

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

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

**WARNING.** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX ([www.tesisenxarxa.net](http://www.tesisenxarxa.net)) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

# Gestión integral de obras hidráulicas de hormigón: del diagnóstico a la inversión

Tesis Doctoral realizada por:  
Francesc Pardo i Bosch

Dirigida por:  
Antonio Aguado de Cea

Barcelona, Agosto 2014

Universitat Politècnica de Catalunya  
Departament d'Enginyeria de la Construcció

TESIS DOCTORAL

*Als meus pares,  
Francesc i Dolors*

## Agradecimientos

Quisiera que pocas fueran las líneas que coparan este apartado para que no perdieran protagonismo, entre palabras, los nombres de las personas que han hecho posible este trabajo, aunque me temo que no voy a tener éxito ante la enorme gratitud que siento en estos momentos.

En primer lugar quisiera dar las gracias de manera muy especial al Dr. Antonio Aguado, mi director de tesis, por la confianza que ha depositado desde el primer día en mí, por la cantidad innumerable de cosas que me ha enseñado y por la paciencia que siempre ha tenido conmigo.

Quisiera aprovechar esta ocasión para agradecer el trato exquisito que he recibido de la gran familia que es el Departament d'Enginyeria de la Construcció de la UPC, empezando por los profesores, pasando por la administración y el personal del laboratorio, y acabando en los doctorandos, presente y futuro de la universidad. Quisiera hacer especial énfasis en la figura de Lluís Agulló, quien me brindó, junto con el Dr. Aguado, la posibilidad de hacer esta tesis doctoral. Aunque pasen muchos años, los que le conocimos y disfrutamos nunca le olvidaremos.

En el entorno de la universidad, también quisiera dar las gracias a todos los amigos de Smart Engineering, Antonio, Ana, Albert, Paco, Sergio, Pau y Nacho, por su ayuda y aliento.

En otro orden de cosas, quisiera agradecer a todas las personas y empresas que han posibilitado la realización de esta tesis con aportaciones diversas: facilitándonos documentación, dejándonos visitar sus instalaciones, con sus imprescindibles contribuciones personales, etc. En este sentido, quiero hacer mención especial a Endesa Generación, personificada en Felipe Río, Emilio Rosico y Pepe Conesa; Iberdrola Generación, personificada en Arturo Gil y Ana Belén Martín; la Agència Catalana del Aigua (ACA), personificada en Carlos Barbero; y a Axpo Holding AG, personificada en Bastian Otto, Marcel Lutz y Michel Cuska.

No puedo olvidarme tampoco del apoyo que he recibido de las instituciones, en concreto del Ministerio de Innovación y Ciencia del Gobierno de España, a través del proyecto BIA2010-20913-C02-02; de la Generalitat de Catalunya, a través de AGAUR; y del Col·legi d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Catalunya.

También quiero acordarme del cariño y apoyo que he recibido siempre del Col·legi Major Penyafort-Montserrat de la UB, y de forma particular de la directora, la Sra. Montserrat Lavado.

Voldria donar les gràcies també a tots els que han format i formen el meu entorn més proper, la família i els amics, perquè tots són partícips d'una manera o altra d'aquest treball, tot i que malauradament alguns d'ells no han pogut veure'n el resultat final. En l'àmbit familiar es mereix una menció molt especial la Miriam, per tot el que ha fet en aquest darrer període i per tot el que significa i espero significarà.

Finalment, vull donar les gràcies als meus pares, Francesc i Dolors, a qui dedico de tot cor aquest treball. Sense ells res del que he fet hagués estat possible. La seva dedicació, la seva entrega, les seves ensenyances i el seu amor han estat claus per a que jo hagi pogut recórrer el meu camí vital. Un camí que els darrers anys ha estat dedicat a aquesta tesi doctoral, per la qual tant em lluitat, i en la que tanta il·lusió hem evocat els tres. Il·lusió que es començà a gestar quan de ben petit el meu pare em va fer entendre què significa ser Doctor.

Reus, 9 de agosto de 2014



## Gestión integral de obras hidráulicas de hormigón: del diagnóstico a la inversión

Francesc Pardo i Bosch

Departament d'Enginyeria de la Construcció - ETSECCPB

Universitat Politècnica de Catalunya - Barcelona Tech

### Resumen

En esta tesis doctoral se abordan de forma conjunta dos aspectos primordiales en la gobernanza de obras hidráulicas que se encuentran en régimen de explotación: el diagnóstico de daños y la priorización de las inversiones que deben permitir la corrección de estos daños. El objetivo es dotar a los técnicos encargados del mantenimiento y conservación de estas estructuras de una serie de argumentos que les ayuden a tomar decisiones que garanticen a corto y a largo plazo una gestión sostenible de un patrimonio que es fundamental para el desarrollo de las sociedades.

