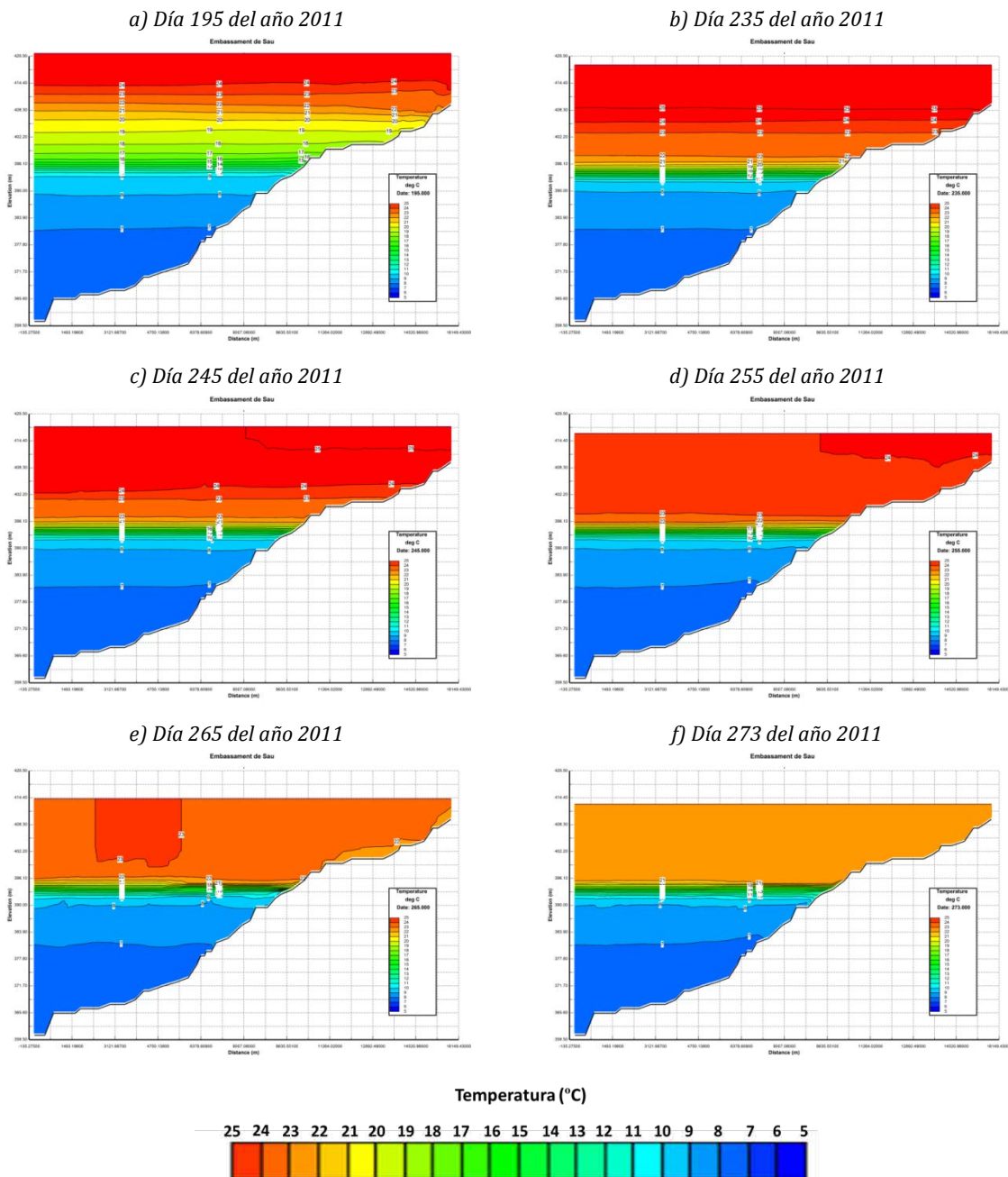


Figura 121 Perfiles longitudinales de temperaturas del agua a lo largo del embalse de Sau, simulados mediante CE QUAL-2D. Días julianos 195, 235, 245, 255, 265 y 273.

6.5.5 Discusión

Del estudio en modelo numérico de la hidrodinámica del embalse de Sau se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Se ha puesto a punto un modelo numérico bidimensional mediante CE-QUAL-W2 del embalse de Sau, que permite la simulación de la evolución térmica del mismo en las dimensiones longitudinal y vertical.

La modelización numérica mediante CE-QUAL-W2 es sensible a datos de partida como:

- **Condiciones de temperatura iniciales:** Afectan sobre todo a la simulación de la temperatura en el hipolimnion. Dicho de otra forma, por debajo de la termoclina la temperatura del agua, se mantiene ajena a las variaciones térmicas y meteorológicas de la superficie.

- **Radiación solar incidente:** Disponer de unas buenas medidas de esta variable climatológica es fundamental pues afectan la forma en que se calienta la masa de agua del epilimnion.

- **Viento:** Influye básicamente en el efecto del calentamiento o enfriamiento de las capas más someras del embalse y pero tiene menor efecto en profundidad.

- **Cotas de extracción del agua:** Condiciona notablemente la circulación del agua del embalse así como la profundidad de la posición de la termoclina. Así, se observa que cuanto más profunda es la cota de extracción, a mayor profundidad se encuentra la termoclina y por lo tanto, más caliente está la masa de agua en el entorno de la zona de extracción. Es decir, la profundidad a la que se extrae el agua es uno de los factores que tiene más relevancia en la estructura térmica del embalse, a la vez que es una de las herramientas para la gestión del embalse, lo que remarca aún más su importancia.

El modelo numérico en 2D de Sau permitió simular con precisión aceptable, la evolución térmica del embalse del año 2011.

En Sau se observan estratificaciones con una doble termoclina, y se ha constatado que el modelo CE-QUAL-W2 no permite un buen ajuste de estos comportamientos. Sin embargo, la simulación de las temperaturas en superficie es aceptable, así como también los inicios de los procesos de estratificación del embalse.

Del análisis de los perfiles longitudinales de la evolución térmica del embalse de Sau, se destaca su comportamiento marcadamente unidimensional, que sólo se ve alterado cuando se produce la entrada en el embalse de algún episodio de avenida.

La modelización numérica de Sau con CE-QUE-W2, se podrá usar como herramienta de predicción del comportamiento térmico del embalse.

6.6 CONCLUSIONES

6.6.1 Utilización del modelo

CE-QUAL-W2 es una herramienta de clara utilidad para estudiar el comportamiento hidrodinámico y térmico de los embalses. Permite establecer la evolución del estado térmico del embalse a partir de las variables meteorológicas y caudales de entrada.

A partir de la experiencia obtenida en el presente estudio, se considera que para realizar una primera simulación de un embalse mediante CE-QUAL-W2, es imprescindible calibrar el modelo mediante un proceso iterativo. Para realizar la calibración es imprescindible disponer de información de campo. Esta puede reducirse a: disponer de una estación meteorológica en las proximidades (y a poder ser in situ, análoga a la plataforma Flumen), disponer de los caudales de entrada y salida (escala diaria o inferior), las temperaturas del agua relativas a estos caudales, el caudal y la cota de extracción en la salida (escala diaria o inferior) y perfil/es de temperatura (de la manera más detallada posible) y tan seguidos en el tiempo como sea posible. Es importante ubicar la instrumentación en los puntos más significativos del embalse, buscar zonas en que las condiciones meteorológicas o las direcciones del flujo sean lo más homogéneas posible y que concuerden con las características generales del embalse (orientación, topografía circundante...).

6.6.2 Aplicación del modelo CE-QUAL-W2

Después de realizar las simulaciones y calibraciones de los modelos CE-QUAL-W2 de los embalses de estudio se realizaron comprobaciones de los valores de los perfiles temperatura en los puntos donde se habían instalado las boyas, cadenas de termistores y en la plataforma del embalse de Ribarroja. También se comprobó que los valores del vector velocidad coincidían con las velocidades del agua en las proximidades de la presa de Ribarroja.

Los modelos que se pusieron a punto para los embalses de Ribarroja y Sau cubren el periodo de tiempo que va desde del inicio de la estratificación hasta la rotura de la termoclina. Se ajustaron parámetros numéricos en la calibración de los modelos de cada caso. Después de hacer varios análisis de sensibilidad se consideró que los modelos están calibrados para cada uno de los dos embalses.

El comportamiento térmico del comportamiento los embalses embalse a lo largo del tiempo así como el posicionamiento de la termoclina y la captura de los procesos de mezcla se ha simulado de manera satisfactoria.

Una vez asegurado el comportamiento y ajuste de los modelos numéricos de cada uno de los embalses; se pudo estudiar el comportamiento hidrodinámico (velocidades) y térmico (temperatura del agua) de ambos, en las dos dimensiones (profundidad y longitud).

6.6.3 Casos de estudio

De todo lo expuesto a lo largo del presente capítulo, se puede concluir que la modelización numérica permite analizar de forma bastante precisa el comportamiento hidrodinámico y térmico de los casos 1 y 2, correspondientes a los embalses de Ribarroja y Sau (con algunas excepciones).

En el caso de Ribarroja, al disponer de más datos y de un largo periodo de tiempo (años 2009-2010) en el que se observan diferentes situaciones, permitió realizar una primera calibración y una validación completa del modelo del embalse. La zona de la cola del embalse de Ribarroja (confluencia Ebro-Segre) tiene un funcionamiento tridimensional que no se puede simplificar mediante modelos 2D. Por este motivo se recomienda estudiar la zona con mayor detalle y si es posible simularla en tres dimensiones. Esto se ha hecho en el Capítulo 7.

6.6.4 Limitaciones del modelo CE-QUAL-W2

Las limitaciones más importantes del modelo CE-QUAL-W2 son la calidad y la cantidad de los datos de entrada. Con el objeto de mejorar la fiabilidad de los modelos numéricos obtenidos para ambos embalses, se sugiere una labor continuada de muestreo de datos e ir ajustando el modelo basándose en los datos de campo.

Otra de las limitaciones es la discretización de la escala temporal, se recomienda hacer estudios con datos de entrada con menor rango horario (en este estudio se han realizado simulaciones con medias diarias).

Por otra parte, hay que tener en cuenta que el embalse de Ribarroja está estrechamente vinculado al embalse de Mequinenza, mientras que Sau está afectando directamente al embalse de Susqueda. Como se comprobó en este estudio, las cotas de extracción de caudales en el embalse de Sau condicionan notablemente la temperatura de los caudales de salida y por lo tanto acabarán condicionando la hidrodinámica del embalse de Susqueda. Por este motivo se recomienda no estudiar únicamente el comportamiento de los embalses individualmente sino extender el estudio al análisis numérico a los sistemas de embalses (Sau-Susqueda y Mequinenza-Ribarroja-Flix).

6.7 BIBLIOGRAFÍA

ARBAT-BOFILL, DE POURQ, & DOLZ, 2009a. *Batimetría 2008*. Barcelona.

ARBAT-BOFILL, SÁNCHEZ-JUNY, BLADÉ, & DOLZ, 2009b. *Modelación bidimensional del Embalse de Ribarroja de Ebro con CE-QUAL-W2*, in: Jornadas de Ingeniería del Agua, Madrid. p. 10.

ARBAT-BOFILL, SÁNCHEZ-JUNY, & DOLZ RIPOLLÉS, 2011. *Estudi en model numèric de la hidrodinàmica de l'embassament de Sau (Anàlisi prèvia)*. Barcelona.

ARBAT-BOFILL, SÁNCHEZ-JUNY, & DOLZ RIPOLLÉS, 2012. *Estudi en model numèric de la hidrodinàmica de Sau*. Barcelona.

ARMENGOL, COMERMA, GARCÍA, ROMERO, RODRÍGUEZ, VALERO, & VIDAL, 2005. *Quaderns ATLL - Contribució al coneixement de l'ecologia aquàtica de l'embassament de Sau (evolució de l'embassament al 1999)*.

ARMENGOL, GARCÍA, COMERMA, ROMERO, DOLZ, ROURA, HAN, VIDAL, & SIMEK, 1999. *Longitudinal processes in canyon type reservoirs: the case of Sau (NE Spain)*. Theor. Reserv. Ecol. its Appl. 313-345.

COLE, & WELLS, 2008. *CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model. Version 3.6 User Manual*, Version 3. ed. Water Quality Group - Portland State University, Portland.

DE POURCQ, ARBAT, & DOLZ, 2007. *Batimetría 2007. Documento interno Flumen*. Barcelona.

DOLZ, ARMENGOL, ROURA, DE POURCQ, ARBAT-BOFILL, & LÓPEZ, 2009. *Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja*. Barcelona.

FLUMEN, & CASANOVAS-BERGÉ TOPÓGRAFOS ASOCIADOS, 2008. *Memòria dels treballs realitzats a la Batimetria del Pantà de Ribarroja*. Barcelona.

HASANLOO, & ETEMAD-SHAHIDI, 2011. *On the estimation of transport timescales – case study: the Dez reservoir*. J. Hydroinformatics 13, 217. doi:10.2166/hydro.2010.161

RUEDA, MORENO-OSTOS, & ARMENGOL, 2006. *The residence time of river water in reservoirs*. Ecol. Modell. 191, 260–274. doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.04.030

TRIADÚ I GALÍ, 2014. *Estudi del comportament tèrmic de l'aigua de l'embassament de Sau*. Universitat Politècnica de Catalunya.

Capítulo 7 MODELIZACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL

7.1 INTRODUCCIÓN

Como se ha visto con la modelación 2D de Ribarroja (ver “Caso 1”, apartado 6.4), una simulación bidimensional en las direcciones del flujo y la vertical como la realizada mediante CE-QUAL-W2 no es capaz de capturar los efectos tridimensionales que tienen lugar en el contacto en la zona de la confluencia de los ríos Ebro-Segre en la cola del embalse de Ribarroja de Ebro (Figura 122).

En una entrada a un embalse pueden darse tres tipos de flujos en función de la temperatura del agua del río entrante: 1) Si el agua está más fría que la del embalse el agua entrante se hunde por densidad; 2) Si el agua está más caliente, y por lo tanto menos densa, el río tiende a circular superficialmente y 3) Si el embalse se encuentra estratificado el río entrante se posiciona por temperatura y densidad en la capa intermedia correspondiente. En el caso del embalse de Ribarroja, la hidrodinámica en su cabecera es aún más compleja, por encontrarse justo allí la confluencia Ebro-Segre, dos ríos de características tan dispares en cuanto a régimen de caudales y evolución térmica del agua a lo largo del año.

El contacto entre los dos ríos depende de la temperatura y de los caudales relativos entre ambos. En la Figura 122 se puede ver una imagen de Google Maps, en que se observa la diferencia de colores entre los dos flujos puesto que el Segre tiene más cantidad de sedimentos en suspensión.

Si las temperaturas, y consecuentemente las densidades de los flujos de entrada al embalse de Ribarroja son diferentes el contacto se puede ver como una superficie 3D. Esta superficie se observa como una línea de contacto en la lámina libre del embalse (Figura 122) mientras que en profundidad suele tomar la forma de cuña (como se ha mostrado en el Capítulo 5, en la Figura 63 y en Figura 68, las aguas más frías tienden a hundirse mientras que el agua más caliente flota por encima).

En primavera y verano el río Ebro tiene el agua más fría que el Segre y suele tener mayores caudales pero tiende a hundirse bajo las aguas más calientes del río Segre. En otoño esta tendencia se invierte, y el río Segre tiende a hundirse bajo las aguas del Ebro.

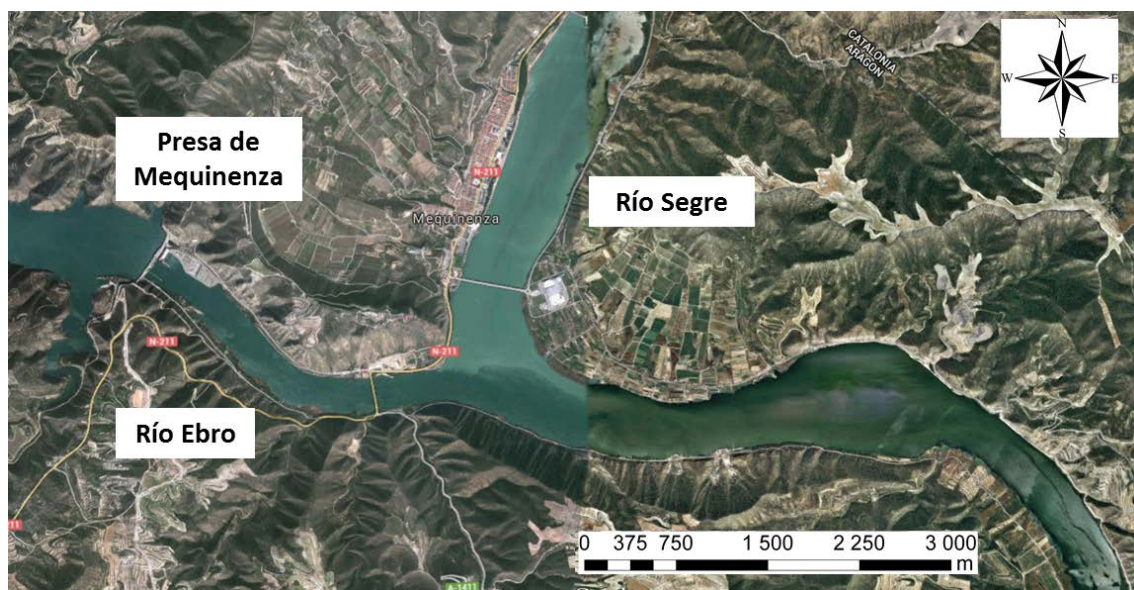


Figura 122. Confluencia Ebro-Segre. Fuente: Google maps modificado por la autora

En la misma zona de la confluencia se han realizado también simulaciones bidimensionales promediadas en la profundidad, mediante el modelo numérico Iber (para mayor detalle ver Anejos 4 y 5). En este caso tampoco se reproduce correctamente la cuña de contacto que se forma en el contacto entre el Segre y el Ebro, ya que los dos ríos circulan a distinta profundidad y esto no se puede representar mediante modelos promediados en la vertical.

Con tal de estudiar la confluencia Ebro-Segre con mayor detalle se propuso estudiar la zona de contacto mediante un modelo tridimensional. Para ello se utilizó un modelo que se está desarrollando en la Universidad de la Coruña, el FreeFlow (Cea et al., 2008). El modelo

FreeFlow ya disponía del módulo hidrodinámico (apartado 7.2) y del transporte de temperatura (tratado como el transporte de un escalar), pero no tenía implementado el balance térmico superficial en función de las condiciones meteorológicas.

Para simular la evolución térmica de la confluencia de los ríos Ebro y Segre fue necesario añadir un módulo que fuese capaz de calcular el balance térmico superficial (apartado 7.3). El modelo se ha validado (apartado 7.4) mediante comparaciones con casos de estudio documentados y posteriormente se ha aplicado a la confluencia de los ríos Ebro-Segre permitiendo obtener la hidrodinámica y la evolución térmica de la zona (apartado 7.5).

7.2 EL MODELO FREE FLOW

El modelo FreeFlow (Cea *et al.*, 2008) es un modelo hidrodinámico tridimensional en volúmenes finitos, diseñado especialmente para el cálculo de flujos ambientales, ha sido programado en FORTRAN y actualmente se encuentra en proceso de desarrollo.

El modelo resuelve las ecuaciones RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) 3D (apartado 2.6.5) para flujo no compresible. El cálculo de las tensiones turbulentas se realiza mediante el modelo $k-\varepsilon$. FreeFlow posee un módulo de temperatura y otro de salinidad, los cuales permiten calcular las corrientes generadas por diferencias de densidad provocadas por los gradientes de ambas variables, así como los procesos de estratificación de las masas de agua. Todas las ecuaciones se resuelven mediante el método de volúmenes finitos en una malla no-estructurada

Para acoplar el cálculo de presión y velocidades se emplea el algoritmo SIMPLE (Cea *et al.*, 2008; Versteeg & Malalasekera, 2007). La discretización en el espacio se realiza mediante la técnica de volúmenes finitos, de uso cada vez más extendido en la simulación numérica de fluidos.

Las características de los esquemas numéricos utilizados son las siguientes:

- Volúmenes finitos.
- Malla tridimensional formada por distintos tipos de elementos: tetraedros, hexaedros, pirámides y prismas de base triangular con sección constante.

- Acoplamiento de los campos de presión y velocidad mediante el esquema SIMPLE (Nils & Olsen, 2000; Versteeg & Malalasekera, 2007).
- Estabilización del campo de presión mediante interpolación de Rhie-Chow.
- Orden 1 y orden 2 en espacio y tiempo.
- Esquemas explícito e implícito en el tiempo.
- Cálculo de la evolución de la lámina libre mediante un algoritmo tipo VOF.

Tanto la entrada de datos como la salida de resultados se realizan mediante ficheros de texto que se deben generar manualmente o mediante otros programas de pre y postproceso.

Los principales campos de aplicación de FreeFlow en el ámbito de la hidráulica fluvial y costera son: el cálculo de corrientes en masas de agua 3D, como embalses y estuarios, cálculo de corrientes generadas por el oleaje, cálculo de flujo en meandros, cálculo de flujo alrededor de estructuras hidráulicas como pilas, estribos, escalas de peces, vertederos, redes de canales, cálculo de flujo en presión en uniones de tuberías y otros mecanismos hidráulicos.

Este código ha sido evaluado y validado en diversos casos test mostrando gran exactitud en la predicción de velocidades y en la representación de las estructuras 3D características de flujos en canales curvos (Fraga *et al.*, 2012).

FreeFlow no posee una interfaz gráfica propia de entrada ni de salida de resultados. Las mallas de cálculo se pueden generar manualmente (casos sencillos) o bien utilizando programas independientes. Para la visualización de resultados se ha utilizado la versión de evaluación de TECPLOT®.