En primera instancia se propone una metodología que permite dictaminar la primera hipótesis de diagnóstico cuando se detecta un daño en una estructura hidráulica. Solamente se puede plantear una actuación de mantenimiento si se conoce el origen del problema. Para ello se han estudiado al detalle los problemas existentes en diez presas, además de haber explorado en distintas visitas técnicas otras quince. Este bagaje conjuntamente con el apoyo de la literatura técnica de referencia ha permitido desarrollar a nivel teórico una sistemática de trabajo que conduce al técnico hasta el establecimiento del diagnóstico. Los trabajos que se deben realizar se dividen básicamente en tres grandes áreas: estudio de la historia "clínica" de la estructura, la inspección de campo y los primeros trabajos de gabinetes, todos ellos planteados desde un punto de vista claramente técnico, con una gran cantidad de ejemplos y documentación gráfica para reforzar su utilidad práctica y facilitar su implementación. La propuesta metodológica se ha validado con el diagnóstico de una presa, en la que a pesar de haberse realizado diversas actuaciones, no se ha conseguido detener el proceso patológico. La conclusión a la que se ha llegado, en este caso, es que el daño lo causa la hidratación diferida de la cal libre contenida en el cemento utilizado en la construcción, una hipótesis validada con los primeros trabajos de laboratorio.

En la segunda parte se desarrolla el *Índice de Priorización en la Gestión de Obras Hidráulicas* (IPGOH), un sistema de ayuda a la decisión multicriterio basado en los tres axiomas de las sostenibilidad (sociedad, medio ambiente y economía), articulados en un árbol de requerimientos inspirado en el método MIVES. El objetivo final es evaluar y priorizar las actuaciones de mantenimiento y conservación no homogéneas que cada año se pretenden realizar en distintas obras hidráulicas que se encuentran en régimen de explotación. El IPGOH es capaz de evaluar actuaciones heterogéneas porque la metodología desarrollada incluye una fase previa de homogeneización de daños, materializada con el cálculo del *Daño Estructural* (DñE). Esta fase, considerada una de las grandes aportaciones de la tesis, es la que permite que puedan compararse actuaciones previstas en zonas tan diversas como pueden ser el cuerpo de presa, los estribos, la cimentación, el vaso o los órganos afines a la instalación hidráulica.

En este caso también se ha validado la propuesta metodológica mediante su implementación práctica. Se han evaluado diecinueve actuaciones, doce pertenecientes a un ente privado y siete a un ente público. Los resultados han mostrado que la herramienta es capaz de establecer una ordenación de las actuaciones coherente y suficientemente discriminante como para que el decisor no tenga dudas cuando deba tomar la decisión.



## **Comprehensive management of concrete hydraulic infrastructures: from diagnosis to investment**

Francesc Pardo i Bosch

Department of Construction Engineering - ETSECCPB

Universitat Politècnica de Catalunya - Barcelona Tech

### **Abstract**

This doctoral thesis addresses jointly two paramount aspects in the management of the hydraulic structures in operating regime: the damage diagnosis and the investment prioritisation that should allow repairing such damages. The main objective is to provide the technicians responsible for the maintenance and preservation of these structures with a series of arguments to help them making decisions that ensure short and long-term sustainable management of a heritage that is fundamental for the development of societies.

Firstly, a methodology to dictate the first diagnostic hypothesis of a damaged hydraulic structure is proposed since the maintenance action can only be considered if the source of the problem is known. For that, a detailed analysis of ten dams with some type of damage was conducted. Furthermore, other fifteen dams were explored during technical visits. Based on the experience gained and previous studies in the literature, a theoretical systematic working approach was developed in order to allow the technician establishing a diagnosis. The tasks to be conducted are divided into three broad areas: the study of the “clinic” history of the structure, the field inspection and the early work of cabinets. All these tasks are performed from a technical point of view with a great variety of examples and graphic documentation with the aim of reinforcing their practical usefulness and easing the implementation. The methodology proposed has been validated with the diagnosis of a dam, which despite the several actions undertaken, the pathological process has not stopped. In such case, the conclusions indicate that the damage is caused by the delayed hydration of the free lime in the cement employed in the construction of the dam. This hypothesis was confirmed by the results obtained in the laboratory.

The second part of the thesis focuses on the development of the *Prioritization Index for the Management of Hydraulic Structures* (IPGOH). This is a system of multiple criteria decision aid based on the three axioms of sustainability (society, environment and economy) and it is articulated on a requirements tree inspired by the MIVES method. The final objective is to evaluate and prioritise the heterogeneous maintenance and preservation activities in several hydraulic structures on operating regime each year. The assessment of heterogeneous actions is possible given that the IPGOH includes a preliminary stage of homogenization of damage through the calculation of the *Structural Damage* (DñE). This stage represents one of the main contributions of this doctoral thesis because allows comparing planned actions as diverse as the dam body, the abutments, the foundation, the reservoir or aspects regarding the hydraulic system.

The validation of the IPGOH was conducted by means of the analysis of nineteen actions conducted on dams in operating regime. Among them, twelve actions correspond to private companies and the remaining seven belong to public bodies. The results obtained reveal that the tool is capable to establish a coherent order of the maintenance and preservations actions and it is discriminating enough to avoid any doubts on the decision-making.





## **Gestió integral d'obres hidràuliques de formigó: del diagnòstic a la inversió**

Francesc Pardo i Bosch

Departament d'Enginyeria de la Construcció - ETSECCPB

Universitat Politècnica de Catalunya - Barcelona Tech

### **Resum**

En aquesta tesi doctoral s'aborden de forma conjunta dos aspectes cabdals en la governabilitat de les obres hidràuliques que es troben en règim d'explotació: el diagnòstic de danys i la prioritització de les inversions que han de permetre la correcció d'aquests danys. L'objectiu és dotar als tècnics encarregats del manteniment i conservació d'aquestes estructures d'una sèrie d'arguments que els ajudin a prendre decisions que garanteixin a curt i a llarg termini una gestió sostenible d'un patrimoni que és fonamental per al desenvolupament de les societats.

En primera instància es proposa una metodologia que permet dictaminar la primera hipòtesi de diagnòstic quan es detecta un dany en una estructura hidràulica. Només es pot plantejar una actuació de manteniment si es coneix l'origen del problema. Per a això s'han estudiat al detall els problemes existents en deu preses, a més d'haver-ne explorat en diferents visites tècniques unes altres quinze. Aquest bagatge conjuntament amb el suport de la literatura tècnica de referència ha permès desenvolupar a nivell teòric una sistemàtica de treball que condueix al tècnic fins a l'establiment del diagnòstic. Els treballs que s'han de realitzar es divideixen bàsicament en tres grans àrees: estudi de la història "clínica" de l'estructura, la inspecció de camp i els primers treballs de gabinet, tots ells plantejats des d'un punt de vista clarament tècnic, amb una gran quantitat d'exemples i documentació gràfica per reforçar la seva utilitat pràctica i facilitar la seva implementació. La proposta metodològica s'ha validat amb el diagnòstic d'una presa, en què tot i haver-se realitzat diverses actuacions, no s'havia aconseguit aturar el procés patològic. La conclusió a què s'ha arribat, en aquest cas, és que el dany el causa la hidratació diferida de la calç lliure continguda en el ciment utilitzat en la construcció, una hipòtesi validada amb els primers treballs de laboratori.

A la segona part es desenvolupa l'*Índex de Priorització en la Gestió d'Obres Hidràuliques* (IPGOH), un sistema d'ajuda a la decisió multicriteri basat en els tres axiomes de les sostenibilitat (societat, medi ambient i economia), articulats en un arbre de requeriments inspirat en el mètode MIVES. L'objectiu final és avaluar i prioritzar les actuacions de manteniment i conservació no homogènies que cada any es pretenen realitzar en diferents obres hidràuliques que es troben en règim d'explotació. El IPGOH és capaç d'avaluar actuacions heterogènies perquè la metodologia desenvolupada inclou una fase prèvia d'homogeneïtzació de danys, materialitzada amb el càlcul del *Dany Estructural* (DñE). Aquesta fase, considerada una de les grans aportacions de la tesi, és la que permet que es puguin comparar actuacions previstes en zones tan diverses com poden ser el cos de presa, els estreps, la fonamentació, el vas o els òrgans afins a la instal·lació hidràulica.

En aquest cas també s'ha validat la proposta metodològica mitjançant la seva implementació pràctica. S'han avaluat dinou actuacions, dotze pertanyents a un ens privat i set a un ens públic. Els resultats han mostrat que l'eina és capaç d'establir una ordenació de les actuacions coherent i prou discriminant com perquè el decisor no tingui dubtes quan hagi de prendre la decisió.