7.2.1 Mallado de la geometría

Uno de los principales aspectos en la modelización numérica de la dinámica computacional de fluidos es la generación de la malla de cálculo. Las ecuaciones para la velocidad, la turbulencia, la calidad del agua, la concentración de sedimentos, etc. se resuelven para cada celda o volumen de la malla. La composición, el detalle, la forma y la

calidad de la malla es importante para la precisión y la estabilidad de la solución numérica de las ecuaciones.

En 3D, las celdas pueden ser tetraedros, prismas tetraédricos (cuatro caras) o hexaédricos (seis caras). Las mallas pueden ser estructuradas o no estructuradas, Las ventajas de las mallas no estructuradas para la construcción de geometrías complejas es evidente. En la bibliografía se pueden encontrar gran cantidad de algoritmos para generar mallas 3D basados en celdas tetraédricas, que son las que utilizan la mayoría de los programas comerciales de CFD (Cea *et al.*, 2008). Sin embargo, las celdas hexaédricas dan una mayor precisión y velocidad del cálculo (Olsen *et al.*, 2000). Por otro lado, los prismas de base triangular pueden adaptarse mejor a las geometrías variables pero aumentan el número de elementos.



Figura 123. ejemplo de malla no estructurada en el plano (izquierda) y de malla estructurada en la vertical (derecha).

En la modelización de embalses (o ríos) el dominio de cálculo tiene ciertas particularidades, por ejemplo, las dimensiones verticales son generalmente mucho menores que las dimensiones horizontales. Por tanto, es posible utilizar celdas verticales de la malla en esta dirección, sin que se produzcan demasiados ángulos no ortogonales entre las líneas de la malla. La ventaja es que la malla 3D se puede obtener generando en primer lugar una malla 2D y luego levantando capas en la vertical (Olsen *et al.*, 2000).

Se pueden utilizar varios algoritmos para distribuir las celdas en la vertical, pero es recomendable que si el campo de flujo está influenciado por la estratificación térmica, se generen mallas ortogonales en la vertical, puesto que se pueden dar inestabilidades si las celdas vecinas de la red horizontal no están en el mismo nivel (Cea *et al.*, 2008; Olsen *et al.*, 2000).

7.2.1.1 Generación del mallado

FreeFlow no posee una interfaz gráfica propia de entrada ni de salida de resultados. Se ha utilizado el software ArcGis®, SMS® y GID® indistintamente.

En primer lugar es necesario configurar el archivo de malla 3D, ya sea manualmente o mediante el software GID® (permite hacer la malla 3D directamente) o SMS® (hacer una malla 2D y levantar capas horizontales). Para todos los casos de estudio que conciernen a esta tesis se han utilizado mallas regulares e irregulares de cuadriláteros o triángulos en el plano. Las capas se han considerado horizontales en todos los casos menos en el de Ribarroja (apartado 7.5), en que se ha generado una malla con un número constante de capas de grosor variable (Figura 132).

En todos los casos de estudio se ha considerado que la superficie de la malla correspondiente al contorno superficial es horizontal por lo que se ha puesto a cota constante.

7.2.2 Módulo hidrodinámico

El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) tridimensionales para un fluido no-compresible. Las fuerzas de flotación generadas por gradientes de densidad se consideran mediante la aproximación de Boussinesq. El acoplamiento entre los campos de presión y velocidad se realiza mediante el algoritmo SIMPLE (Cea *et al.*, 2008; Fraga *et al.*, 2012). El esquema numérico utiliza la interpolación de Rhie-Chow para conseguir la estabilidad del campo de presiones.

7.2.3 Módulos de salinidad y temperatura

Los módulos de salinidad y de temperatura resuelven respectivamente la ecuación de conservación de la masa de sal y la ecuación de conservación del calor. A partir de los valores de concentración de sal y de temperatura se calcula la densidad del fluido en cada elemento de la malla de cálculo a partir de la ecuación de estado del agua de mar de la UNESCO. Dicha densidad se utiliza en el módulo hidrodinámico con el fin de evaluar las fuerzas de flotación mediante la aproximación de Boussinesq.

El módulo resuelve las ecuaciones de transporte para la temperatura y la salinidad. En el modelo también se pueden especificar los valores límite, se pueden introducir otros términos fuente además de las condiciones iniciales o de contorno de dichas variables. También es necesario determinar el parámetro de difusión para la masa y la transferencia de salinidad o calor en cada caso (número de Prandtl).

El modelo original no contempla el balance térmico superficial.

7.2.4 Condiciones iniciales y condiciones de contorno

Para resolver las ecuaciones 3D en un dominio espacial es necesario especificar las condiciones iniciales de las variables: velocidad, presión dinámica y la definición de la lámina libre. El modelo FreeFlow permite cuatro tipos de condiciones de contorno: contorno abierto de entrada, contorno abierto de salida, contorno de pared y lámina libre del agua (Cea et al., 2008).

En cuanto a condiciones iniciales a la hora de iniciar una simulación FreeFlow permite tres modos diferentes:

- Arranque “en frío”: velocidades nulas al iniciar la simulación.
- Velocidad/Turbulencia/Temperatura constantes.
- A partir de una simulación anterior. El archivo de arranque en caliente contiene toda la información necesaria para continuar una simulación.

Las condiciones de contorno se definen mediante “superficies de contorno” (caras de contorno definidas en el fichero de malla) en las que se impone la condición. GID® permite definir la “superficie de la malla”, que es la cáscara que envuelve la malla. A partir de allí se pueden definir las caras que forman cada uno de los contornos.

Una vez definidos los contornos “abiertos” en los que se quiere poner condición de contorno, el modelo identifica los lados que son contorno pero que no tienen condición impuesta. Todas estas caras forman parte del contorno externo de nombrado “resto”.

Los contornos pueden ser de varios tipos: 1) Pared; 2) Techo: en todos los casos de estudio se ha considerado que la superficie de la malla es horizontal y tipo *rigid lid* (tapa dura); 3) Fondo y 4) No deslizamiento.

La condición de contorno impuesta para la lámina libre en todos los casos de estudio de este Capítulo es la de “tapa rígida” (*rigid lid*), que consiste en suponer que no hay variación de nivel en la malla.

La aproximación de tapa rígida es una simplificación comúnmente utilizada en el estudio de los fluidos estratificados por densidad, muy usada en estudios oceanográficos y meteorológicos. En términos generales, se supone que los desplazamientos de la superficie son insignificantes en comparación con los movimientos de la termoclina. Como que en el caso de Ribarroja de Ebro no hay muchas variaciones de nivel a lo largo del año y si las hay varían de manera gradual y lenta, se puede asumir. Esta aproximación permite reducir considerablemente el tiempo de cálculo solucionando el problema del cálculo de la lámina libre en cada paso de tiempo aunque se generan de presiones en la capa superficial.

7.3 BALANCE TÉRMICO SUPERFICIAL

Se ha implementado un nuevo módulo de balance térmico superficial “*temp_sup*” (Anejo 6) al modelo FreeFlow (Cea *et al.*, 2008) permitiendo el cálculo del balance térmico superficial en función de las variables meteorológicas. En esta primera versión del módulo de balance térmico superficial se han introducido dos grupos de ecuaciones: las que utiliza el modelo numérico CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008) y las propuestas por Prats en el Capítulo 9 de su tesis doctoral (Prats, 2011).

El primer bloque se ha introducido con la intención de comparar la evolución térmica del embalse en 3D utilizando las mismas ecuaciones que en las simulaciones realizadas en el Capítulo 6 mediante CE-QUAL-W2 y así poder observar las diferencias y similitudes entre ambos modelos a la hora de calcular el balance térmico superficial de los embalses. Aunque finalmente esta comparación se ha dejado para futuros desarrollos, el paquete de ecuaciones está implementado y testado.

El segundo bloque, correspondiente a las ecuaciones propuestas en Prats (2011), ha sido utilizado debido al buen ajuste obtenido por el autor con las simulaciones unidimensionales

realizadas en el curso medio-bajo del río Ebro. Además se ha considerado que al ser un caso de estudio en la misma zona que el embalse de Ribarroja de Ebro sería un punto a favor en cuanto a algunos parámetros de calibración.

7.4 VALIDACIÓN

En este apartado se describen los tests realizados para validar el correcto funcionamiento del módulo “temp_sup” (Anejo 6) que calcula el balance térmico superficial. El funcionamiento hidrodinámico del modelo FreeFlow ya ha sido testado previamente por lo que no es objeto de este estudio.

7.4.1 Datos de Laboratorio: depósito de agua en el exterior

En este test se han utilizado los datos de las medidas en un depósito situado en la terraza superior del edificio D1 de la Universitat Politècnica de Catalunya cedidos por Jordi Prats. Fueron muestreados entre los días 28 de julio y 3 de agosto de 2003.

Descripción de los datos: Los datos experimentales utilizados se han obtenido de las medidas tomadas en un depósito de agua situado en el edificio D1 del Campus Nord de la UPC (Barcelona) realizado por el Dr. Prats en 2003. El depósito tiene una profundidad de 1.10 m y un diámetro interior de 2.50 m. El grosor de las paredes es de 30 cm, hechas con vermiculita y revestidas interiormente por fibra de vidrio y, exteriormente, por una chapa metálica. Las paredes interiores están pintadas de color negro para evitar la reflexión de luz. Durante el estudio se instalaron sensores de temperatura PT100 en las paredes, a 2 cm de la superficie y en el fondo del depósito a 2 y 12 cm (puntos rojos, Figura 124).

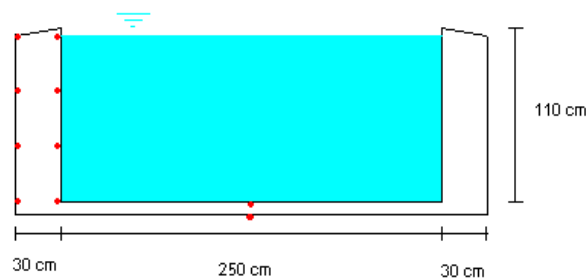


Figura 124. Esquema del depósito situado en el edificio D1 de la Universitat Politècnica de Catalunya (Esquema de J. Prats).

En este depósito se instalaron: un radiómetro Campbell Q-7 (a 20 cm del agua), dos piranómetros (radiación incidente y radiación reflejada, a 20 cm del agua); un sensor de nivel y 20 sondas de temperatura (Campbell PT100/3 1/3 DIN). También se disponía de una estación meteorológica, ubicada sobre una solera de hormigón en la misma azotea del edificio D1, con los siguientes instrumentos: un radiómetro (Campbell Q-7, a 2 m del suelo), dos piranómetros Campbell SP1110 (radiación incidente y radiación reflejada, a 2 m del suelo), un anemómetro (Campbell 05103 a 2 m del suelo), una sonda de temperatura del aire y humedad relativa (Campbell HMP35AC a 1,5 m del suelo), un pluviómetro (Campbell R102) y sondas PT100 situadas en el interior de la solera de hormigón. Los datos obtenidos en el depósito y la estación se recogieron y almacenaron mediante sendos *datalogger* Campbell CR10X.

El periodo de estudio que se presenta corresponde la semana de verano que va del 28/07/2004 al 03/08/2004. Los datos meteorológicos medidos en la estación meteorológica se han utilizado como input al modelo mientras que los datos obtenidos por las sondas de temperatura son los que se utilizan para validar el módulo de balance térmico superficial y calibrar parámetros.

Malla: Se utiliza una malla 3D de 2.5 m de diámetro por 1 m de altura discretizada en prismas cuadrangulares irregulares Figura 125.

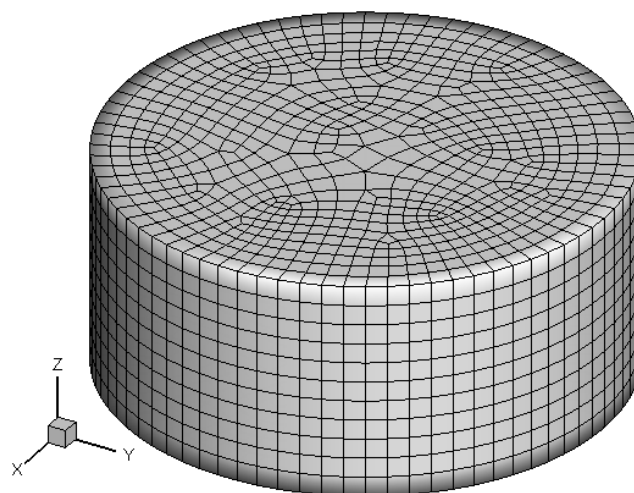


Figura 125. Malla y discretización de la columna de cálculo (2.5 m de diámetro por 1 m de alto).

Resultados: Para llegar a obtener resultados ajustados a los datos medidos ha sido necesario realizar algunos ajustes y modificaciones en la estructura del modelo debido a las

limitaciones del módulo de balance térmico superficial. El modelo FreeFlow solamente contempla balance térmico superficial a través de la capa superficial de la malla, por lo que se han tenido que implementar, de manera simplificada, los efectos de las pérdidas de calor por el fondo así como la transferencia de calor en las paredes del depósito. Para realizarlo se ha multiplicado los efectos del balance térmico por 1.5 y se ha restado una pérdida de calor por el fondo de 50 W/m^2 (Prats et al., 2011).

En la Figura 126 se presentan los resultados del modelo FreeFlow con el módulo de temperatura superficial aplicados al depósito. Se comparan las medidas de la temperatura del agua en el centro del depósito a varias profundidades (colores azules y grises) con la temperatura modelizada en el fondo (naranja) y en superficie (rojo).

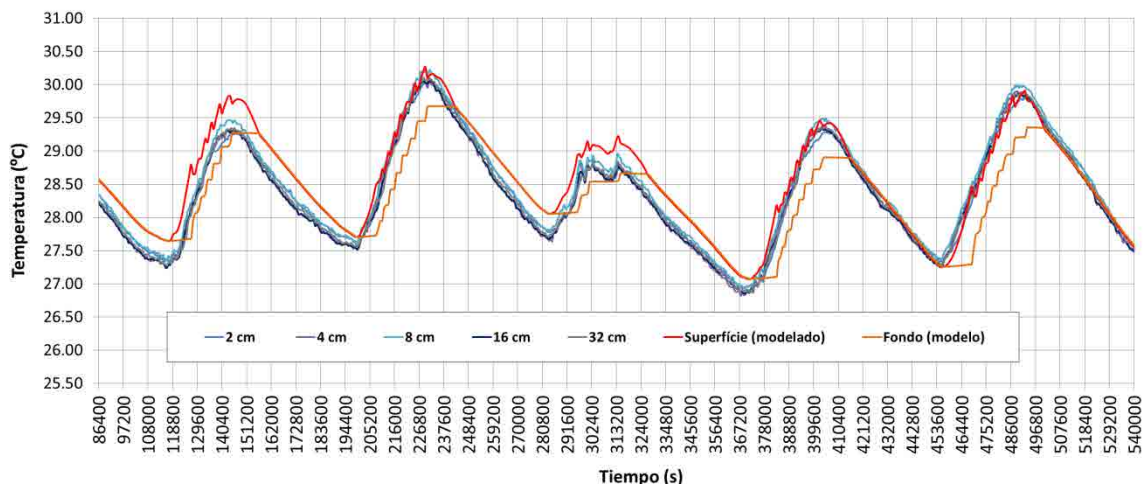


Figura 126. Resultados ($CI = 28.5 \text{ }^\circ\text{C}$). Comparación de los resultados de la simulación mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial en superficie (rojo) y fondo (naranja) con los datos medidos en la parte central del depósito (a 2, 4, 8, 16 y 32 cm de la superficie).

Discusión de resultados: El modelo captura de correctamente la evolución térmica del depósito a lo largo de una semana. Las tendencias y temperaturas calculadas por FreeFlow con el módulo de temperatura superficial se ajustan a las que presentan los datos medidos en el centro del depósito aunque se han tenido que realizar algunas suposiciones para tratar los efectos de transferencia de calor en las paredes y el fondo.

El calentamiento y el enfriamiento de la masa de agua siguen correctamente las tendencias y pendientes que muestran los datos medidos por los sensores y son de la misma magnitud. Según el modelo la estratificación es más acusada diurnamente (de unos $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ al

mediodía) mientras que por la noche presentaría cierta mezcla, según las medidas sí que hay cierta estratificación pero es más débil (de 0.1 a 0.2 °C) y se conserva por la noche.

La condición de contorno afecta de manera importante. En este caso se ha tomado una condición de depósito a temperatura constante (28.5 °C) y se ha empezado la simulación a las 12 de la noche.

Cabría estudiar con mayor detalle si los efectos de la discretización de la malla o temporal (horaria) influyen en los resultados.

Limitaciones: La condición inicial puede afectar la evolución térmica del modelo. El modelo no discretiza el norte (más frío) del sur (más insolación), al no considerar el ángulo de incidencia superficial se considera que la radiación solar incide igual en toda la superficie del depósito.

En el modelo inicial tampoco se consideraba transferencia de calor en las paredes y en el fondo del embalse y se ha tenido que tener en cuenta, pues si no los resultados no seguían la tendencia de las medidas de campo. Estos efectos tienen menor importancia en casos de lagos y embalses, pues normalmente en casos de embalses profundos no hay intercambio importante de calor con el sustrato ni con las paredes.

7.4.2 Datos de campo: Lago Tahoe (USA)

En este caso de estudio se han utilizado los datos correspondientes al estudio de Goldman y Carter de 1965 (Goldman & Carter, 1965) que ya fueron utilizados en los estudios de soluciones analíticas y de laboratorio también de Dake y Harleman (Dake & Harleman, 1969).

Descripción de los datos: El estudio comprende un periodo de 120 días que se cuentan a partir del 21 de marzo de 1962 (Dake & Harleman, 1969). De mayo a septiembre se puede considerar que la radiación es aproximadamente constante de $6.53 \cdot 10^6$ cal/cm²día (Dake & Harleman, 1969), las pérdidas de calor por evaporación basadas en el promedio son de $3 \cdot 10^6$ cal/cm²día (adicionalmente la densidad del agua es de 1.0 g/cm³, la difusión molecular del agua es de 0.0014 cm²/s y el calor específico del agua es 1.0 cal/g).

Malla: En este estudio no se pretendía estudiar la geometría real del lago en tres dimensiones puesto que solamente se cuenta con perfiles verticales de la evolución térmica

del lago Tahoe. Además, es un embalse con dimensiones y comportamiento similares en X y en Y además de tener velocidades muy pequeñas que se pueden considerar prácticamente nulas para este caso de estudio. Se ha simplificado la geometría mediante una columna vertical de 100 m. Se ha utilizado una malla regular en forma de columna vertical de 3 m x 3 m x 100 m, discretización en prismas como se puede ver en la Figura 127.

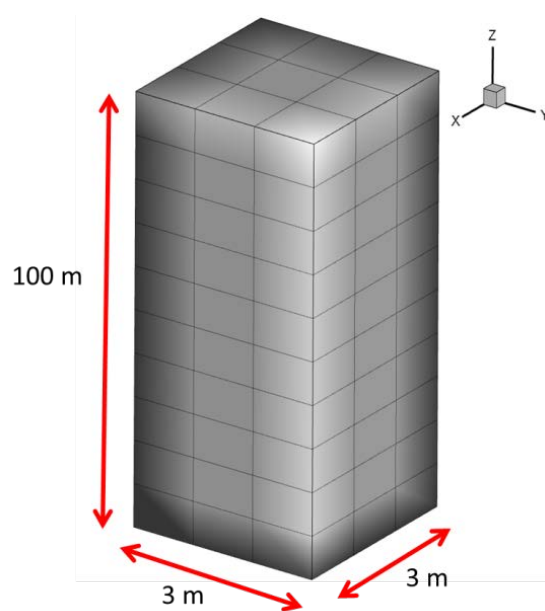


Figura 127. Malla y discretización de la columna de cálculo (3 m x 3 m x 100 m).

Resultados: Los resultados numéricos se han comparado con los datos de campo medidos en los días 44, 85 y 116 (Dake & Harleman, 1969; Goldman & Carter, 1965) y se han representado en la Figura 40.

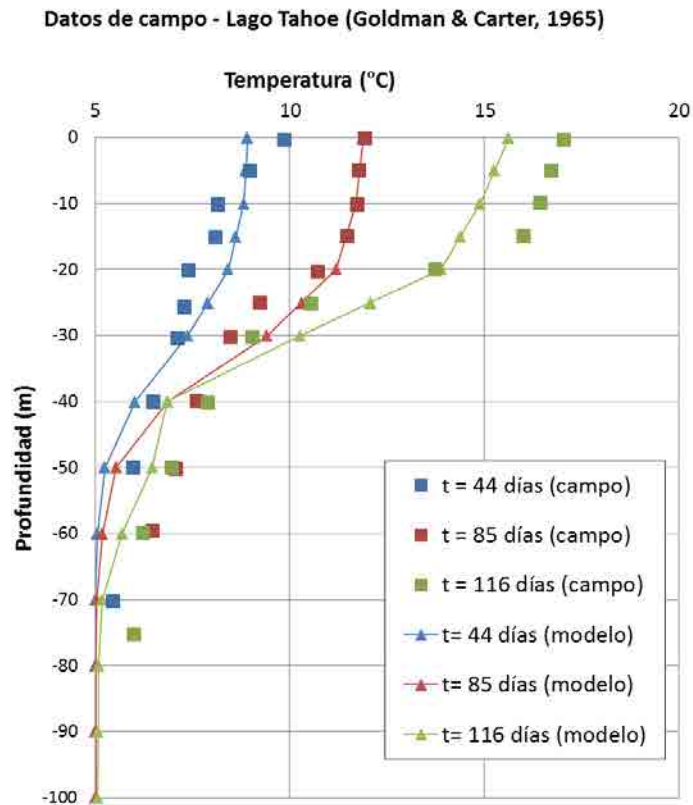


Figura 128. Resultados del test mediante FreeFlow con el módulo temp_sup. Comparación de los datos medidos en campo (Goldman & Carter, 1965) con los resultados de la simulación (días 44, 85 y 116).