## ÍNDICE GENERAL

### ***Bloque 1: Contextualización***

#### **Capítulo 1: Introducción**

1.1	Introducción .....	1
1.2	Razón de ser .....	4
1.3	Objetivos .....	6
1.3.1	Objetivos generales .....	6
1.3.2	Objetivos específicos .....	6
1.4	Metodología .....	7

#### **Capítulo 2: Estado del conocimiento**

2.1	Introducción .....	13
2.2	Las presa. Un patrimonio necesario .....	14
2.3	El estudio del daño en presa de hormigón.....	16
2.3.1	La aportación del ICOLD .....	16
2.3.2	Otros trabajos .....	19
2.3.3	Valoración del estudio de daños .....	22
2.4	Causas de daño en presas de hormigón .....	23
2.5	La priorización de actuaciones en el ámbito hidráulico .....	28
2.5.1	Índices de condición .....	28
2.5.2	Análisis de riesgos .....	33
2.5.3	Valoración de la priorización de actuaciones en el ámbito hidráulico .....	36
2.6	MIVES, un sistema de ayuda a la decisión.....	36

### ***Bloque 2: Metodología de diagnóstico***

#### **Capítulo 3: Diagnóstico del daño**

3.1	Introducción .....	41
3.2	Las bases del diagnóstico .....	43
3.3	Estudio de la historia “clínica” .....	45
3.3.1	Documentación histórica.....	45
3.3.2	Datos de auscultación .....	48
3.4	Inspección de campo .....	51
3.4.1	Estudio formaciones geológicas.....	52

	3.4.1.1	Cantera.....	52
	3.4.1.2	Estribos.....	54
3.4.2		Estructuras anejas.....	59
3.4.3		Cuerpo de presa.....	61
	3.4.3.1	Estudio del exterior de la presa.....	61
	3.4.3.2	Estudio del interior de la presa.....	66
3.4.4		Elementos móviles.....	68
3.4.5		Informe del examen físico.....	70
3.5		Trabajos de gabinete.....	70
	3.5.1	¿El comportamiento anómalo es generalizado o está localizado?.....	71
	3.5.2	Interpretación de los movimientos y predicción de su evolución.....	75
3.6		1ª Hipótesis de diagnóstico.....	77
	3.6.1	Etiología del daño y dictamen.....	77
	3.6.2	Modelo estructural simple.....	79
	3.6.3	Informe de diagnóstico.....	83

#### Capítulo 4: Contratación del modelo de diagnóstico: presa de Urrúnaga

4.1		Introducción.....	85
4.2		Estudio de la historia “clínica”.....	86
	4.2.1	Documentación histórica.....	86
		4.2.1.1 Datos generales.....	87
		4.2.1.2 Informes técnicos.....	89
		4.2.1.3 Actuaciones realizadas en la presa.....	89
	4.2.2	Datos de auscultación.....	90
		4.2.2.1 Evolución fisuras.....	90
		4.2.2.2 Movimientos de nivelación y colimación.....	91
4.3		Inspección de campo.....	93
	4.3.1	Estudio formaciones geológicas.....	94
		4.3.1.1 Cantera.....	94
		4.3.1.2 Estribos.....	94
	4.3.2	Estructuras anejas.....	95
	4.3.3	Cuerpo de presa.....	96
		4.3.3.1 Estudio del exterior de la presa.....	96
		4.3.3.2 Estudio del interior de la presa.....	98
	4.3.4	Elementos móviles.....	100
4.4.		Análisis de muestras.....	101
4.5		Trabajos de gabinete.....	103
	4.5.1	¿El comportamiento anómalo es generalizado o está localizado?.....	103
	4.5.2	Interpretación de los movimientos y predicción de su evolución.....	105
4.6		1ª Hipótesis de diagnóstico.....	107
	4.6.1	Etiología del daño y dictamen.....	107
	4.6.2	Estimación de la deformación volumétrica.....	110
	4.6.3	Modelo estructural.....	112
		4.6.3.1 Características del modelo.....	112
		4.6.3.2 Verificación de la hipótesis según el modelo presentado.....	114
	4.6.4	Conclusiones y recomendaciones.....	115
4.7		Ensayos de laboratorio.....	116
	4.7.1	Testigos de la cantera de Landa.....	116
	4.7.2	Testigos del cuerpo de presa.....	118
		4.7.2.1 Ensayos clásicos.....	118
		4.7.2.2 Ensayo complementario: tinción selectiva.....	120
4.8		Conclusiones.....	121

### Bloque 3: Metodología de priorización

#### Capítulo 5: Índice de Priorización en la Gestión de Obras Hidráulicas (IPGOH)

5.1	Introducción .....	123
5.2	Características de la decisión.....	124
5.2.1	Marco conceptual.....	125
5.2.2	Tipología de actuaciones a priorizar .....	126
5.2.3	La sostenibilidad como eje de la decisión .....	127
5.2.4	La decisión dividida en dos fases .....	128
5.3	Fase 1. Evaluación homogénea de daño.....	130
5.3.1	Grado de daño (GrD) .....	131
5.3.2	Ubicación del daño (UbD) .....	133
5.3.3	Extensión del daño (ExD).....	134
5.3.4	Evolución del daño (UbD) .....	135
5.3.5	Cuantificación del DñE (UbD).....	137
5.3.5.1	Cálculo de los coeficientes $\alpha$ $\beta$ $\mu$ $\nu$ .....	138
5.3.5.2	Análisis de sensibilidad.....	140
5.3.5.3	Fórmula final de cálculo del DñE .....	145
5.4	Fase 2. Índice de Priorización en la Gestión de Obras Hidráulicas (IPGOH) .....	145

#### Capítulo 6: Componentes del árbol de decisión

6.1	Introducción .....	151
6.2	Requerimiento social - R <sub>1</sub> .....	153
6.2.1	Personas físicas - C <sub>1</sub> .R <sub>1</sub> .....	154
6.2.1.1	Población Expuesta (PoE) - I <sub>1</sub> .C <sub>1</sub> .R <sub>1</sub> .....	154
6.2.1.2	Percepción Colectiva del Riesgo (PCR) - I <sub>2</sub> .C <sub>1</sub> .R <sub>1</sub> .....	158
6.2.2	Afecciones - C <sub>2</sub> .R <sub>1</sub> .....	163
6.2.2.1	Servicios Esenciales Afectados (SEA) - I <sub>1</sub> .C <sub>2</sub> .R <sub>1</sub> .....	163
6.2.2.2	Perjuicios Materiales y Económicos (PME) - I <sub>2</sub> .C <sub>2</sub> .R <sub>1</sub> .....	166
6.3	Requerimiento medio ambiental - R <sub>2</sub> .....	169
6.3.1	Impacto ambiental - C <sub>1</sub> .R <sub>2</sub> .....	169
6.3.1.1	Repercusión Negativa del Daño (RND) - I <sub>1</sub> .C <sub>1</sub> .R <sub>2</sub> .....	172
6.3.1.2	Valor Añadido de la Actuación (VAA) (PCR) - I <sub>2</sub> .C <sub>1</sub> .R <sub>2</sub> .....	174
6.4	Requerimiento económico - R <sub>3</sub> .....	176
6.4.1	Inversión inicial - C <sub>1</sub> .R <sub>3</sub> .....	176
6.4.1.1	Coste Anual Unitario (CUA) - I <sub>1</sub> .C <sub>1</sub> .R <sub>3</sub> .....	176
6.4.2	Retorno de la inversión - C <sub>2</sub> .R <sub>3</sub> .....	179
6.4.2.1	Ahorro Mantenimiento y Vigilancia (AMV) - I <sub>1</sub> .C <sub>2</sub> .R <sub>3</sub> .....	179
6.4.2.2	Incremento de Producción Estimado (IPE) - I <sub>2</sub> .C <sub>2</sub> .R <sub>3</sub> .....	182

#### Capítulo 7: Contrastación del modelo de decisión: priorización de actuaciones

7.1	Introducción .....	187
7.2	Asignación de pesos a los componentes del árbol .....	188
7.3	Actuaciones a priorizar .....	191
7.4	Evaluación y priorización de actuaciones de Endesa .....	194
7.4.1	Evaluación de un caso particular. Ejemplo de aplicación .....	194
7.4.1.1	Fase 1. Evaluación homogénea del daño .....	195
7.4.1.2	Fase 2. Índice de Priorización en la Gestión de Obras Hidráulicas .....	196
7.4.2	Evaluación conjunta y priorización de actuaciones de Endesa .....	200
7.4.3	Análisis de resultados .....	204
7.4.3.1	Valoración de la global de priorización .....	204
7.4.3.2	Trascendencia del DñE.....	207
7.4.4	Estudio estadístico .....	210
7.4.4.1	Capacidad discriminante del IPGOH <sub>E</sub> .....	210
7.4.4.2	Capacidad discriminante de los indicadores .....	212
7.5	Evaluación y priorización de actuaciones de la ACA .....	216
7.5.1	Evaluación conjunta y priorización de actuaciones de la ACA .....	216