Se ha calculado el error cuadrático medio y la desviación estándar de los datos simulados por perfiles entre las profundidades de 0, -5, -10, -15, -20, -30, -40, -50 y -60 m para los tres días de estudio, los resultados se muestran en Figura 129.

	t= 44 días	t= 85 días	t= 116 días
Error cuadrático medio	0.400	0.684	1.461
Desviación estándar	0.632	0.827	1.209

Figura 129. Error cuadrático medio y desviación estándar de la temperatura para los perfiles de comparación (de 0 a -60 m de profundidad), unidades en °C.

En la Figura 130 se puede ver la evolución de la estratificación en los instantes de tiempo correspondientes a los días en los que se muestreó la temperatura en el Lago Tahoe: a) Condición inicial 6 °C instante t=0 días, b) t= 44 días; c) t= 85 días y d) t= 116 días. Se puede observar el calentamiento superficial de la columna de agua debido a la radiación y a medida que pasan los días se observa el desarrollo de la termoclina (entre los 30 y los 40 m). El calentamiento superficial del epilimnion es más importante mientras que en profundidad se

nota pero de manera más suave. A partir de unos 70 m de profundidad el modelo no muestra aumento de temperatura y sigue con la temperatura de 5 °C que tenía como condición inicial.

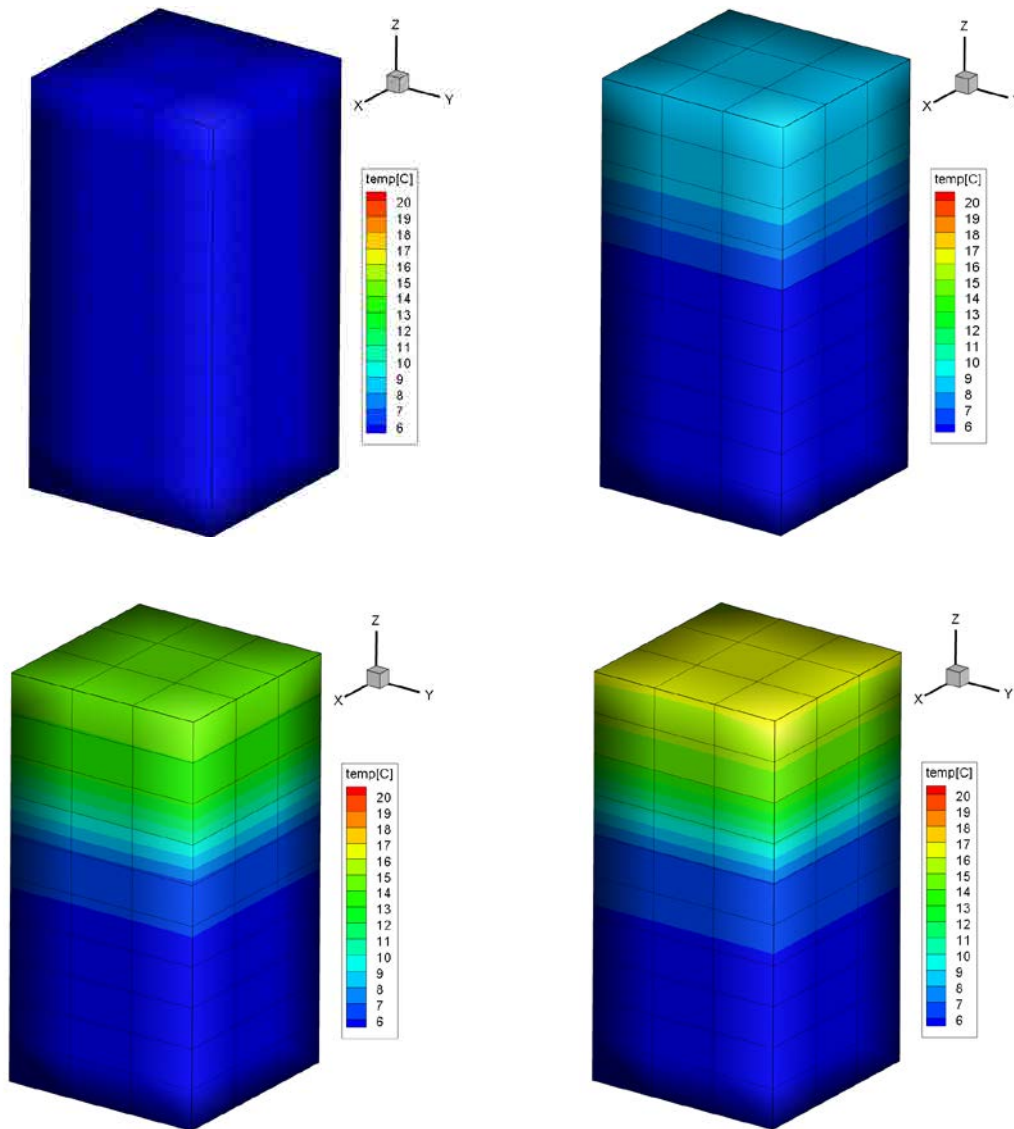


Figura 130. Resultados del test mediante FreeFlow con el módulo temp_sup. a) Condición inicial 6 °C instante t=0 días, b) t= 44 días; c) t= 85 días y d) t= 116 días.

Discusión de resultados: El modelo captura de manera satisfactoria la evolución térmica del Lago Tahoe a lo largo del tiempo; las mayores diferencias se observan en las dos capas superficiales del perfil correspondiente al día 116 (Figura 40, líneas en verde).

Limitaciones del modelo: El modelo FreeFlow con el módulo de balance térmico superficial “temp_sup” tiende a suavizar los perfiles de temperatura en las capas del

epilimnion, esto se debe a que la introducción del término fuente de temperatura se hace para toda la capa superficial y, en este caso, esta capa tiene 10 m de grosor, por lo que el calor se reparte en todo el volumen.

El hecho de no tener en cuenta la transferencia de calor por las paredes o por el fondo no afecta a los resultados puesto que no hay mucha diferencia de temperaturas entre el agua y el sedimento. Esto permite aplicar el modelo FreeFlow con el módulo de balance térmico superficial en lagos y embalses profundos sin necesidad de incluir el balance térmico con el sedimento del fondo.

7.5 APLICACIÓN A LA CONFLUENCIA EBRO-SEGRE

En este apartado se muestran las simulaciones 3D de la evolución térmica de la zona de la confluencia entre los ríos Ebro y Segre, en la cola del embalse de Ribarroja (Figura 122). Se han comparado los resultados numéricos con los perfiles de temperatura muestreados en la zona de la confluencia los días 31/03/2011 y el 10/11/2011.

7.5.1 Malla de estudio

Para estudiar la confluencia se generó una malla a partir de la Batimetría realizada en 2007 más el modelo digital del tramo final del río Segre (unos 2 kilómetros aguas arriba) realizada en 2009 (Arbat Bofill *et al.*, 2010).

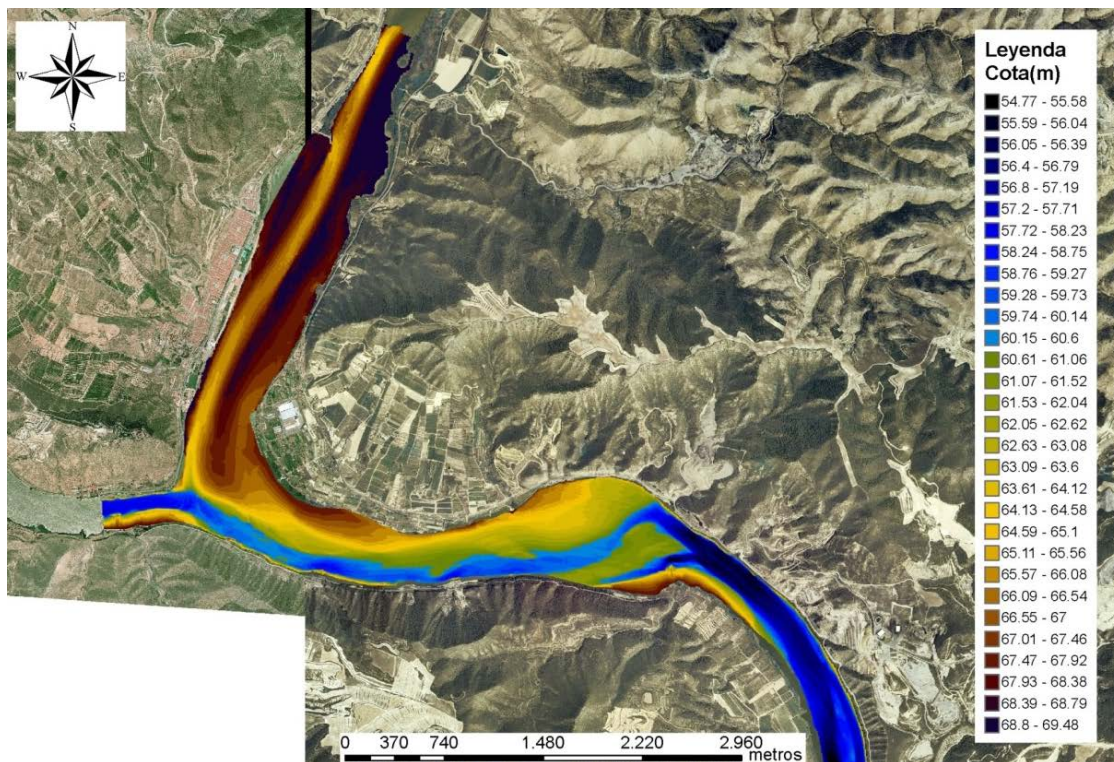


Figura 131. Vista general de la batimetría de la confluencia entre río Segre y el río Ebro. Tramo aguas arriba del embalse de Ribarroja de Ebro en el entorno de Mequienza (unión de las batimetrías 2007 y 2008).

La capa superficial se ha situado a la cota 71 m y se simula como “*rigid lid*” (tapa dura) no variable. La malla se ha generado a partir de la batimetría 2D (Figura 131) y de la capa superficial (a cota 71 m). Entre estas dos superficies se generan 10 capas de grosor variable. La malla resultante tiene 16093 vértices y 26080 elementos (Figura 132). Los elementos son prismáticos irregulares de base triangular y con los lados rectangulares.

Las condiciones de contorno de caudales se imponen en los contornos de entrada verticales (caras rectangulares) y son: entrada río Ebro (caudal constante y temperatura del agua constante), entrada río Segre (caudal constante y temperatura del agua constante), salida río Ebro (contorno abierto). Además el contorno de la capa superficial (*free surface*) en la que se aplican las condiciones del balance térmico superficial (apartado 7.3).

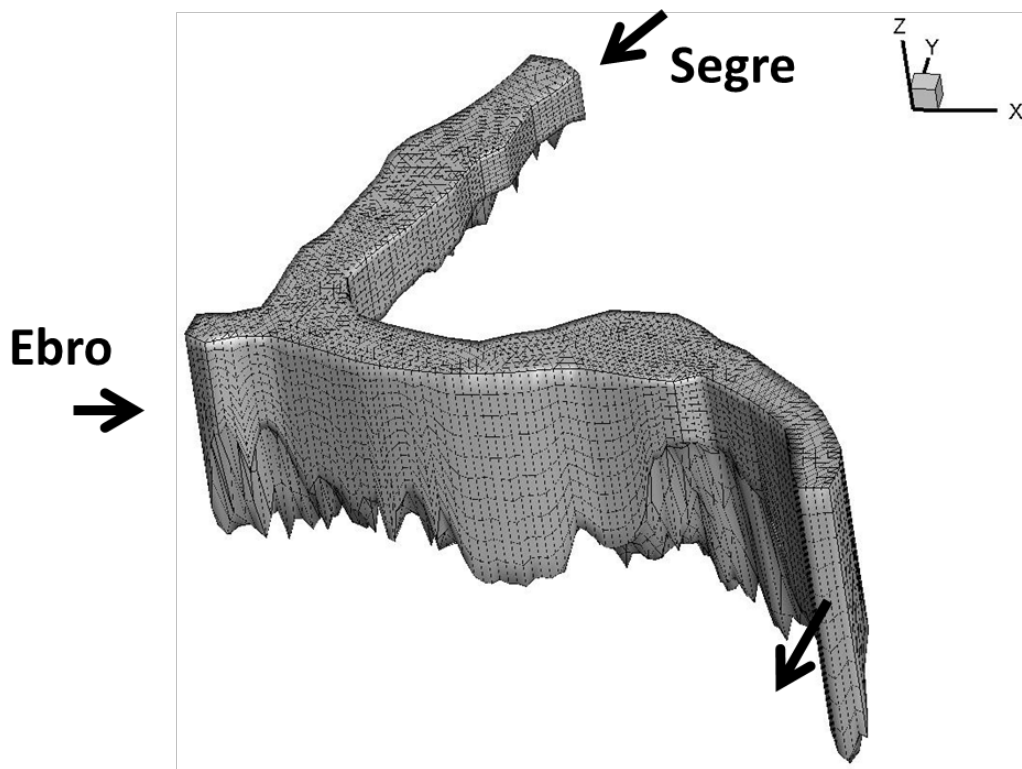


Figura 132. Malla 3D de la confluencia Ebro-Segre en la cola del embalse de Ribarroja. La relación de escala entre X-Y es 1-1 pero la dimensión z está exagerada 200%.

7.5.2 Día 31-03-11

El día 31 de marzo de 2011 el ICC realizó un vuelo con un aeronave que tenía un sensor térmico hiperespectral TASI (Figura 33). Además se recogieron temperaturas superficiales del agua y una serie de perfiles verticales de temperatura en varios puntos de la confluencia.

Los perfiles verticales han servido para validar las capacidades del modelo.

Descripción de los datos: Se ha realizado una simulación de 10 días tomado el día 31-03-11 como día tipo. Se han considerado los caudales medios diarios constantes durante 10 días y se han utilizado los datos meteorológicos correspondientes al día 31-03-11.

Las condiciones de contorno en cuanto a caudales y temperaturas del agua de entrada consideradas constantes en toda la simulación son: 91.2 m³/s entrando por el Segre a temperatura constante de 15 °C y 492.9 m³/s por el Ebro a 10.7 °C. Inicialmente se considera que el embalse no se encuentra estratificado y se considera una condición inicial de

temperatura de 11.85 °C y se deja correr el modelo durante 10 días con las mismas condiciones con tal que se estabilice.

Malla de cálculo: La malla de cálculo utilizada se ha definido en el apartado 7.5.1 y se muestra en la Figura 132.

Resultados: En la Figura 132 se muestran los datos de temperatura superficial del agua en la zona de la confluencia a partir de la radiancia. En la Figura 33 se presenta la temperatura superficial del agua calculada mediante FreeFlow en la confluencia a las 12 h del mediodía.

Se puede observar que el punto de hundimiento del Ebro coincide tanto en el modelo como en los datos de campo. También se observa como las laderas del Segre se calientan superando los 16.5 °C.

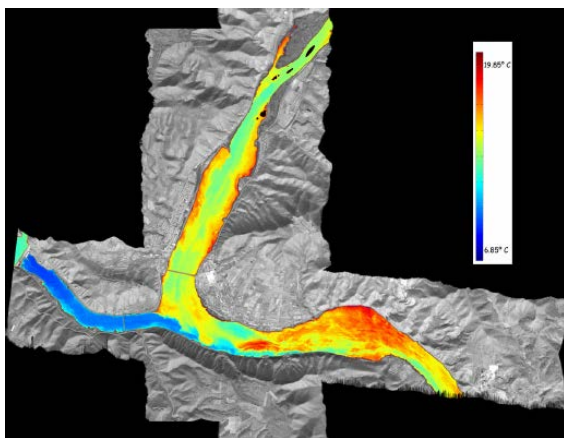


Figura 133. Imagen térmica superficial (mm superficiales) obtenida mediante el sensor TASI el 31-0-2011 al mediodía.

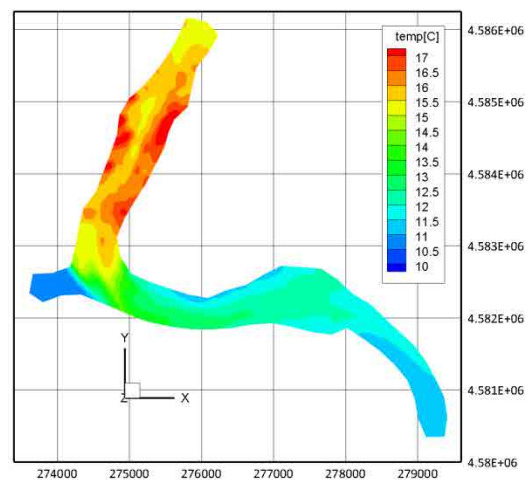


Figura 134. Resultados del modelo FreeFlow (capa superficial) con el módulo de temperatura superficial (día 31-03-2011 a las 12 h).

Aguas abajo de la confluencia, justo en la zona de ensanchamiento del río, es donde se aprecian mayores diferencias entre los datos medidos por el sensor aerotransportado y los obtenidos mediante el modelo numérico. Mientras que en la superficie se llegaría a los 18 °C el modelo FreeFlow con el módulo superficial de temperatura se queda en los 15 °C.

Para validar el modelo se comparan los resultados del modelo en los puntos donde se tomaron perfiles verticales de temperatura mediante una sonda CTD (Figura 135).

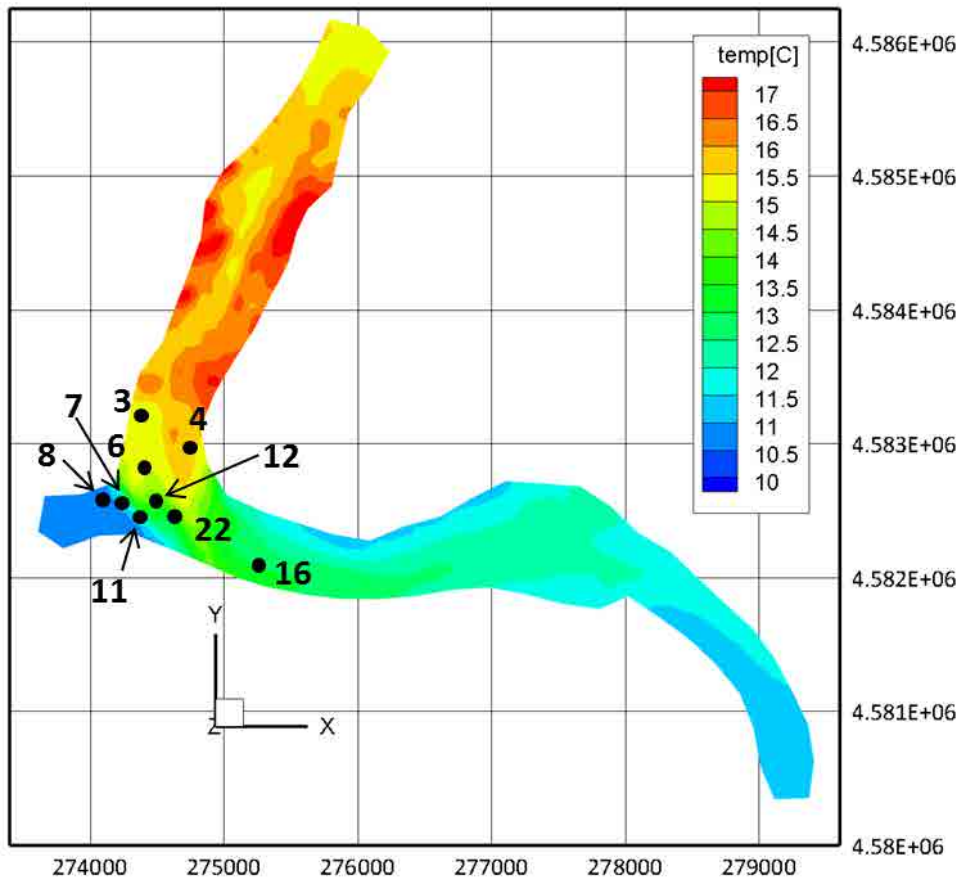


Figura 135. Situación de los puntos en que se comparan los perfiles verticales de temperatura medidos en campo con la sonda CTD y los resultados del modelo FreeFlow con el módulo de temperatura superficial (día 31-03-2011).

Las comparaciones entre algunos de los perfiles medidos y los simulados por el modelo se presentan en la Figura 136.