7.5.2	Análisis general de resultados .....	219
7.5.2.1	Valoración de la global de priorización .....	219
7.5.2.2	Trascendencia del DñE .....	220
7.5.2.3	Estudio estadístico.....	222
7.6	Análisis de sensibilidad .....	225
7.7	Conclusiones .....	231

## ***Bloque 4: Cierre***

---

### **Capítulo 8: Conclusiones**

8.1	Introducción .....	235
8.2	Conclusiones generales .....	236
8.3	Conclusiones específicas.....	237
8.4	Futuras líneas de investigación .....	241

Referencias bibliográficas .....	243
----------------------------------	-----

## ***Anexos***

---

A.1	Clasificación de los boletines del ICOLD .....	259
A.2	Toma de muestras .....	267
A.3	Relación geometría-movimientos .....	273
A.4	Modelo estructural simple para verificar la 1ª hipótesis de diagnóstico .....	279
A.5	Datos para el análisis de sensibilidad de los coeficientes del DñE .....	287
A.6	Definición de los pesos de los árboles de decisión.....	321
A.7	Herramienta soporte para el cálculo del IPGOH .....	329
A.8	Fichas de las actuaciones a priorizar .....	337

Notaciones y símbolos por bloques.....	357
--	-----

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 1: Introducción

<i>Figura 1.1.- Evolución del número de presas construidas en España (fuente: MAAMA, 2014)</i> .....	2
<i>Figura 1.2.- Evolución de los problemas en personas y estructuras con el tiempo</i> .....	2
<i>Figura 1.3.- Relación existente entre los ejes principales de la tesis doctoral</i> .....	4
<i>Figura 1.4.- Esquema de la estructura que vertebra la tesis doctoral</i> .....	7
<i>Figura 1.5.- a) Equipo de la UPC (Drs. Aguado, Agulló, Campos, Chinchón y Oliveira junto con el doctorando) en la presa de Mequinenza; b) Doctorando en la presa de Roggiasca (Suiza)</i> .....	10

### Capítulo 2: Estado del conocimiento

<i>Figura 2.1.- a) Presa de Riudecanyes; b) Presa de Castrovido</i> .....	14
<i>Figura 2.2.- Obras de rehabilitación en presas</i> .....	15
<i>Figura 2.3.- Número de boletines publicados por el ICOLD en cada temática</i> .....	16
<i>Figura 2.4.- Esquema teórico del sistema EDFDES propuesto por Wu y Qie (2002)</i> .....	19
<i>Figura 2.5.- Comparativa de las metodologías de Leiro et al. (1996) y Fragier et al. (2012)</i> .....	20
<i>Figura 2.6.- Daños causados por: a) reacción expansiva; b) erosión; c) efectos térmicos</i> .....	24
<i>Figura 2.7.- Métodos de estudio de la seguridad en obras hidráulicas</i> .....	28
<i>Figura 2.8.- Desarrollo conceptual del PCI (adaptado de Sahin y Walther, 1991)</i> .....	29
<i>Figura 2.9.- Matriz de Riesgo (Bureau of Reclamation y Army Corps of Engineers, 2010)</i> .....	34
<i>Figura 2.10.- Estructura de un árbol de decisión genérico</i> .....	38
<i>Figura 2.11.- Formas de las funciones; a) lineal; b) S; c) convexa y d) cóncava (decreciente)</i> .....	39