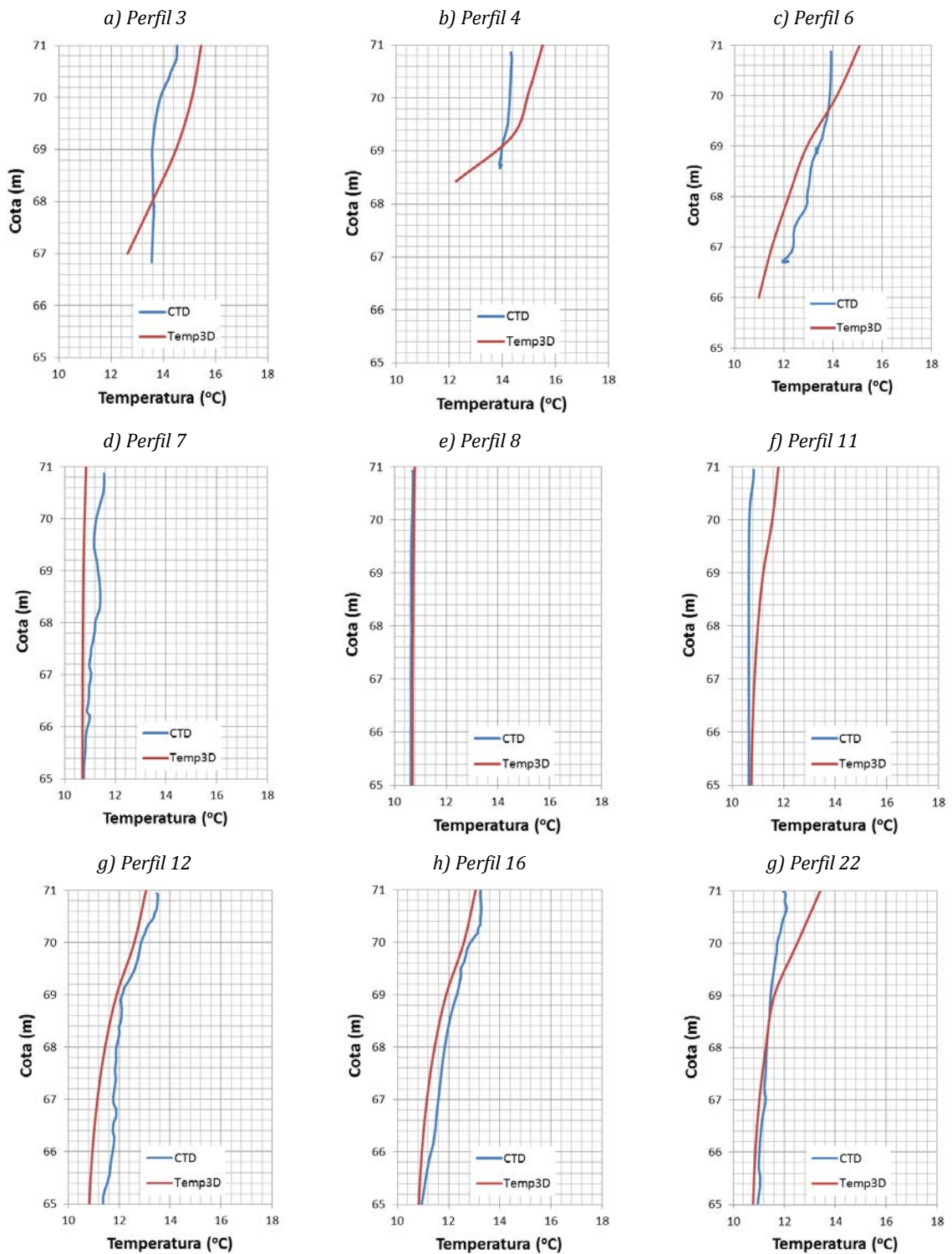


Figura 136. Comparación de los perfiles muestreados en campo con los resultados del modelo FreeFlow con el módulo de temperatura superficial.

El modelo numérico simula correctamente las tendencias de calentamiento superficial y captura correctamente el contacto Ebro-Segre tanto en cuanto a posición como temperaturas.

Análogamente a la Figura 34, se observa como en la zona del tramo final del Segre se sobreestiman un poco las temperaturas superficiales (del orden de 1.5 °C).

Discusión: El modelo ajusta correctamente la distribución vertical de temperatura en varios puntos antes de la confluencia Ebro y Segre se ajustan a perfiles más verticales mientras que en el contacto y aguas abajo del mismo se puede observar una estratificación térmica débil correspondiente a principios de primavera (31 de marzo de 2011).

Comparando los resultados obtenidos mediante el modelo con los datos de campo se observa que los perfiles en la zona del río Segre son del orden de 1 °C superiores en superficie mientras que se infravaloran en profundidad. Los perfiles muestreados en el río Ebro justo antes de la confluencia no muestran estratificación térmica, lo que corrobora la condición de contorno a temperatura constante introducida en el modelo.

En cuanto al contacto Ebro-Segre se han comparado los perfiles tomados justo antes del contacto (perfiles 7 y 8 de la Figura 136) y otros junto aguas abajo del contacto (perfiles 11 y 12 de la Figura 136), se ha comprobado como el modelo FreeFlow con el módulo de temperatura superficial ajusta correctamente el límite entre flujos.

Aguas abajo de la confluencia (perfiles 12, 22 o 16 de la Figura 136) se puede ver la diferencia de temperaturas a lo largo del perfil vertical, mostrando la estratificación débil de debida a la diferencia de temperatura entre los dos ríos entrantes al embalse que hay a principios de primavera. Mientras que los perfiles 12 y 16 simulados por el modelo FreeFlow se ajustan a los muestreados mediante la sonda CTD el perfil 22 sobrevalora en 1.5 °C la temperatura en superficie.

No se muestrearon perfiles aguas abajo del punto 22 (Figura 136), cosa que hubiese sido interesante a la hora de comparar los valores de los perfiles verticales de temperatura del modelo 3D. En esta zona solamente se dispone de la imagen térmica superficial (Figura 132) a partir de los datos del sensor TASI, que infiere la temperatura superficial del agua (del orden de milímetros) a partir de la radiancia del agua.

Limitaciones del modelo: En la simulación anterior se ha considerado un régimen de caudales de entrada medios diarios y temperaturas del agua medias diarias constantes, además de una repetición de 10 días con las condiciones meteorológicas correspondientes al día 31/03/2011. Cabría estudiar si las condiciones iniciales (caudales de los ríos Ebro y

Segre, temperatura inicial del embalse y meteorología) impuestas en la simulación se corresponden con las reales así como las variaciones de caudal que tuvieron lugar durante el día. Estas condiciones de contorno son críticas a la hora de estudiar la posición y la evolución del contacto Ebro-Segre así como su desarrollo posterior.

En el modelo FreeFlow se ha considerado que el Segre entra a temperatura constante por lo que mediante un caudal de entrada estratificado en la vertical se podría solucionar el efecto de esta condición de contorno.

El balance térmico superficial se introduce en el grueso de la capa superficial, en las zonas de menor calado este grueso puede ser del orden de varios centímetros mientras que en las zonas de mayores calados este grosor puede superar el metro. Esto puede provocar que se suavice la estratificación en la vertical.

En la zona correspondiente al ensanchamiento del río, a unos 2 kilómetros de la confluencia Ebro-Segre se han observado temperaturas superficiales altas mediante el sensor TASI mientras que con el modelo se ha infravalorado del orden de 4 °C. Esto puede ser debido a varios factores que se deberían estudiar más detalladamente, el primero es saber si esta temperatura superficial es representativa del bloque superficial en que se ha discretizado la malla de Ribarroja (en esta zona la capa superficial del modelo supera el metro de grosor) o si solamente se trata de altas temperaturas en los milímetros superficiales.

7.5.2.1 Evolución de la temperatura del agua

En las imágenes de la Figura 137 se ha representado la evolución térmica de diaria en la zona de la confluencia para el día 31 de marzo de 2011.

Se representan resultados térmicos cada cuatro horas en capas horizontales superpuestas en las cotas correspondientes a los 63, 65, 67, 69 y 71 m (superficie). En las figuras a y f de la Figura 137 se puede ver como durante la noche hay un enfriamiento de la superficie del agua. A partir de las 8 de la mañana, Figura 137 b, el agua se empieza a calentar de nuevo. Los efectos del calentamiento se notan más en la zona del Segre puesto que hay menor calado, especialmente en las márgenes del río.

Como que el contacto entre las aguas del Segre y el Ebro depende principalmente de los caudales de entrada y estos son constantes en este caso de estudio no se aprecia mucha variación.

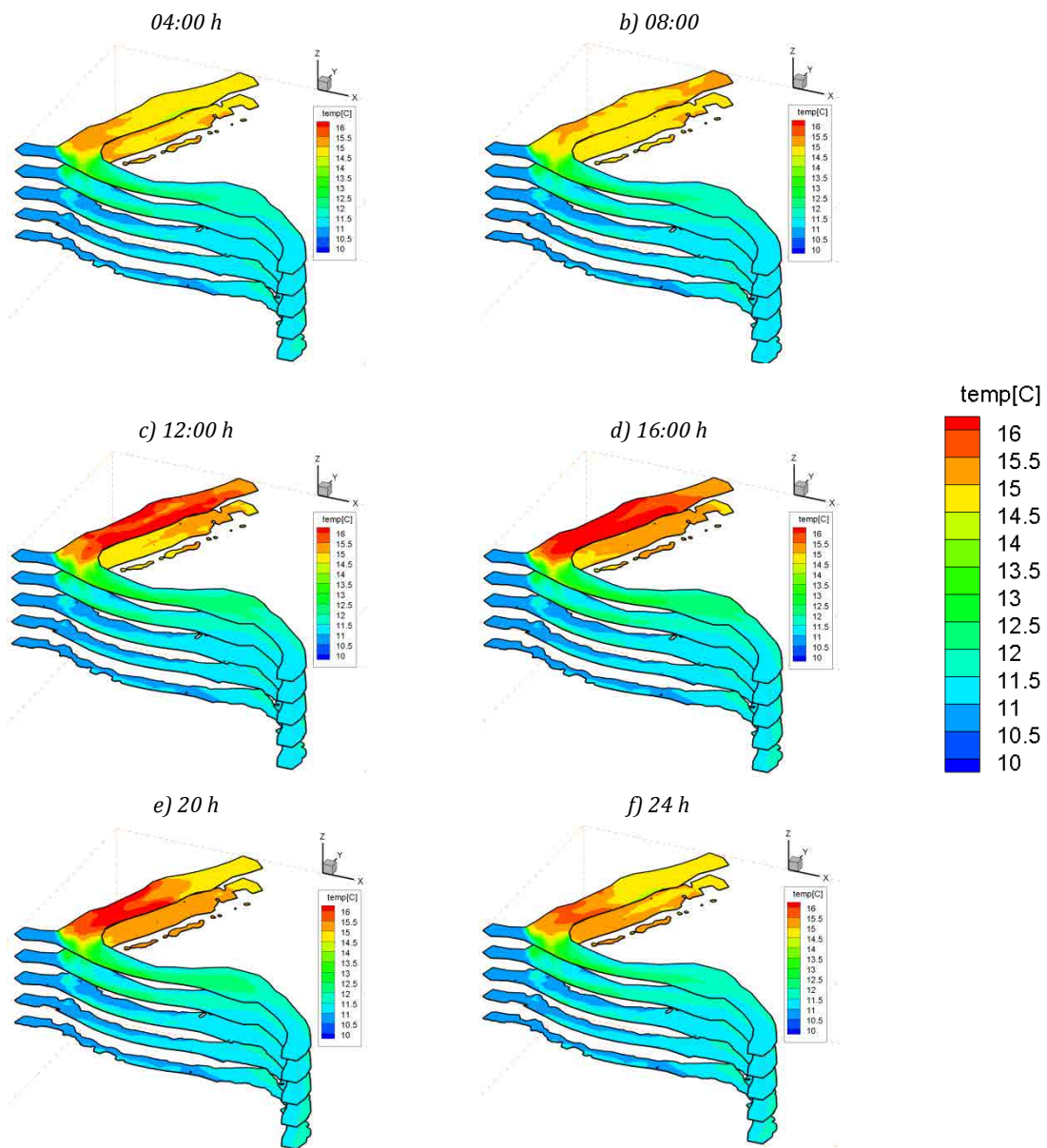


Figura 137. Evolución de la temperatura del agua en la zona de la confluencia Ebro-Segre (31-03-2015). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje Z cada 4 h.

Al mediodía la situación es la de la Figura 138, en las márgenes del tramo final del Segre se superan puntualmente los 16 °C (Figura 135).

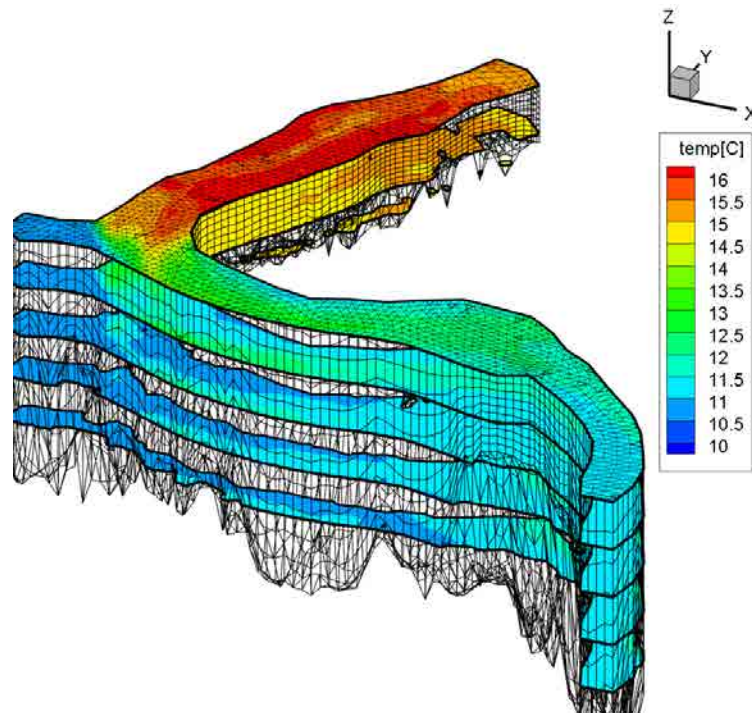


Figura 138. Temperatura del agua en la confluencia Ebro-Segre (31-03-2015). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje Z a las 12 h.

También se puede ver la evolución de la temperatura mediante perfiles verticales: en la Figura 139 se muestran lonjas verticales perpendiculares al eje X cada 4 horas (aproximadamente perpendiculares a la dirección del Ebro) mientras que en la Figura 140 y la Figura 141 se muestran algunos perfiles verticales perpendiculares al eje Y (aproximadamente perpendiculares al río Segre).

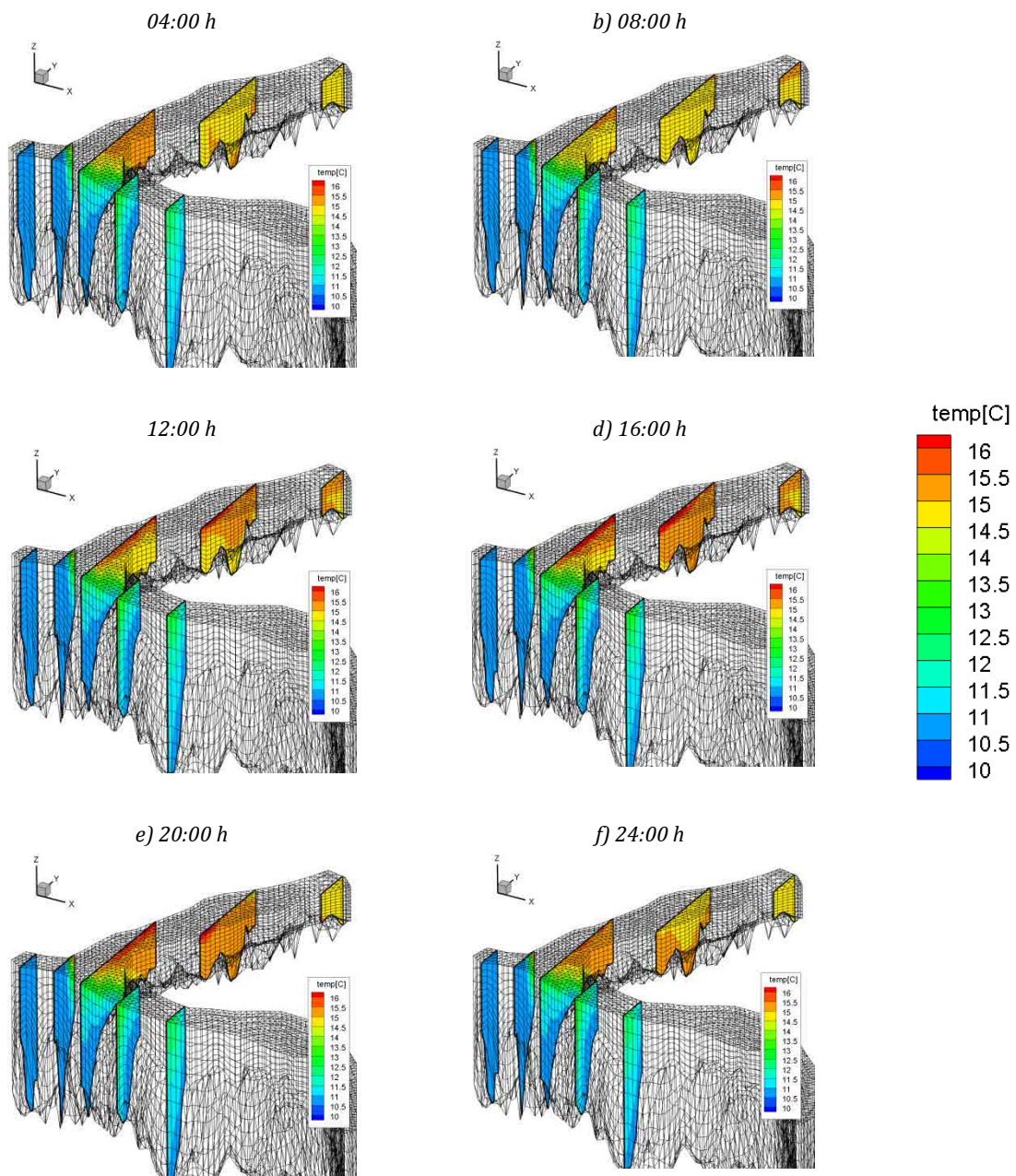


Figura 139. Evolución de la temperatura del agua en la zona de la confluencia Ebro-Segre (31-03-2015). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados verticales perpendiculares al eje X a las a) 4 h, b) 8 h, c) 12 h, d) 16 h, e) 20 h y f) 24 h.

En las dos imágenes de la Figura 140 y la Figura 141 se puede observar el efecto del calentamiento superficial en dos horas (a las 12 h y a las 14 h respectivamente), especialmente en la zona del tramo final del río Segre, con menores calados.

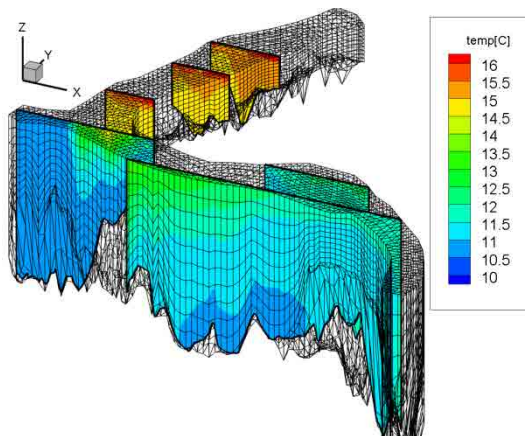


Figura 140. Evolución de la temperatura del agua en la zona de la confluencia Ebro-Segre (31-03-2015, 12 h). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje Y.

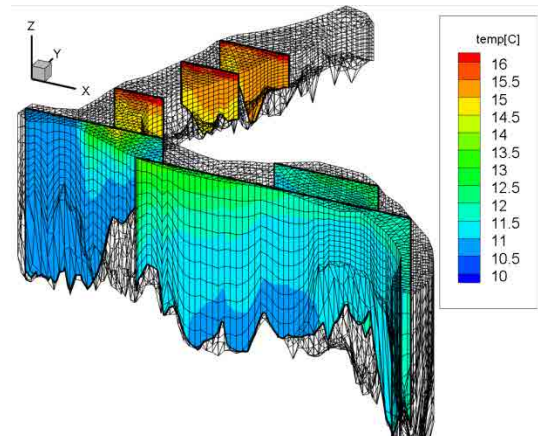


Figura 141. Evolución de la temperatura del agua en la zona de la confluencia Ebro-Segre (31-03-2015, 14 h). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje Y.

7.5.2.2 Velocidad del agua

Al considerarse caudales de entrada constantes en el tiempo y haber utilizado los caudales medios diarios del Ebro y el Segre hay pocas variaciones en la velocidad del agua. Sí que varía un poco la magnitud de la velocidad en el eje z (vertical) debido a la flotabilidad del agua menos densa al calentarse al mediodía pero el régimen de velocidades es dominado por los efectos de los caudales del Ebro y el Segre.

En la Figura 142 se muestra la magnitud del vector velocidad. Con esta figura se puede intuir por dónde está circulando principalmente el agua. Aunque no se tienen datos de medidas de velocidades en la zona sí se ha apreciado que las velocidades obtenidas concuerdan en orden de magnitud con las medidas en la zona de la Plataforma Flumen y las calculadas mediante CE-QUAL-W2 (Figura 95 o Figura 104).

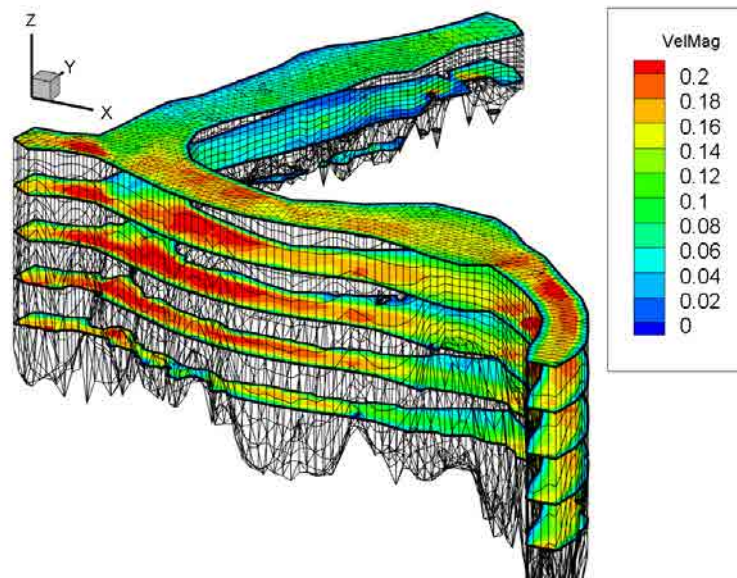


Figura 142. Magnitud de los vectores velocidad (x-y-x) del agua en la confluencia Ebro-Segre (31-03-2015). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje Z. Valores en m/s.

En la Figura 143 se han realizado cortes verticales perpendiculares al eje x.

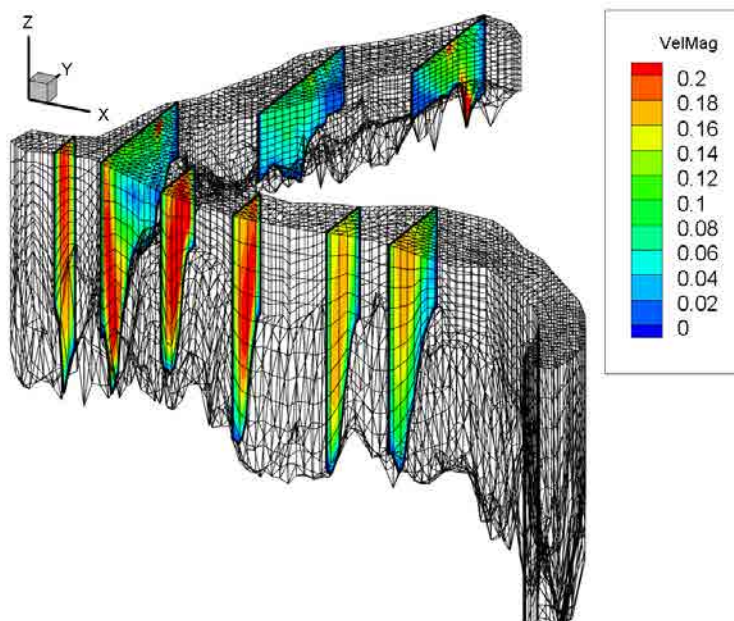


Figura 143. Magnitud de los vectores velocidad (x-y-x) del agua en la confluencia Ebro-Segre (31-03-2015). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje X. Valores en m/s.

En la Figura 144 se muestra la velocidad en el eje x y en la Figura 145 la velocidad en el eje y.

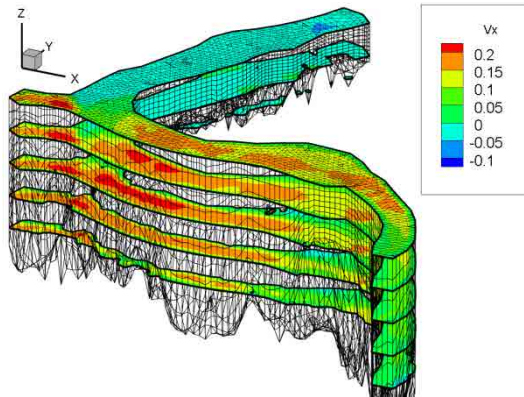


Figura 144. Componente x de la velocidad (31-03-2011). Capas a las cotas: 71, 69, 65 y 63 m. Valores en m/s.

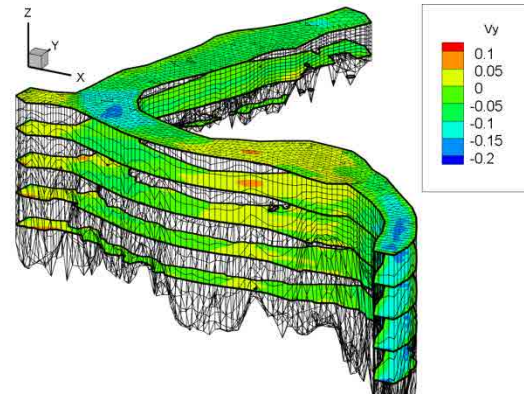


Figura 145. Componente y de la velocidad (31-03-2011). Capas a las cotas: 71, 69, 65 y 63 m. Valores en m/s.

7.5.2.3 Densidad

El patrón de densidad del agua (Figura 146) es consistente con los resultados de temperatura; a mayor temperatura la densidad disminuye por lo que el agua caliente tiende a flotar sobre el agua fría.

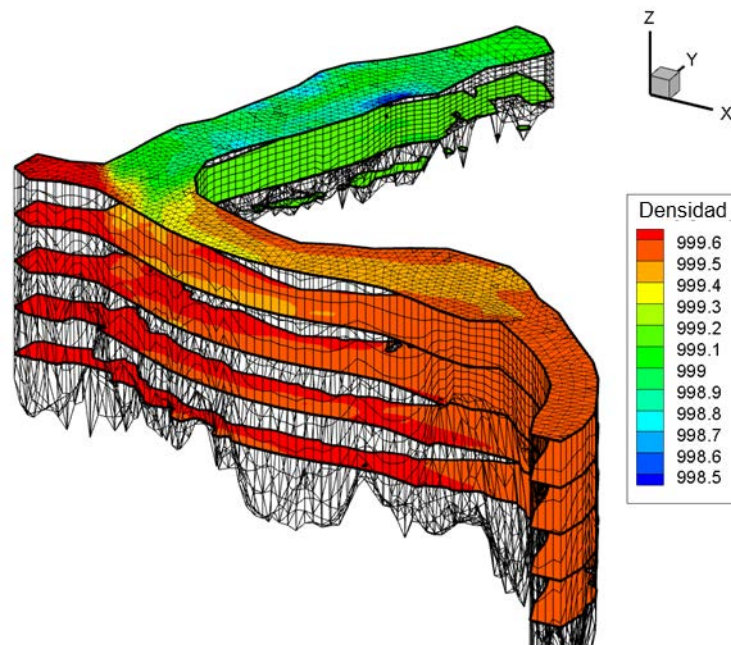


Figura 146. Densidad del agua (Kg/m^3). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados a las 12:00 del día 31-03-2011.

7.5.3 Día 11-10-11

El día 11 de octubre de 2011 el ICC realizó otro vuelo con un aeronave que tenía un sensor térmico hiperspectral TASI (Figura 34). Además se recogieron temperaturas superficiales del agua y una serie de perfiles verticales de temperatura en varios puntos de la confluencia que han servido para validar las capacidades del modelo FreeFlow con el módulo de temperatura superficial presentado en este capítulo.

Descripción de los datos: Igual que en el estudio anterior correspondiente al día 31 de marzo, se ha realizado una simulación de 10 días utilizando los datos meteorológicos correspondientes al día 11-10-11.

Las condiciones de contorno en cuanto a caudales y temperaturas del agua de entrada consideradas constantes en toda la simulación son: 18 m³/s entrando por el Segre a temperatura constante de 18.3 °C y 396.8 m³/s por el Ebro a 22 °C. Inicialmente se considera que el embalse no se encuentra estratificado y se considera una condición inicial de temperatura de 19.85 °C pero se deja correr el modelo durante 10 días con las mismas condiciones con tal que se estabilice.

Malla de cálculo: La malla de cálculo utilizada se ha definido en el apartado 7.5.1 (Figura 132) y se muestra en la Figura 132.

Resultados: En la Figura 147 se muestran los datos de temperatura superficial del agua en la zona de la confluencia a partir de la radiancia. En la Figura 148 se presenta la temperatura superficial del agua calculada mediante FreeFlow en la confluencia a las 12 h del mediodía.

Se puede observar que el contacto Ebro-Segre (esta vez situado unos centenares de metros aguas arriba del puente sobre el Segre) coincide tanto en el modelo como en los datos de campo.

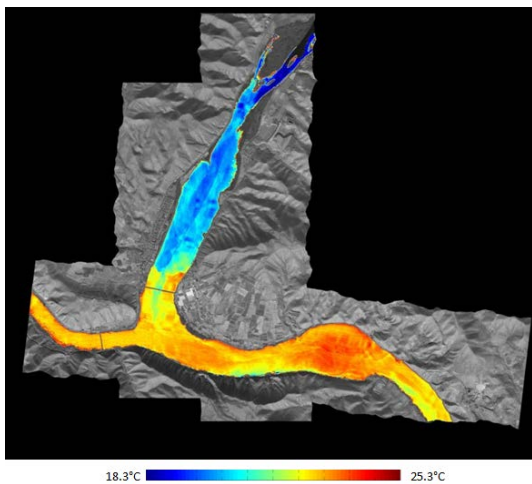


Figura 147. Imagen térmica superficial (mm superficiales) obtenida mediante el sensor TASI el 11-10-2011 al mediodía.

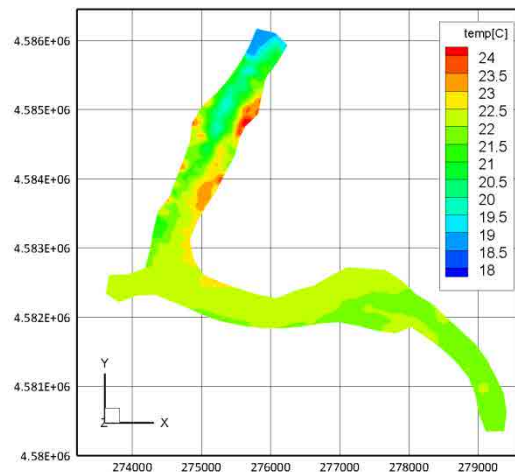


Figura 148. Resultados del modelo FreeFlow (capa superficial) con el módulo de temperatura superficial (día 11-10-2011 a las 12 h).

Se comparan los resultados del modelo en los puntos donde se tomaron perfiles verticales de temperatura mediante una sonda CTD. Las comparaciones entre algunos de los perfiles medidos y los simulados por el modelo se presentan en la Figura 150 (la situación de los puntos se ha marcado en la Figura 149). El modelo numérico simula aceptablemente el contacto entre las aguas del río Ebro (ahora más caliente) y el Segre.

Discusión: El modelo ajusta correctamente la distribución vertical de temperatura en varios puntos de la confluencia. Se puede observar una estratificación térmica muy débil correspondiente a principios de octubre (previa a la rotura de la termoclina). En este periodo de tiempo la temperatura del agua del Ebro está unos dos grados por encima de la temperatura del agua del Segre.

El perfil 3 (Figura 150) correspondiente al tramo final del río Segre es del orden de 0.5 °C superior al medido en campo pero el resto quedan un poco por debajo de las temperaturas medidas mediante la sonda CTD.

En cuanto al contacto Ebro-Segre se han comparado los perfiles tomados en las proximidades del contacto (Perfil 13, Figura 150) y se ha comprobado como el modelo FreeFlow con el módulo de temperatura superficial ajusta correctamente el límite entre ambos flujos (separados únicamente por 2 °C) aunque la estratificación es muy suave.

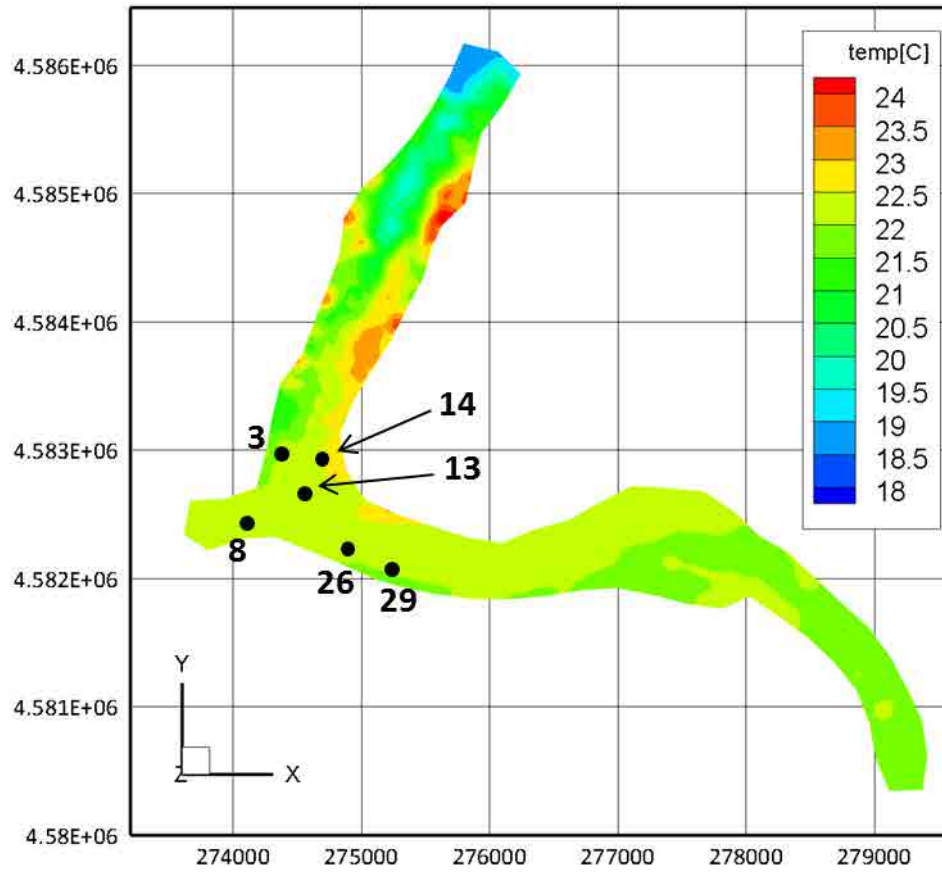


Figura 149. Situación de los puntos en que se comparan los perfiles verticales de temperatura medidos en campo con la sonda CTD y los resultados del modelo FreeFlow con el módulo de temperatura superficial (día 11-10-2011).

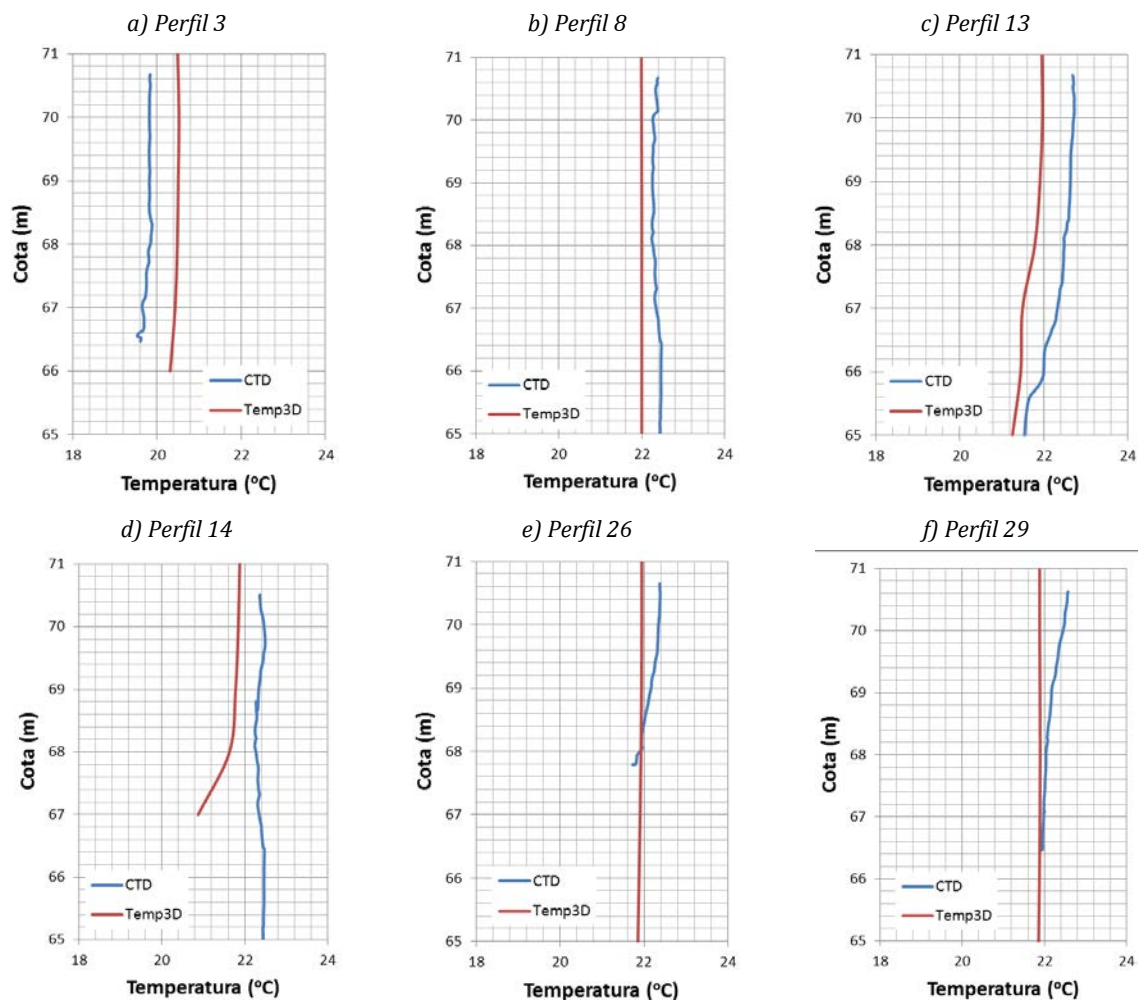


Figura 150. Comparación de los perfiles muestreados en camoo con los resultados del modelo FreeFlow con el módulo de temperatura superficial (día 11-10-2011).

Limitaciones del modelo: En la simulación anterior se ha considerado un régimen de caudales de entrada medios diarios y temperaturas del agua medias diarias constantes, además de una repetición de 10 días con las condiciones meteorológicas correspondientes al día 11/10/2011, un momento complicado puesto que es en las proximidades de los días de mezcla del embalse de Ribarroja y no suele haber una estratificación marcada. Además, los caudales relativos son totalmente condicionantes de la situación y la posición del contacto entre los dos ríos así como su desarrollo posterior.

En la zona correspondiente al ensanchamiento del río, a unos 2 kilómetros de la confluencia Ebro-Segre se han observado temperaturas superficiales altas mediante el sensor TASI mientras que con el modelo se ha infravalorado del orden de 0.5 °C.

7.5.3.1 Evolución de la temperatura del agua

En las imágenes de la Figura 151 se ha representado la evolución térmica de diaria (con resultados cada cuatro horas) en la zona de la confluencia para el día 11 de octubre de 2011.

Se representan resultados térmicos cada dos horas en capas horizontales superpuestas en las cotas correspondientes a los 63, 65, 67, 69 y 71 m (superficie).

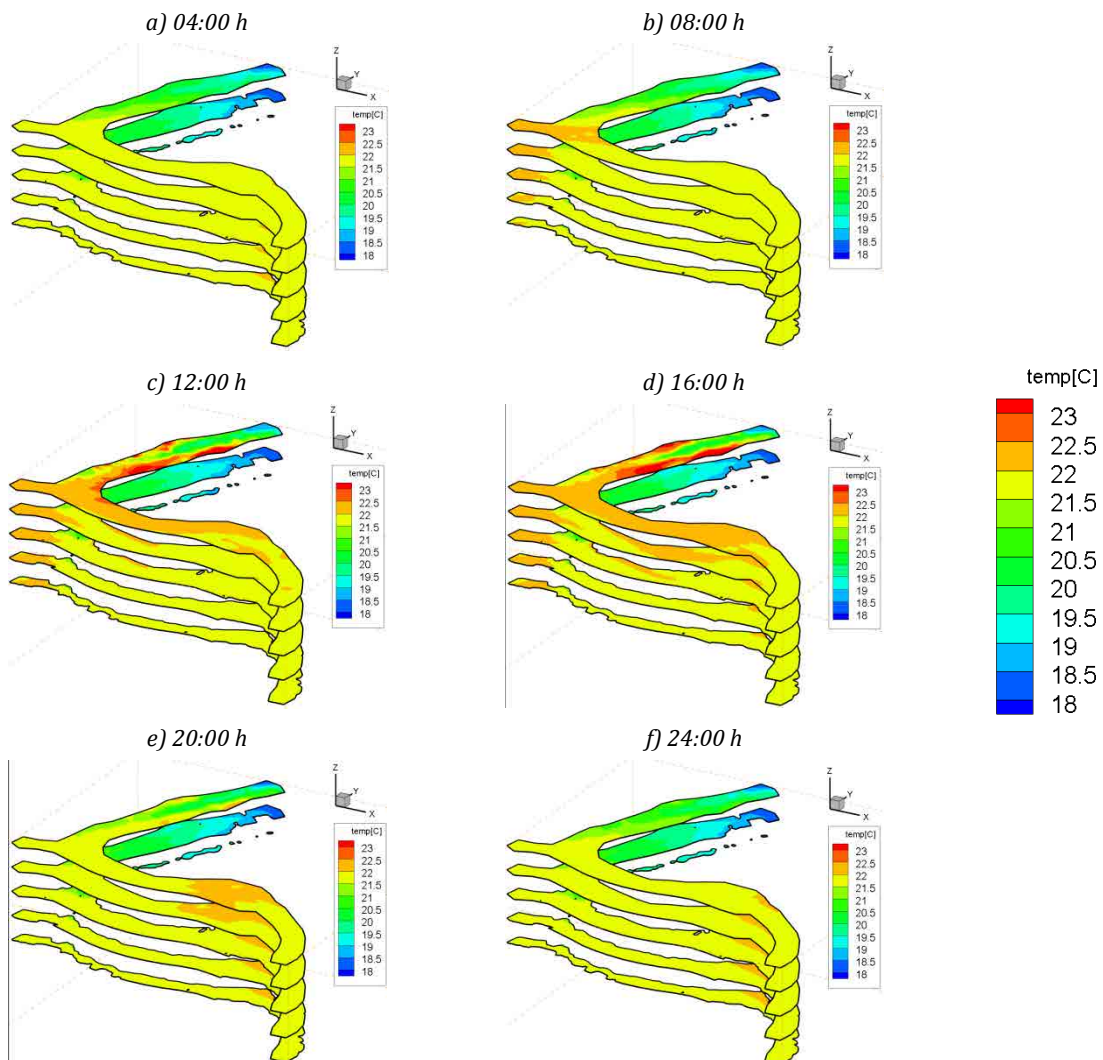


Figura 151. Evolución de la temperatura del agua en la zona de la confluencia Ebro-Segre (31-03-2015). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje Z cada 4 h.