### Capítulo 3: Diagnóstico del daño

<i>Figura 3.1.- Plano de hormigonado de la presa por trimestres</i> .....	47
<i>Figura 3.2.- Movimientos registrados en la presa de San Esteban</i> .....	50
<i>Figura 3.3.- Frecuencia de medida de los movimientos</i> .....	51
<i>Figura 3.4.- Canteras de la presa de Paso Nuevo</i> .....	53
<i>Figura 3.5.- Evolución en altura de las variables que influyen en la aparición de fisuras</i> .....	55
<i>Figura 3.6.- Productos de alteración en la roca de los estribos de distintas presas</i> .....	55
<i>Figura 3.7.- Representación teórica de empujes y fisuras</i> .....	56
<i>Figura 3.8.- Fisuras longitudinales en la zona de estribos</i> .....	56
<i>Figura 3.9.- Interacción suelo-estructura en galerías; a) vista general b) detalle fisura</i> .....	57
<i>Figura 3.10.- Mapa geológico de la zona de San Esteban</i> .....	57
<i>Figura 3.11.- Fisuras inclinadas; a) paramento aguas arriba; b) paramento aguas abajo</i> .....	58
<i>Figura 3.12.- Esquema fisura horizontal paramento aguas abajo (Sbarigia et al., 2013)</i> .....	58
<i>Figura 3.13.- Fisuración enramada en estructuras anejas a las presas</i> .....	60
<i>Figura 3.14.- Movimientos relativos observados en coronación</i> .....	61
<i>Figura 3.15.- Fisuración en coronación</i> .....	62



Figura 3.16.- Fisuras en zona húmeda del paramento aguas arriba de la presa.....	63
Figura 3.17.- Signos de daño en paramento aguas abajo y aliviadero.....	63
Figura 3.18.- Signos de daño en paramento aguas abajo y aliviadero.....	64
Figura 3.19.- Fisuras en aliviaderos laterales de hormigón .....	64
Figura 3.20.- Signos de daño en paramento aguas abajo y aliviadero.....	65
Figura 3.21.- Fisuración por corte directo; a) imagen general; b) y c) detalle fisura .....	65
Figura 3.22.- Estado de diferentes galerías de una misma presa .....	66
Figura 3.23.- Ramal de galería con hormigones en estado de conservación muy diferente .....	67
Figura 3.24.- Fisuración en galerías: a) rectilínea (Otto, 2007); b) oblicua.....	68
Figura 3.25.- Evolución de fisuras en un pozo de péndulo: a) 1991; b) 2009 .....	68
Figura 3.26.- Fisuras en estructuras de compuerta .....	69
Figura 3.27.- Turbina de Pont de Rei: a) fisura (Araújo, 2008); b) pernos de anclaje .....	70
Figura 3.28.- Presa de Graus: a) planta; b) perfil transversal .....	73
Figura 3.29.- Correlación; a) esbeltez-colimación; b) altura-nivelación.....	73
Figura 3.30.- Presa de San Esteban: a) planta; b) perfil transversal .....	74
Figura 3.31.- Correlación; a) esbeltez-colimación; b) altura-nivelación.....	75
Figura 3.32.- Características de la curva exponencial dada por la expresión ec. 3.3 .....	76
Figura 3.33.- Movimientos ajustados: a) colimación; b) nivelación .....	77
Figura 3.34.- Cuadro sinóptico de ayuda al diagnóstico .....	79
Figura 3.35.- a) Simplificación estructural de Graus; b) Estructura de dos barras a resolver .....	80
Figura 3.36.- Simplificación utilizada para el cálculo del momento de inercia y el área .....	81