En las figuras f y a de la Figura 151 se puede ver como durante la noche hay un enfriamiento de la superficie del agua. A partir de las 8 de la mañana, Figura 151 d, se empieza a calentar de nuevo. Los efectos del calentamiento se notan más en la zona del Segre puesto que hay menor calado, especialmente en las márgenes del río Segre.

Como que la posición del contacto entre las aguas del Segre y el Ebro depende principalmente de los caudales de entrada y estos son constantes en este caso de estudio no se aprecia mucha variación a lo largo del tiempo.

Al mediodía la situación es la de la Figura 152, en las márgenes del tramo final del Segre se superan puntualmente los 23 °C (Figura 149).

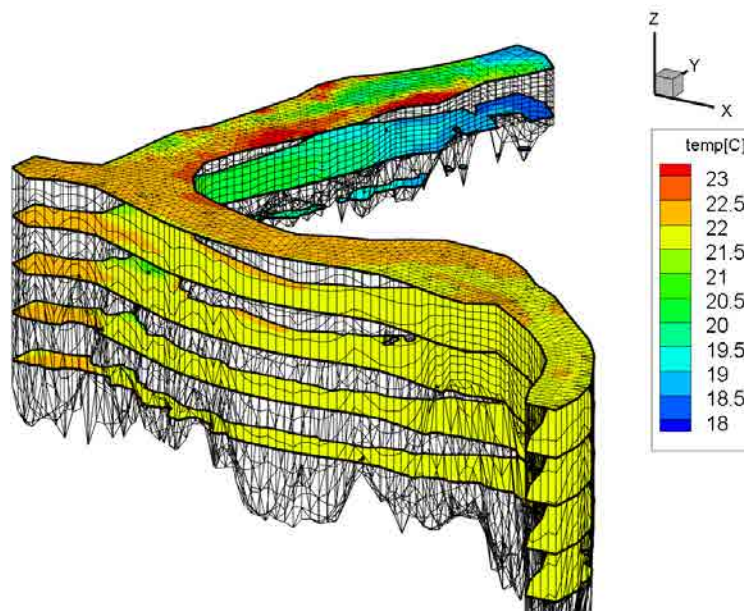


Figura 152. Temperatura del agua en la confluencia Ebro-Segre (31-03-2015). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje Z. a las a) 12 h.

También se puede ver la evolución de la temperatura mediante perfiles verticales perpendiculares al eje X: en la Figura 153 se muestran lonjas verticales cada 4 horas (aproximadamente perpendiculares a la dirección del Ebro) mientras que en la Figura 154 y la Figura 155 se muestran algunos perfiles verticales perpendiculares al eje Y (aproximadamente perpendiculares al Segre).

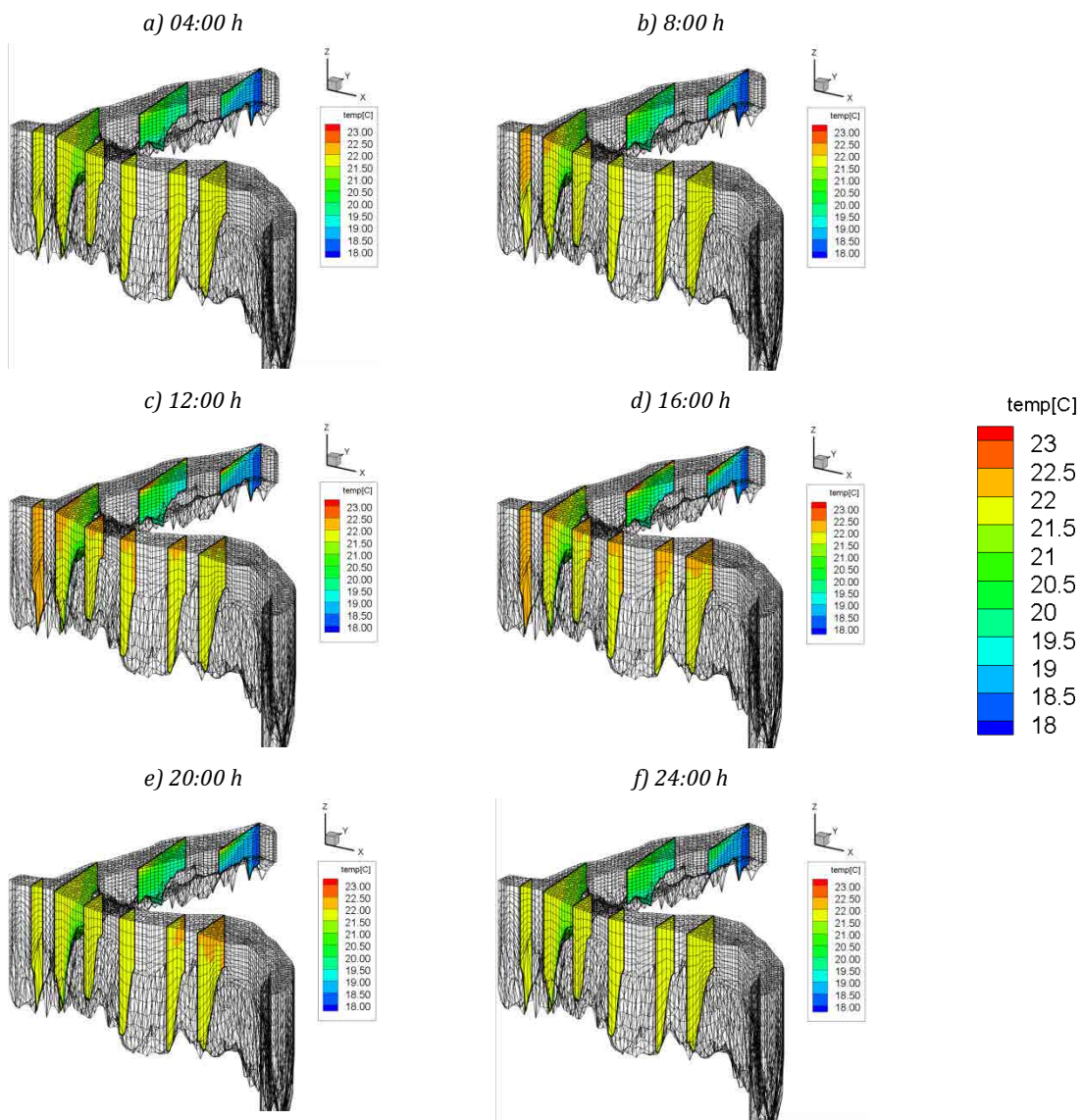


Figura 153. Evolución de la temperatura del agua en la zona de la confluencia Ebro-Segre (11-10-2015). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados verticales perpendiculares al eje X a las a) 4 h, b) 8 h, c) 12 h, d) 16 h, e) 20 h y f) 24 h.

En las dos imágenes de la Figura 154 y la Figura 155 se puede observar el efecto del calentamiento superficial en dos horas (entre las 12 h y las 14 h respectivamente), especialmente en la zona del tramo final del río Segre, con menores calados.

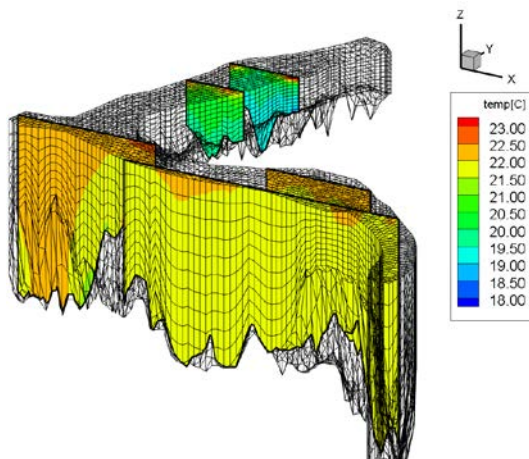


Figura 154. Evolución de la temperatura del agua en la zona de la confluencia Ebro-Segre (11-10-2015, 12 h). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje Y.

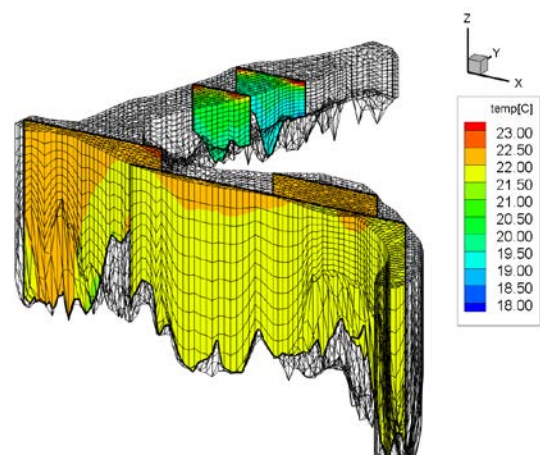


Figura 155. Evolución de la temperatura del agua en la zona de la confluencia Ebro-Segre (11-10-2015, 14 h). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje Y.

7.5.3.2 Velocidad del agua

Al considerarse caudales de entrada constantes en el tiempo y haber utilizado los caudales medios diarios del Ebro y el Segre hay pocas variaciones en la velocidad del agua. Sí que varía un poco la magnitud de la velocidad en el eje z (vertical) debido a la flotabilidad del agua menos densa al calentarse al mediodía pero el régimen de velocidades es dominado por los efectos de los caudales del Ebro y el Segre.

En la Figura 156 se muestra la magnitud del vector velocidad. Con esta figura se puede intuir por dónde está circulando principalmente el agua. Se ha apreciado que las velocidades obtenidas concuerdan en orden de magnitud con las medidas en la zona de la Plataforma Flumen y las calculadas mediante CE-QUAL-W2 (Figura 95 o Figura 104).

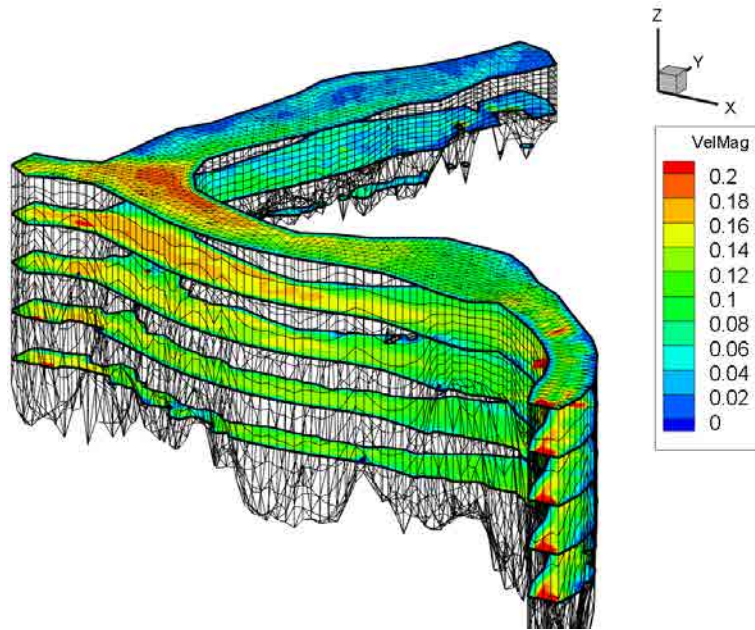


Figura 156. Magnitud de los vectores velocidad (x-y-x) del agua en la confluencia Ebro-Segre (11-10-2015). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje Z. Valores en m/s.

En la Figura 157 se han realizado cortes verticales perpendiculares al eje x.

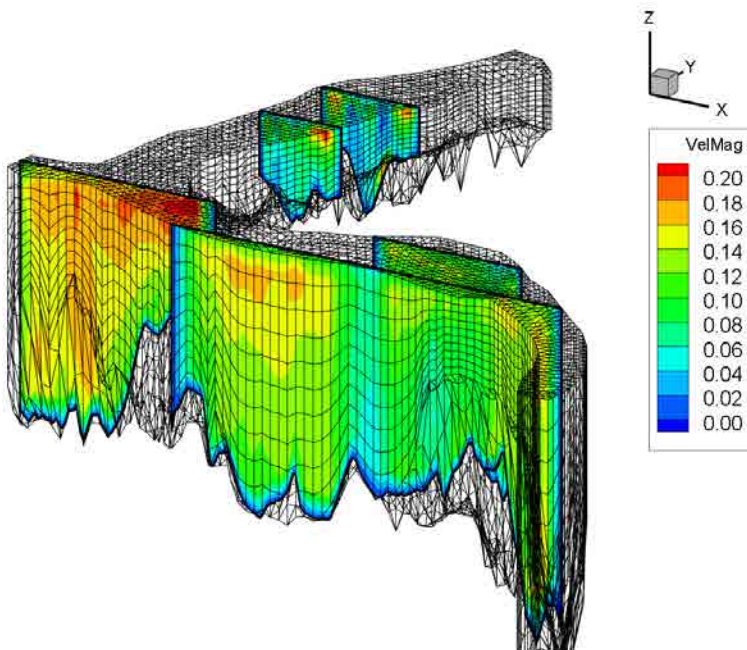


Figura 157. Magnitud de los vectores velocidad (x-y-x) del agua en la confluencia Ebro-Segre (31-03-2015). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados perpendiculares al eje X. Valores en m/s.

En la Figura 158 se muestra la velocidad en el eje x y en la Figura 159 la velocidad en el eje y.

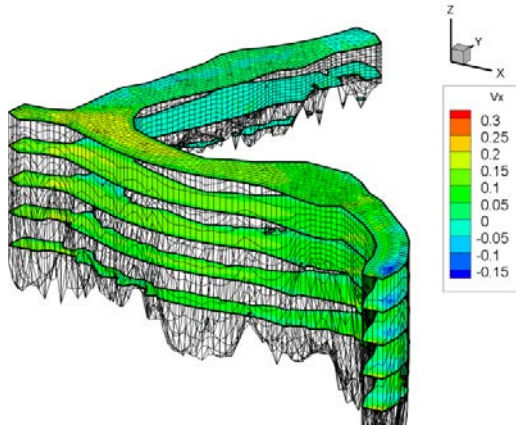


Figura 158. Componente x de la velocidad (11-10-2011). Capas a las cotas: 71, 69, 65 y 63 m. Valores en m/s.

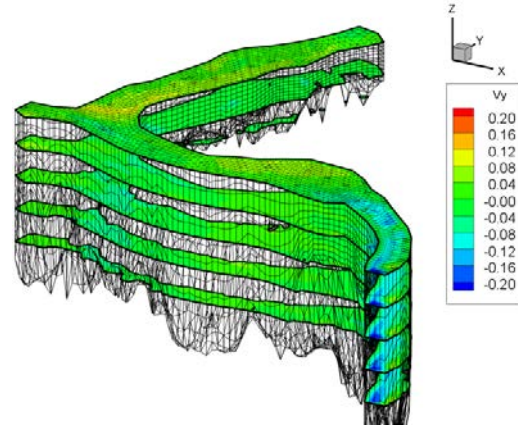


Figura 159. Componente y de la velocidad (11-10-2011). Capas a las cotas: 71, 69, 65 y 63 m. Valores en m/s.

7.5.3.3 Densidad

El patrón de densidad del agua (Figura 160) es consistente con los resultados de temperatura; a mayor temperatura la densidad disminuye por lo que el agua caliente tiende a flotar sobre el agua fría y la entrada del agua más fría por el Segre se hunde (colores rojos) por ser más densa.

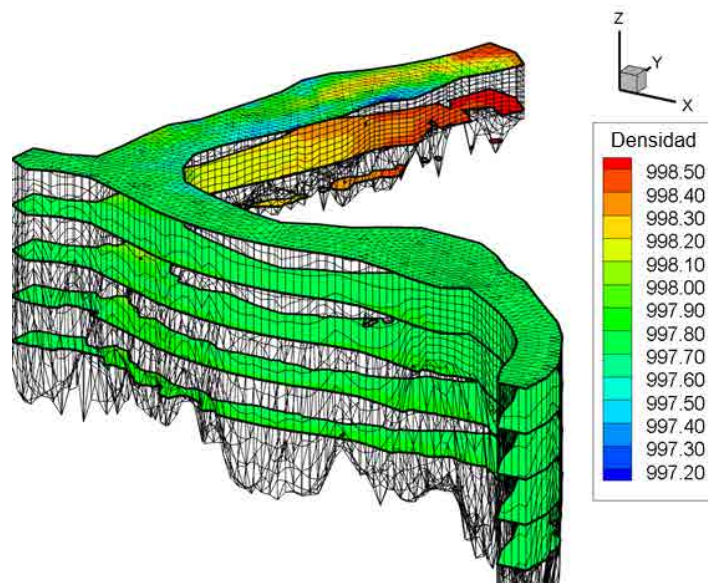


Figura 160. Densidad del agua (Kg/m^3). Resultados obtenidos mediante FreeFlow con el módulo de temperatura superficial. Capas de resultados a las 12:00 del día 11-10-2011.

7.6 EFECTO DE UNA INSTALACIÓN DE REFRIGERACIÓN EN LA TEMPERATURA DE UN RÍO

Se ha estudiado de manera esquemática cual sería la evolución de la temperatura en un tramo de río afectado por una instalación de refrigeración que toma agua del río y la suelta a mayor temperatura.

La polución térmica es la degradación de la calidad del agua por cualquier proceso que cambie la temperatura ambiente del agua (Hinrichs & Kleinbach, 2001). Una causa común de la polución térmica es el uso de agua de un río como refrigerante por las centrales nucleares o las centrales termoeléctricas. El combustible que utilizan se transforma en calor para producir esa energía y para enfriar una central se necesita mucha cantidad de agua, por lo que suelen construir sus instalaciones cerca de ríos, embalses o zonas costeras (EPA, 2008). Cuando el agua utilizada como refrigerante se devuelve al medio natural a una temperatura más alta, el cambio en la temperatura puede afectar al ecosistema, provocando problemas en las comunidades de flora y fauna, eutrofización, desequilibrios biológicos o aumentando la proliferación de organismos patógenos (Goel, 2006).

Para estudiar los efectos de la descarga de agua caliente en un tramo de río se estudió un caso teórico de estudio: un tramo de río rectilíneo de 10 Km en 3D con un a toma de caudal a los 4 Km y una entrada de caudal 2 Km aguas abajo.

La malla de cálculo se puede observar en la Figura 161, está formada por 10.000 hexaedros de 100 m longitud, 10 m de ancho y de grosor es variable (siempre hay 10 capas, por lo que el grosor varía gradualmente de 0.34 m a 1.14 m).

Esquema de estudio: el ejemplo que se muestra en el estudio consiste en un tramo de río de 10 Km en los que hay una extracción por el lateral izquierdo en el kilómetro 4 (toma de agua para la refrigeración) y un vertido de caudal a mayor temperatura (caudal de salida de la refrigeración de la central) en el kilómetro 6. El ancho es constante de 65 m y la profundidad varía de 3.4 a 11.4 m.

Se estudiaron los efectos de la hidrodinámica en función del caudal y la evolución térmica considerando que el caudal vertido del kilómetro 6 es de 30 °C (Figura 162).

Se consideraron diferentes combinaciones de caudales de entrada aguas de entrada (10, 20 y 30 m³/s) mientras que los caudales de la toma y el vertido térmico se dejaron constantes a 20 m³/s.

En los resultados se aprecia que el modelo reproduce la hidrodinámica y la evolución térmica del agua así como los efectos de la entrada y salida de caudal por la margen izquierda del río.

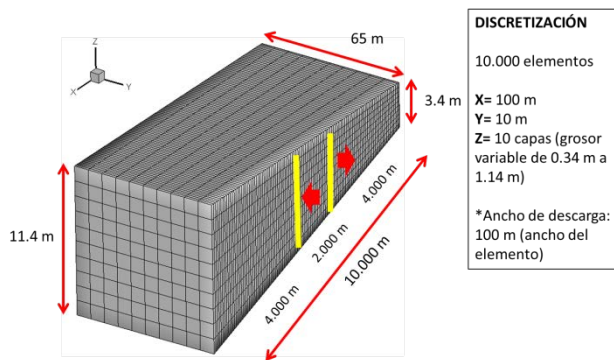


Figura 161. Discretización de la malla 3D del caso de estudio.

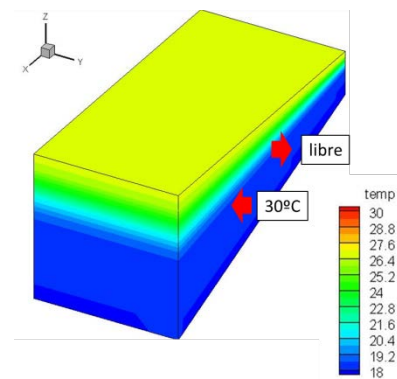


Figura 162. Condiciones iniciales de estratificación térmica (18 °C en profundidad y 27 °C en superficie).

En el punto de la toma también se estudiaron combinaciones en que se tomaba agua de toda la vertical o de la parte más profunda (se estudiaron comportamientos con pantallas verticales del 50% y del 70%). Con las mismas combinaciones de caudal pero tomando agua del fondo (más fría que la superficial). Se han comparado los resultados en cuanto a temperaturas e hidrodinámica, en la Figura 163 y Figura 164 se muestran los efectos térmicos en el perfil de temperatura (en superficie y en perfiles verticales respectivamente) de la pantalla del 70% y con un caudal circulante de 30 m³/s.

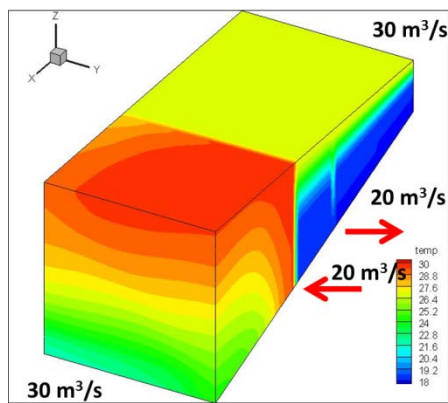


Figura 163. Mapa de temperaturas 3D que se forma con la descarga de agua a 30 °C. Pantalla del 70%.

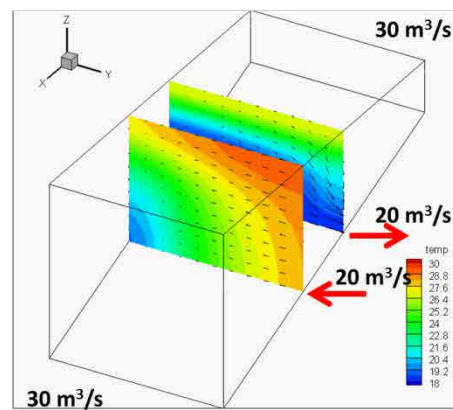


Figura 164. Detalle de las secciones transversales de toma (pantalla del 70%) y descarga lateral de caudal a 30 °C. Temperatura y vectores de velocidad.

7.7 CONCLUSIONES

El embalse de Ribarroja de Ebro presenta un patrón de flujo bidimensional excepto en su tramo de cola porqué se trata de un embalse largo y estrecho con pocas variaciones en el ancho. Para estudiar la zona de la cola del embalse, donde confluyen los ríos Ebro y Segre se ha puesta a punto el modelo tridimensional de la zona de la confluencia mediante FreeFlow 3D en el que fue necesario desarrollar un módulo de balance térmico superficial (*temp_sup*).

7.7.1 Capacidades del modelo

Se ha implementado un nuevo módulo de temperatura superficial al modelo FreeFlow (Cea *et al.*, 2008) permitiendo el cálculo del balance térmico superficial en función de las variables meteorológicas.

En esta primera versión del módulo de temperatura superficial se han introducido dos grupos de ecuaciones: las que utiliza el modelo numérico CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008) y las propuestas por Prats en el Capítulo 9 de su tesis doctoral (Prats, 2011). El segundo bloque, correspondiente a las ecuaciones propuestas en la tesis de Prats (2011) ha sido utilizado en las simulaciones presentadas en este capítulo. El modelo FreeFlow con el módulo de temperatura superficial "*temp_sup*" simula satisfactoriamente la estratificación térmica y calcula el balance térmico superficial en la capa superior de la malla. Es capaz de simular

correctamente el calentamiento y enfriamiento superficial de masas de agua durante periodos de tiempo largos.

Se han validado las capacidades del modelo con datos de laboratorio (depósito D1 en la UPC) y datos de campo (Lago Tahoe) antes de aplicarlo a la confluencia Ebro-Segre.

Se han realizado dos simulaciones de la confluencia Ebro-Segre correspondientes a los días 31-03-2011 y al 11-10-11 que se han podido comparar con muestreos de temperatura en campo (perfiles e imágenes térmicas superficiales) que también aportan credibilidad y veracidad a las capacidades del modelo.

Después de las validaciones se ha podido estudiar la evolución térmica diaria de la confluencia Ebro-Segre, obteniendo la distribución 3D de temperaturas del agua y velocidades en x-y-z.

Posteriormente se ha aplicado el modelo a otros casos de estudio como por ejemplo el estudio de la evolución térmica del agua en un tramo de río vinculado a la refrigeración de una central térmica.

7.7.2 Limitaciones del modelo

La limitación más importante a la hora de realizar simulaciones mediante el modelo FreeFlow es el número y el tamaño de los elementos de la malla, puesto que influyen notablemente en el tiempo de cálculo.

- El hecho de poner el resultado del balance térmico superficial en todo el grosor de la capa superficial provoca una serie de limitaciones que afectan a los resultados del modelo:
 - Grosor de capa variable, aunque el incremento térmico se pone en todo el elemento el balance depende del área superficial del elemento. Las capas más gruesas tienen 1.5 m de grosor mientras que las más delgadas son de 0.20 m aproximadamente.
 - El perfil de temperaturas superficial se suaviza en la capa superior.

- Es difícil comparar los resultados del módulo *temp_sup* en todo el grosor de capa con las mediciones de radiancia de los vuelos del ICC puesto que estos dan información sobre los milímetros superficiales. Con la malla del modelo de la confluencia algunos elementos superficiales tienen grosores de 0.20 m hasta 1.5 m.

7.7.3 Futuros desarrollos

Dentro de los futuros desarrollos que se deberían aplicar al modelo FreeFlow se destacan:

- Simulaciones con **lámina libre**. Por el momento el modelo funciona con tapa superficial rígida ("*rigid lid*") haciendo que los cálculos sean más rápidos pero sin posibilidad de contemplar variaciones de nivel. Para embalses con variaciones de nivel considerables, esto podría representar una limitación, por lo que se sugiere implementar la posibilidad de considerar la superficie libre variable en el tiempo.
- Sería interesante optimizar el código con tal de poder realizar simulaciones con mallas más finas más rápidamente.
- El módulo de temperatura superficial sigue desarrollo, las formulaciones de las ecuaciones de intercambio de calor superficial dependen de la zona de estudio. En un futuro se pueden introducir otras formulaciones y así permitir al usuario elegir entre más posibilidades y no únicamente las de CE-QUAL-W2 o las sugeridas por Prats. También se puede refinar el módulo introduciendo parámetros que tengan en cuenta los efectos de la sombra topográfica o el coeficiente de protección del viento por zonas o elementos.
- El resultado del balance superficial se suma al elemento de la capa superficial (todo el elemento) como un incremento de la variable *phi* (apodado *srcphi*), en este caso temperatura. Este incremento se suma a la temperatura en cada elemento del contorno superficial y afecta al grosor de la capa. Sería interesante que modificar el código para implementar el incremento únicamente en el plano superficial y no en todo el grosor de la capa.

También sería interesante introducir las ecuaciones de intercambio de calor entre el sustrato y la masa de agua en el modelo.

En el caso concreto de las simulaciones realizadas en la confluencia de los ríos Ebro y Segre se recomienda realizar más estudios teniendo en cuenta:

- **Malla más fina** en las capas superficiales o malla de más elementos. Uno de los factores más limitantes a la hora de realizar las simulaciones es el número de elementos. La malla utilizada para este estudio tiene 26080 elementos y 10 capas de grosor variable en la vertical. Sería interesante discretizar de manera más detallada en la vertical.
- Realizar simulaciones **variables en el tiempo**. Los casos de estudio se ha estudiado régimen permanente con caudales medios diarios y temperaturas de entrada constantes. Sería interesante simular las condiciones reales de turbinado por parte de la presa de Mequinzenza y los caudales del Segre así como las temperaturas que les correspondan y sus variaciones diarias.
- Tener en cuenta las concentraciones y los **aportes de sedimento del río Segre** al embalse de Ribarroja. La concentración de sólidos en suspensión también afecta al movimiento y a la densidad del agua, por lo que sería interesante realizar simulaciones teniendo en cuenta esta variable.

7.8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARBAT BOFILL, BLADÉ, DE POURCQ, DOLZ, LÓPEZ, ARMENGOL, & JAIME, 2010. *Dinámica sedimentaria del extremo aguas arriba del embalse de Ribarroja (río Ebro)*. II Dam Rehabil. Congr.

CEA, STELLING, & ZIJLEMA, 2008. *Non-hydrostatic 3D free surface layer-structured finite volume model for short wave propagation* m, 382–410. doi:10.1002/flid

COLE, & WELLS, 2008. *CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model. Version 3.6 User Manual, Version 3*. ed. Water Quality Group - Portland State University, Portland.

DAKE, & HARLEMAN, 1969. *Thermal Stratification in Lakes: Analytical Studies*. Water Resour. Res. 5, 484–495.

FRAGA, CEA, PEÑA, & DAVIDSON, 2012. *Comparison between standard and non-linear k-ε turbulence models for three-dimensional simulation of turbulent flow in a meandering open channel*.

GOEL, 2006. *Water Pollution - Causes, Effects and Control*. New Age International, New Delhi.

GOLDMAN, & CARTER, 1965. *An investigation by rapid carbon-14 bioassay of factors affecting the cultural eutrophication of lake Tahoe, California-Nevada*. J. Water Pollut. Control Fed. 1044.

HINRICHS, & KLEINBACH, 2001. *Energy: Its Use and the Environment*, 3rd editio. ed. Brooks/Cole Publishing Company, Monterey, CA.

HODGES, 1998. *Heat Budget and Thermodynamics at a Free Surface: Some Theory and Numerical Implementation*. Univ. West. Aust. 1–14.

HODGES, & DALLIMORE, 2010. *Estuary, Lake and Coastal Ocean Model: ELCOM v2 . 2 User Manual*, Water Research.

MANUAL, 2003. *The CWR Dynamic Reservoir Simulation Model DYRESM User Manual DYRESM User Manual Contents*.

NILS, & OLSEN, 2000. *CFD Algorithms for Hydraulic Engineering*.

OLSEN, NILS, & OLSEN, 2000. *CFD Algorithms for Hydraulic Engineering*, Notes. Department of Hydraulic and Environmental Engineering.

PRATS, 2011. *El règim tèrmic del tram inferior de l'Ebre i les seues alteracions*. Universitat Politècnica de Catalunya.

PRATS, RAMOS, & DOLZ, 2011. *Comparison of Models for Calculation of Diel Sediment-Water Heat Flux from Water Temperatures*. J. Hydraul. Eng. 137, 1135–1147.

VERSTEEG, & MALALASEKERA, 2007. *An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, 2nd Editio. ed. Pearson Education Limited.

Capítulo 8 CONCLUSIONES

8.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo fundamental de esta tesis era estudiar **la evolución hidrodinámica de embalses, con especial énfasis en el comportamiento térmico de los mismos en función de las características meteorológicas y de los flujos de entrada/salida.**

Dicho objetivo básico se ha desarrollado a partir de los siguientes sub-objetivos:

1. Diseño e implementación de redes de **instrumentación** para la toma de medidas de campo en los embalses de Ribarroja de Ebro y Sau (Capítulo 4).
2. Análisis de las series de datos registradas con el fin de **describir el funcionamiento hidrodinámico de los embalses** de estudio (Capítulo 5).
3. **Descripción del comportamiento hidrodinámico y térmico** de los embalses de Ribarroja de Ebro y Sau mediante el estudio y análisis de datos de campo (Capítulo 5).
4. **Modelización numérica en 2D** mediante CE-QUAL-W2 de los procesos de estratificación y mezcla de los embalses (Capítulo 6). Ello permite evaluar las distintas propiedades que caracterizan los dos casos de estudio.
5. **Modelización numérica en 3D**, programación e implementación de las ecuaciones de fuentes de calor a un modelo numérico tridimensional en volúmenes finitos existente. Desarrollo de un modelo numérico capaz de predecir el comportamiento

térmico de un embalse en las tres dimensiones del espacio, en función de las entradas/salidas de caudales y de la información meteorológica (Capítulo 7).

8.2 CONCLUSIONES GENERALES

Las conclusiones parciales de esta tesis se han ido exponiendo al final de cada capítulo. En esta sección se resumen las principales conclusiones de todos ellos.

8.2.1 Casos de estudio

Es interesante comparar el funcionamiento diferenciado de dos casos de estudio, los embalses de Ribarroja de Ebro (Caso 1) y el de Sau (Caso 2) en el río Ter. Ambos comparten características pero también difieren en otros aspectos:

- **Morfología del vaso:** Mientras que el embalse de Ribarroja es largo y estrecho (30 km de largo por 200 m de ancho) frente al embalse de Sau que tiene un ancho más variable (es más estrecho en el tramo superior y se ensancha en las proximidades de la presa). La profundidad máxima también es diferente, siendo aproximadamente el doble en Sau (70 m aproximadamente) que en Ribarroja (no llega a 34 m), y afecta en la estabilidad de la estratificación.
- **Hidrología:** El embalse de Ribarroja tiene dos caudales de entrada muy diferenciados – los ríos Ebro y Segre - de características singulares (temperatura y sedimento) y variables a lo largo del año (complicando la hidrodinámica de la zona de la cola) mientras que en Sau el aporte principal es el río Ter. Aunque ambos embalses siguen el comportamiento mediterráneo Sau se encuentra en una zona más montañosa y a más altitud que el embalse de Ribarroja. Sau no tiene ningún embalse aguas arriba y en cambio el Ebro se encuentra altamente regulado, inmediatamente aguas arriba del embalse de Ribarroja se encuentra el embalse de Mequinenza.
- **Transporte de sedimentos:** aporte importante de sedimentos en suspensión en el caso de Ribarroja (por el Segre) mientras que en el caso de Sau no es una problemática relevante.

- **Variaciones importantes de nivel** en Sau frente a la regularidad de los niveles en el embalse de Ribarroja.
- **Funcionamiento de la presa:** Cotas de extracción variables en el caso de la presa de Sau (el agua se puede extraer por tres puntos diferentes en la vertical) versus cota única de toma en Ribarroja. Ambas pueden desaguar excepcionalmente por el aliviadero.
- Las **necesidades de abastecimiento** también pueden diferir entre los dos embalses de estudio, en función de la operación por parte de la empresa de gestión y debido a la demanda.
- **Especies invasoras:** entre otras, se destaca la importancia y la afectación de la presencia del mejillón cebra (*Dreissena Polymorpha*) en el embalse de Ribarroja y sus proximidades. En el embalse de Sau no se ha detectado la presencia del molusco en cuestión.

8.2.2 Instrumentación y trabajo de campo

Se ha presentado el diseño de campañas de instrumentación para medir el comportamiento térmico de los embalses de Ribarroja (Caso 1) y Sau (Caso 2). A partir de ellas se destaca que:

- La instrumentación de campo es necesaria para:
 - Conocer el embalse de estudio, sus patrones hidrodinámicos y su comportamiento térmico.
 - Calibrar y validar modelos numéricos del embalse.
 - Utilización de los datos como input de los modelos numéricos.
- Los datos de campo (caudales, temperatura del agua e varios puntos del embalse, meteorología y evolución de la cota) proporcionan mucha información a la hora de definir los periodos concretos de estratificación y mezcla del embalse además de los patrones de circulación a lo largo del tiempo.

- Es altamente recomendable disponer de una estación meteorológica in situ, a poder ser en una plataforma flotante en el propio embalse o en las proximidades del mismo. Los datos meteorológicos pueden variar mucho en el espacio, y la humedad y la radiación solar en la superficie del agua del embalse tienen un comportamiento diferente al de estaciones situadas en tierra.
- Es importante colocar la instrumentación en puntos característicos del embalse, que sigan patrones de circulación y orientación que puedan utilizarse de manera lo más general posible a la hora de definir el embalse o el tramo de estudio.
- La mayor complejidad de las campañas de instrumentación es el difícil acceso a los puntos de medida, habitualmente en barca, además de la dificultad de trabajar con instrumentos electrónicos sumergidos o muy cercanos a la superficie del agua. Adicionalmente la poca cobertura telefónica de las zonas de estudio puede impedir en algunos casos la comunicación remota.

8.2.3 Hidrodinámica de los casos de estudio

El análisis descriptivo de la información de campo obtenida en las campañas ha permitido caracterizar la evolución hidrodinámica de los embalses de Ribarroja de Ebro y Sau. En el Capítulo 5 de esta tesis se ha realizado un análisis de los datos de caudales, cota de embalse, parámetros meteorológicos, temperatura del agua y velocidades del agua (solamente en el caso de Ribarroja de Ebro).

Las principales conclusiones generales obtenidas se enumeran a continuación:

- Los fenómenos meteorológicos, concretamente los efectos de la radiación y de la temperatura del aire, afectan directamente a la temperatura del agua, especialmente la temperatura superficial.
- El efecto de la respuesta térmica a los eventos meteorológicos es inmediato en la capa superficial mientras que para capas inferiores presenta cierto retraso debido a la inercia térmica del agua.
- Correlación directa entre la temperatura del aire y la temperatura del agua del río entrante al embalse a no ser que esté regulado en las proximidades aguas arriba.

- Se observa una correlación directa entre los picos de caudal y las modificaciones de la temperatura en la columna de agua. Especialmente cuando el agua que entra es considerablemente más fría que la del embalse.
- A partir del análisis de los efectos de los picos de caudal en los perfiles de temperatura de varios puntos del embalse se puede inferir el tiempo que ha tardado este transitorio en ir de un punto a otro.
- A principios de otoño, cuando la estratificación es más débil, basta con un pequeño evento de pico de caudal para desestabilizar la estratificación y mezclar el embalse.

8.2.3.1 Caso 1: Embalse de Ribarroja (río Ebro)

En este apartado se citan las conclusiones concretas para el embalse de Ribarroja de Ebro.

Estudiando los datos de campo de los años 2009 y 2010 se ha visto que la evolución térmica e hidrodinámica difiere. Las principales conclusiones del estudio son:

- Los años 2009 y 2010 presentan diferencias importantes en el comportamiento hidrodinámico; éstas son debidas a las condiciones meteorológicas y régimen de caudales de la zona durante el periodo de estudio.
- El año 2010 presenta una avenida importante en primavera que rompe totalmente la termoclina y se generan dos episodios de estratificación en un mismo año.
- La rotura de la termoclina se da alrededor de los días julianos 250-270, cuando la estratificación se ha debilitado. Depende de las condiciones meteorológicas y de las avenidas que tienen lugar.

En cuanto al régimen de velocidades horizontales en el embalse (proximidades de la presa de Ribarroja):

- En verano el agua situada en las capas superficiales se mueve poco, cuando la estratificación es estable las velocidades horizontales de los 10 metros superficiales son del orden de los 2 cm/s mientras que a mayores profundidades

son de hasta 8-10 cm/s con algunos picos de 15 cm/s puntualmente (coincidiendo con picos de caudal).

- En el año 2010 se destacan las velocidades importantes que tienen lugar en el periodo 145-205, que se correlacionan directamente con los picos de caudal producidos por la avenida, según la temperatura del agua de entrada se observa que la circulación es inicialmente superficial (procedente del Segre) y luego profunda (agua más fría y procedente de la presa de Mequinzenza).
- De acuerdo con los datos de caudal, el verano de 2010 es más estable y tranquilo que el de 2009 que tiene algunos picos de caudal. En 2009 los eventos de caudales en verano con el embalse estratificado originan pequeños picos de velocidad del orden de los 10-12 cm/s situados a profundidades de 20 m. Esto es debido a que los picos proceden del Ebro y al tener baja temperatura el agua se posiciona por densidad en las capas inferiores.
- En otoño de 2009 y de 2010 no se aprecian avenidas importantes que afecten la estabilidad del embalse, las velocidades son del orden de los 6 cm/s en toda la columna a partir del día 250 aproximadamente. Se observan el pico del día 265 en el año 2009 y el pico del día 272 en el 2010, hechos que influyen en la mezcla y la rotura de la termoclina ya debilitada.

Patrones de circulación:

- Durante la primavera y el verano se puede observar la tendencia del río Ebro a circular por la parte más profunda en función de su temperatura y densidad, por lo que los aportes de caudal se realizan al hipolimnion. En otoño, esta tendencia cambia y los aportes de caudal del río Ebro afectan a toda la columna de agua, favoreciendo la mezcla del embalse. Las entradas procedentes del río Segre circularían por las zonas más profundas en primavera y en otoño, pero se posicionarían más superficialmente en verano, siguiendo la evolución térmica del epilimnion.
- El agua de entrada por el río Ebro es más fría que la del río Segre hasta aproximadamente el día 250. A partir de esta fecha el comportamiento se invierte, es decir, el agua del río Segre es más caliente que la del río Ebro; esto influye tanto

en la rotura de la termoclina como en la estratificación “inversa” débil que se puede apreciar al final del periodo de estudio.

También se ha estudiado la tendencia observada en el avance de los transitorios y se concluye que:

- Para caudales inferiores a los 80 m³/s el frente de onda tarda unos 3 días en llegar a la boya situada en Almatret y unos 2 días más en llegar a la plataforma, sumando unos 5 días de tránsito entre la entrada y la salida por la presa.
- Para caudales superiores a los 80 m³/s el tiempo de circulación se reduce y el tiempo que tarda en llegar a la boya se encuentra entre 0.5 y 1 día; de la misma manera tarda entre 2 y 3 días en llegar a la plataforma multiparamétrica Flumen.
- Para los picos de caudal muestreados en el año 2010, superiores a los 350 m³/s, no se sigue la misma pauta y se puede observar una irregularidad en las tendencias generales. Esto es debido a efectos de la gestión y operación tanto de Ribarroja como de Mequinenza.
- También se ha notado que la respuesta de embalse de Ribarroja frente a los picos de caudal no depende únicamente de la magnitud de dicho caudal sino también de cómo se encuentre de estratificado el embalse.

8.2.3.2 Caso 2: Embalse de Sau (río Ter)

En este apartado se citan las conclusiones concretas obtenidas analizando los datos de campo medidos en el embalse de Sau en 2011:

- Se puede apreciar que el inicio de la estratificación se produce entre los días 75 y 95, cuando la estratificación empieza a ser significativa.
- Después de un descenso significativo de la temperatura entre los días 100 y 125 (retrasa el proceso de calentamiento) se puede considerar que el embalse se encuentra plenamente estratificado a partir del día 125.
- Los aumentos y disminuciones de temperatura superficial del epilimnion responden mayoritariamente a la evolución meteorológica.

- La máxima temperatura, entre 24 °C y 25 °C, se alcanza en profundidades inferiores a 10 m. Por el contrario la temperatura mínima, 6.5 a 7 °C, se mantiene a lo largo de todo el periodo de estudio en las zonas profundas del embalse por debajo de los 30 m.
- Al final del periodo de estudio no se llega a alcanzar la total rotura de la termoclina. Esto se debe a un final de septiembre de 2011 bastante caluroso. Según los datos proporcionados el Departamento de Ecología de la UB, en 2011 se puede apreciar una mezcla vertical a principios de noviembre.

8.2.4 Modelización numérica bidimensional

CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008) es una herramienta de clara utilidad para estudiar el comportamiento hidrodinámico y térmico de los embalses. Permite establecer la evolución del estado térmico del embalse a partir de las variables meteorológicas y caudales de entrada.

En este apartado se resumen las principales conclusiones obtenidas en la aplicación del modelo en general y para cada caso de estudio.

- Se puede concluir que la modelización numérica bidimensional permite analizar de forma precisa el comportamiento hidrodinámico y térmico de los casos 1 y 2, correspondientes a los embalses de Ribarroja y Sau con la excepción de la cola de Ribarroja.
- Es necesario realizar simulaciones iterativas modificando parámetros del modelo CE-QUAL-W2 hasta llegar a obtener el modelo que representa la evolución de los embalses.
- Las limitaciones más importantes del modelo CE-QUAL-W2 son la calidad y la cantidad de los datos de entrada.
- Otra de las limitaciones es la discretización de la escala temporal, se recomienda hacer estudios con datos de entrada con menor rango horario. En este estudio se han realizado simulaciones con medias diarias.

8.2.4.1 Caso 1: Embalse de Ribarroja (río Ebro)

En este apartado se citan las conclusiones concretas para el embalse de Ribarroja de Ebro.

Estudiando las simulaciones mediante CE-QUAL-W2 correspondientes a los años 2009 y 2010 se ha visto que:

- El modelo CE-QUAL-W2 simula correctamente los procesos de calentamiento, y estratificación del embalse y la consecuente circulación del río Ebro por el fondo.
- Las mayores diferencias entre datos medidos y el modelo se concentran en la zona de la termoclina y se debe al gradiente importante de temperatura que hay en muy pocos metros.
- El modelo de Ribarroja muestra algunas dificultades para capturar el día exacto de rotura de la termoclina.
- El efecto del perfil vertical de temperaturas es importante para definir el estado inicial del embalse, por lo que es importante utilizar el estado correspondiente al momento de inicio de la simulación tal y como se realizó en este estudio.
- Comparando los resultados de CE-QUAL-W2 para la calibración con el año 2009 y la validación con 2010, se ha observado que:
 - El año 2010 empleado en la etapa de validación, este es un año con condiciones considerablemente diferentes al año 2009 y diferentes a las comunes que se presentan en el embalse de Ribarroja de Ebro. Aun así, el modelo CE-QUAL-W2 es capaz de modelizar los resultados con suficiente precisión, especialmente en cuanto a las temperaturas superficiales, intervalos de tiempo así como los procesos de estratificación y mezcla.
 - Curiosamente, los resultados de la validación (2010) han sido mejores que los de la calibración (2009). Esto puede ser debido a la importancia del efecto de los caudales de entrada en el año 2010, poniendo de manifiesto que el modelo CE-QUAL-W2 depende más de los caudales que no de la meteorología.

En cuanto a la representación de la hidrodinámica y la evolución térmica del embalse se han definido dos grandes bloques, el superficial y el profundo.

En cuanto al epilimnion se ha observado que:

- El modelo CE-QUAL-W2 es más sensible a los cambios meteorológicos que el propio embalse de Ribarroja, es decir, los cambios en la meteorología, especialmente radiación solar y efectos del viento, se notan más en los resultados del modelo que en los datos de campo.
- CE-QUAL-W2 simula correctamente el efecto de la meteorología en la gran masa de agua, aunque en cada caso de estudio se tienen que ajustar algunos parámetros hasta llegar a obtener resultados óptimos. Los datos que más influyen en las simulaciones son la radiación y la temperatura del aire.
- El hecho de suavizar los picos, se debe al empleo de datos de campo promediados diariamente, en cambio, la discretización del dominio de cálculo mediante el modelo CE-QUAL-W2, puede aumentar dicho efecto aún más.

En cuanto a la evolución térmica en profundidad se ha observado lo siguiente:

- Las temperaturas que se presentan en profundidad se pueden ver afectadas por las condiciones iniciales empleadas. En este estudio se utilizó la media semanal 1998-1999 y podría afectar a la temperatura del Ebro en profundidad.
- En algunos picos de caudal, los resultados obtenidos con el modelo CE-QUAL-W2, presentan cierto retraso comparado con la llegada del pico a la boya o a la plataforma, esta diferencia, que suele ser de un día, corresponde al intervalo de tiempo de los resultados, por lo que puede ser aceptable en la simulación.
- El modelo simula correctamente la forma del perfil de temperaturas aunque en algunos periodos (días 155-170 o 255-295) las temperaturas simuladas quedan entre uno y dos grados por debajo de las medidas en campo.
- El modelo CE-QUAL-W2 no es capaz de simular correctamente el fenómeno de estratificación inversa débil que tiene lugar al final del periodo de estudio.

- En el caso de una gran masa de agua como Ribarroja de Ebro, el efecto de la temperatura del sedimento de fondo no es importante, puesto que se puede considerar que tiene la misma temperatura que el agua.
- La zona de la cola del embalse de Ribarroja (confluencia Ebro-Segre) tiene un funcionamiento marcadamente tridimensional que no se puede simplificar mediante modelos 2D.

El modelo numérico ha permitido obtener los perfiles longitudinales del vector de velocidades en la dirección del segmento, además del tiempo de permanencia del agua en el embalse; dos datos muy útiles para conocer el funcionamiento hidrodinámico y el tiempo de residencia del agua.

- En las capas superficiales, por encima de la termoclina, el tiempo de residencia va aumentando progresivamente debido al efecto de tapón que separa los dos estratos de agua. En las capas inferiores tiene lugar la circulación principal de los caudales.
- A partir del día 255 y debido a la disminución de gradiente térmico y a la consiguiente mezcla del embalse, los tiempos de residencia disminuyen considerablemente, especialmente ayudados por los picos de caudal, hasta estabilizarse entre 2 y 4 días en la boya y entre 4 y 6 días en la zona de la plataforma.
- El tiempo de residencia depende de tres factores importantes: lo estratificado que se encuentre el embalse, especialmente para capas superficiales, la magnitud de caudal circulante y el avance del frente de onda.

8.2.4.2 Caso 2: Embalse de Sau (río Ter)

Del estudio en modelo numérico de la hidrodinámica del embalse de Sau se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Se ha puesto a punto un modelo numérico bidimensional mediante CE-QUAL-W2 del embalse de Sau, que permite la simulación de la evolución térmica del mismo en las dimensiones longitudinal y vertical.

- La modelización numérica mediante CE-QUAL-W2 es sensible a las cotas de extracción del agua. Condiciona notablemente la circulación del agua del embalse así como la profundidad de la posición de la termoclina.
 - Cuanto más profunda es la cota de extracción, a mayor profundidad se encuentra la termoclina y por lo tanto, más caliente está la masa de agua en el entorno de la zona de extracción.
 - La profundidad a la que se extrae el agua es uno de los factores que tiene más relevancia en la estructura térmica del embalse, a la vez que es una de las herramientas para la gestión del embalse, lo que remarca aún más su importancia.
- En Sau se observan estratificaciones con una doble termoclina, y se ha constatado que el modelo CE-QUE-W2 no permite un buen ajuste de estos comportamientos. Sin embargo, la simulación de las temperaturas en superficie y en profundidad es aceptable, así como también la evolución del proceso de estratificación del embalse.
- Del análisis de los perfiles longitudinales de la evolución térmica del embalse de Sau, se destaca su comportamiento unidimensional, que sólo se ve alterado en función de la cota de la toma de agua en las proximidades de la presa o cuando se produce algún episodio de avenida.

8.2.5 Modelización numérica tridimensional

Se puede considerar que el embalse de Ribarroja de Ebro funciona de manera 2D excepto en su tramo de cola porque se trata de un embalse largo y estrecho con pocas variaciones en el ancho. Para estudiar la zona de la cola del embalse, donde confluyen los ríos Ebro y Segre se ha puesto a punto el modelo tridimensional de la zona de la confluencia mediante FreeFlow 3D en el que fue necesario desarrollar un módulo de balance térmico superficial. Las principales conclusiones obtenidas en este estudio son las siguientes:

- Se ha implementado satisfactoriamente un nuevo módulo de balance térmico superficial al modelo FreeFlow (Cea *et al.*, 2008) permitiendo el cálculo del balance térmico superficial en función de las variables meteorológicas.

- En esta primera versión del módulo de balance térmico superficial se han introducido dos grupos de ecuaciones: las que utiliza el modelo numérico CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008) y las propuestas por Prats en el Capítulo 9 de su tesis doctoral (Prats, 2011).
- El modelo FreeFlow con el módulo de balance térmico superficial simula correctamente la estratificación térmica y calcula el balance térmico superficial en la capa superior de la malla. Es capaz de simular correctamente el calentamiento y enfriamiento superficial de masas de agua durante periodos de tiempo largos.
- Se han validado las capacidades del modelo con datos de laboratorio (depósito exterior, apartado 7.4.1) y datos de campo (Lago Tahoe, apartado 7.4.2) antes de aplicarlo a la confluencia Ebro-Segre (dos días diferentes, apartados 7.5.2 y 7.5.3).
- Se han realizado dos simulaciones de la confluencia Ebro-Segre correspondientes a los días 31-03-2011 y al 11-10-11 que se han podido comparar con muestreos de temperatura en campo (perfiles e imágenes térmicas superficiales) que también aportan credibilidad y veracidad a las capacidades del modelo.
- Después de las validaciones se ha podido estudiar la evolución térmica diaria de la confluencia Ebro-Segre, obteniendo la distribución 3D de temperaturas del agua y velocidades en x-y-z.
- Posteriormente se ha podido aplicar el modelo a otros casos de estudio como por ejemplo el estudio de la evolución térmica del agua en un tramo de río vinculado a la refrigeración de una central térmica.

Las principales limitaciones del modelo FreeFlow y del módulo que calcula el balance superficial son las siguientes:

- Las limitaciones de las simulaciones con el modelo FreeFlow son el número y el tamaño de los elementos de la malla, puesto que influyen en el tiempo de cálculo.
- No se considera el balance térmico ni transferencia de calor con el fondo ni las laderas del embalse. El hecho de no tener en cuenta la transferencia de calor por las paredes o por el fondo no afecta a los resultados aplicados a grandes masas de agua puesto que no hay mucha diferencia de temperaturas entre el agua y el sedimento. Esto permite

aplicar el modelo FreeFlow con el módulo de balance térmico superficial en lagos y embalses profundos sin necesidad de incluir el balance térmico con el sedimento del fondo.

- El hecho de poner el resultado del balance térmico superficial en todo el grosor de la capa superficial provoca una serie de limitaciones que afectan a los resultados del modelo:
 - Grosor de capa variable, aunque el incremento térmico se pone en todo el elemento el balance depende del área superficial del elemento. Las capas más gruesas tienen 1.5 m de grosor mientras que las más delgadas son de 0.20 m aproximadamente.
 - El perfil de temperaturas superficial se suaviza en la capa superior.
 - Es difícil comparar los resultados del módulo de balance térmico superficial en todo el grosor de capa con las mediciones de radiancia de los vuelos del ICC puesto que estos dan información sobre los milímetros superficiales. Con la malla del modelo de la confluencia algunos elementos superficiales tienen grosores de 0.20 m hasta 1.5 m.

8.2.5.1 Confluencia Ebro-Segre

Las conclusiones obtenidas a partir del estudio concreto de la confluencia Ebro-Segre son las siguientes:

- Se ha podido obtener la evolución térmica diaria de la zona de la confluencia Ebro-Segre, mostrando patrones de calentamiento y enfriamiento en función de las variables meteorológicas.
- Los caudales relativos entre Ebro y Segre así como las respectivas temperaturas del agua son totalmente condicionantes de la situación y la posición del contacto entre los dos ríos así como su desarrollo posterior.
- El modelo FreeFlow con el módulo de balance térmico superficial tiende a suavizar los perfiles de temperatura en las capas del epilimnion, esto se debe a que la

introducción del término fuente de temperatura se hace para toda la capa superficial por lo que el calor se reparte en todo el volumen.

- El hecho de no tener en cuenta la transferencia de calor por las paredes o por el fondo no afecta a los resultados de la zona del Ebro pero sí puede influenciar en el calentamiento de las laderas del tramo final del río Segre, puesto que los calados son pequeños.
- Se ha considerado un régimen de caudales de entrada medios diarios y temperaturas del agua medias diarias constantes, además de una repetición de 10 días con las condiciones meteorológicas correspondientes. Estas condiciones de contorno son críticas a la hora de estudiar la posición y la evolución del contacto Ebro-Segre así como su desarrollo posterior.
- En la zona correspondiente al ensanchamiento del río, a unos 2 kilómetros de la confluencia Ebro-Segre se han observado temperaturas superficiales altas mediante el sensor TASI mientras que con el modelo se ha infravalorado del orden de 4 °C.

8.3 POSIBLES APLICACIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Las aportaciones de esta tesis pueden ser útiles en futuros casos de estudio. No solamente se puede aplicar a los embalses estudiados (Sau y Ribarroja) sino que la metodología y los resultados se pueden aplicar a otros embalses con características similares a los estudiados.

Instrumentación: la experiencia permitirá diseñar y aplicar la metodología seguida a otros estudios de la temperatura e hidrodinámica de embalses. La metodología se puede aplicar a los mismos embalses o a embalses con características similares a los estudiados.

Batimetría: Disponer de una batimetría de calidad es importante a la hora de realizar la cubicación del embalse y también para calcular el volumen de agua almacenado. A la hora de preparar mallas para las simulaciones 2D y en especial 3D cuánto más detalle tenga la batimetría mejor.

CE-QUAL-W2: El modelo CE-QUAL-W2 es ampliamente conocido y utilizado alrededor del mundo. Es capaz de capturar la estratificación térmica de embalses en función de las características meteorológicas e hidrológicas de los mismos. Funciona correctamente en casos de embalses largos y estrechos con pocas variaciones en el ancho.

En esta tesis se ha diseñado una metodología de aplicación del modelo CE-QUAL-W2 a los casos de estudio, se han analizado los efectos de algunas de las variables del modelo mediante análisis de sensibilidad y se han estudiado las capacidades de simulación en periodos de estratificación y mezcla de los embalses de estudio.

FreeFlow 3D: Se ha testado y aplicado el modelo FreeFlow al que se le ha añadido un módulo de balance térmico superficial que calcula el balance térmico superficial en función de las condiciones meteorológicas. El modelo simula correctamente la hidrodinámica y la evolución térmica del agua así como los efectos de la entrada y salida de caudal por la margen izquierda del río.

El FreeFlow con el módulo de balance térmico superficial se puede aplicar a casos de estudio de la hidrodinámica y la temperatura en tres dimensiones en los que el balance térmico superficial sea importante a la hora de calcular el comportamiento térmico de la zona de estudio.

8.4 FUTUROS TRABAJOS

En este apartado se listan algunas ideas de futuros trabajos que se pueden llevar a cabo a partir de la investigación iniciada en esta tesis.

8.4.1 Modelación numérica bidimensional

Se espera que la próxima versión de CE-QUAL-W2 (probablemente se publique en verano de 2015) permita modelizar el transporte de sedimentos en suspensión así como los efectos de la erosión y deposición. Sería interesante poder estudiar la evolución de los embalses activando esta variable y ver de qué manera afecta a los resultados hidrodinámicos.

También sería muy interesante estudiar el comportamiento de otras variables de calidad del agua relacionadas con la hidrodinámica y la evolución térmica de los embalses estudiados. El modelo CE-QUAL-W2 permite estudiar evoluciones de variables como: oxígeno disuelto, conductividad, macrófitos, materia orgánica disuelta,... entre muchos otros. Estos parámetros de calidad del agua pueden ser de interés en cuanto a la gestión de los embalses de estudio.

8.4.2 Modelización numérica tridimensional

Dentro de los futuros desarrollos que se deberían aplicar al modelo FreeFlow se destacan:

- Simulaciones con **lámina libre**. Por el momento el modelo funciona con tapa superficial rígida haciendo que los cálculos sean más rápidos pero sin posibilidad de contemplar variaciones de nivel. Para embalses con variaciones de nivel considerables, esto podría representar una limitación, por lo que se sugiere implementar la posibilidad de considerar la superficie libre variable en el tiempo.
- Sería interesante optimizar el código con tal de poder realizar simulaciones con mallas más finas, especialmente en la vertical.
- El módulo de balance térmico superficial sigue en desarrollo, las formulaciones de las ecuaciones de intercambio de calor superficial dependen de la zona de estudio. En un futuro se pueden introducir otras formulaciones y así permitir al usuario elegir entre más posibilidades y no únicamente las de CE-QUAL-W2 o las sugeridas por Prats. También se puede refinar el módulo introduciendo parámetros que tengan en cuenta los efectos de la sombra topográfica o el coeficiente de protección del viento por zonas o elementos.
- El resultado del balance superficial se suma al elemento de la capa superficial y afecta al grosor de toda la capa. Sería interesante que modificar el código para implementar el incremento únicamente en el plano superficial y no en todo el grosor de la capa.
- También sería interesante introducir las ecuaciones de intercambio de calor entre el sustrato y la masa de agua en el modelo.

En el caso concreto de las simulaciones realizadas en la confluencia de los ríos Ebro y Segre se recomienda realizar más estudios teniendo en cuenta:

- **Malla más fina** en las capas superficiales. Uno de los factores más limitantes a la hora de realizar las simulaciones es el número de elementos. La malla utilizada para este estudio tiene 26080 elementos y 10 capas de grosor variable en la vertical. Sería interesante discretizar de manera más detallada en la vertical.
- Realizar simulaciones **variables en el tiempo**. Los casos de estudio se ha estudiado régimen permanente con caudales medios diarios y temperaturas de entrada constantes. Sería interesante simular las condiciones reales de turbinado por parte de la presa de Mequinenza y los caudales del Segre así como las temperaturas que les correspondan y sus variaciones diarias.
- Tener en cuenta las concentraciones y los **aportes de sedimento del río Segre** al embalse de Ribarroja. La concentración de sólidos en suspensión también afecta al movimiento y a la densidad del agua, por lo que sería interesante realizar simulaciones teniendo en cuenta esta variable.

8.5 RECOMENDACIONES

Hay varios aspectos que en esta tesis no se han podido estudiar con detalle o con mayor profundidad por lo que podrían dar lugar a futuras líneas de investigación:

- A partir de la experiencia obtenida en el presente estudio, se considera que para realizar una primera simulación de un embalse mediante CE-QUAL-W2, es imprescindible calibrar el modelo mediante un proceso iterativo. Para realizar la calibración es imprescindible disponer de información de campo. Esta puede reducirse a: disponer de una estación meteorológica en las proximidades (y a poder ser in situ, análoga a la plataforma Flumen), disponer de los caudales de entrada y salida (escala diaria o inferior), las temperaturas del agua relativas a estos caudales, el caudal y la cota de extracción en la salida (escala diaria o inferior) y perfil/es de temperatura (de la manera más detallada posible) y tan seguidos en el tiempo como sea posible.

- Sería de interés estudiar la evolución y los efectos de la dinámica sedimentaria de los embalses estudiados en 2D y en 3D así como los efectos que tiene en la hidrodinámica y la evolución térmica de los casos de estudio.
- Sería interesante estudiar la evolución térmica diaria en varios puntos de la confluencia con mayor detalle horario y en varios momentos del año (especialmente en verano). También se recomienda estudiar la evolución en función de la evolución diaria de los caudales turbinados en la presa de Mequinenza. Esto permitiría evaluar mejor las capacidades y las necesidades del modelo FreeFlow con el módulo de balance térmico superficial.
- Sería aconsejable ampliar los periodos de estudio con tal de caracterizar mejor los embalses, en especial el caso del embalse de Sau, puesto que hay mucha variabilidad interanual y los patrones pueden cambiar mucho de un año a otro.
- Se recomienda seguir monitoreando y estudiando la evolución térmica de los embalses.
- Aunque los modelos 2D y 3D que se están utilizando hoy en día ya han sido calibrados y validados permitiendo hacer predicciones se debe ir comprobando que predican correctamente y esto solamente se puede hacer comparando las simulaciones a posteriori con datos de campo.
- Es importante ubicar la instrumentación en los puntos más significativos del embalse, buscar zonas en que las condiciones meteorológicas o las direcciones del flujo sean lo más homogéneas posible y que concuerden con las características generales del embalse (orientación, topografía circundante...).
- Se debe tener en cuenta que el embalse de Ribarroja está estrechamente vinculado a los embalses de Mequinenza y Flix, mientras que Sau está afectando directamente al embalse de Susqueda. Como se comprobó en este estudio, las cotas de extracción de caudales en el embalse de Sau condicionan notablemente la temperatura de los caudales de salida y por lo tanto acabarán condicionando la hidrodinámica del embalse de Susqueda. Por este motivo se recomienda no estudiar el comportamiento de los embalses individualmente sino extender el

estudio al análisis numérico a los sistemas de embalses Sau-Susqueda y Mequinenza-Ribarroja-Flix.

8.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CEA, STELLING, & ZIJLEMA, 2008. *Non-hydrostatic 3D free surface layer-structured finite volume model for short wave propagation* m, 382–410. doi:10.1002/fld

COLE, & WELLS, 2008. *CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model. Version 3.6 User Manual, Version 3.* ed. Water Quality Group - Portland State University, Portland.

PRATS, 2011. *El règim tèrmic del tram inferior de l'Ebre i les seues alteracions.* Universitat Politècnica de Catalunya.