#### **Capítulo 4: Contrastación del modelo de diagnóstico: presa de Urrúnaga**

Figura 4.1.- Vista general de la presa (Gil, 2009).....	85
Figura 4.2.- La presa (Gil, 2009): a) planta; b) sección; c) paramento de aguas arriba .....	87
Figura 4.3.- Aprovechamiento hidroeléctrico: a) planta general; b) Alzado (Gil, 2009) .....	88
Figura 4.4.- En rojo fisuras que se abren, en verde fisuras que se estabilizan o se cierran.....	91
Figura 4.5.- Diagramas históricos de nivelación .....	92
Figura 4.6.- Diagramas históricos de colimación (la línea discontinua marca la tendencia).....	92
Figura 4.7.- Estribo de la presa .....	94
Figura 4.8.- Hoja 112 del Mapa Geológico de España 1:50.000, Vitoria.....	95
Figura 4.9.- Estructura auxiliar sin signos de daño relevantes .....	95
Figura 4.10.- Movimientos relativos entre bloques (paramento aguas abajo) .....	96
Figura 4.11.- Estado de conservación del muro-barandilla.....	97
Figura 4.12.- Detalle del estado de conservación del muro-barandilla.....	97
Figura 4.13.- Vista generales del paramento aguas abajo: a) aliviadero; b) bloques centrales .....	98
Figura 4.14.- a) y b) Mancha filtraciones; c) Ribetes en el contacto mortero-mampuesto .....	98
Figura 4.15.- Productos de reacciones: a) óxidos de hierro (ocres); b) y c) carbonato cálcico .....	99
Figura 4.16.- Estado huella testigos extraídos del alma de los contrafuertes .....	99
Figura 4.17.- Fisuración mapeada .....	100
Figura 4.18.- Fisuración enramada en la zona de compuertas: a) general; b) y c) detalles.....	100
Figura 4.19.- Fisuración enramada en el aliviadero: a) vista en planta; b) detalle .....	101
Figura 4.20.- a) Muestras murete de coronación; Difractogramas muestras 3 (b) y 4 (c).....	102
Figura 4.21.- Difractograma de la muestra nº 7 .....	102
Figura 4.22.- Planta de la presa con los bloques utilizados para el estudio señalado.....	104
Figura 4.23.- Perfiles transversales bloques nº: a) V; b) XII; c) XVIII; d) XXIV.....	104
Figura 4.24.- Relaciones presa de Urrúnaga; a) altura-nivelación; b) esbeltez-alineación.....	105
Figura 4.25.- Ajustes nivelación bloques: a) V; b) XII; c) XVIII; d) XXIV .....	106
Figura 4.26.- Cuadro sinóptico de ayuda al diagnóstico .....	107
Figura 4.27.- Detalle de la penetración, por las juntas, del agua en el hormigón no saturado .....	109
Figura 4.28.- Modelización de la hipótesis del comportamiento .....	110
Figura 4.29.- Cadena de reacciones que dan lugar a la expansión del hormigón .....	110
Figura 4.30.- a) Simplificación estructural de Urrúnaga; b) Estructura a resolver.....	113
Figura 4.31.- Planta de un bloque utilizada para determinar las características de las barras .....	113
Figura 4.32.- Deformada de las barras caso B, $\epsilon_r = 0,40$ mm/m y $\epsilon_b = 0,35$ mm/m .....	115
Figura 4.33.- Testigo de la roca de Landa: a) caja 1 (0-3m); b) y c) imágenes de detalle.....	117
Figura 4.34.- Difractograma correspondiente a la muestra figura 4.33 .....	117
Figura 4.35.- Testigo del Contrafuerte 16: a) caja 1 (0-3m); b) y c) imágenes de detalle .....	118

Figura 4.36.- a) Muestra de hormigón analizada; b) Aspecto de la muestra mediante MEB .....	119
Figura 4.37.- a) Composición elemental obtenida por EDX; b) Tabla de resultados .....	119
Figura 4.38.- Difractograma de la muestra de la Figura 4.35 .....	120
Figura 4.39.- Testigo de la presa de Urrúnaga: a) sin teñir; b) teñido .....	121

### Capítulo 5: Índice de Priorización en la Gestión de Obras Hidráulicas (IPGOH)

Figura 5.1.- Marco conceptual de la decisión .....	125
Figura 5.2.- Desarrollo sostenible.....	128
Figura 5.3.- Modelos de toma de decisiones clásicos .....	129
Figura 5.4.- Nuevo modelo de toma de decisiones.....	129
Figura 5.5.- Fases de la decisión y variables de la Fase 1.....	130
Figura 5.6.- Variación del valor del DñE.....	142
Figura 5.7.- Variación en % del valor del DñE .....	143
Figura 5.8.- Variación del valor del DñE.....	144
Figura 5.9.- Variación en % del valor del DñE .....	144
Figura 5.10.- Árbol de decisión para el cálculo del IPGOH.....	146

### Capítulo 6: Componentes del árbol de decisión

Figura 6.1.- Recordatorio árbol de decisión presentado en la figura 5.10.....	152
Figura 6.2.- Función de valor indicador Población Expuesta.....	157
Figura 6.3.- Función de valor indicador Percepción Colectiva del Riesgo.....	162
Figura 6.4.- Función de valor del indicador Servicios Esenciales Afectados .....	166
Figura 6.5.- Función de valor del indicador Perjuicios Materiales y Económicos.....	169
Figura 6.6.- Función de valor del indicador Repercusión Negativa del Daño.....	174
Figura 6.7.- Función de valor del indicador Valor Añadido de la Actuación.....	176
Figura 6.8.- Función de valor del indicador Coste Anual Unitario .....	179
Figura 6.9.- Función de valor del indicador Ahorro Mantenimiento y Vigilancia.....	182
Figura 6.10.- Función de valor del indicador Incremento de Producción Estimado.....	185

### Capítulo 7: Contrastación del modelo de decisión: priorización de actuaciones

Figura 7.1.- Árbol de decisión desarrollado con los pesos de los componentes.....	189
Figura 7.2.- Priorización gráfica de las actuaciones de Endesa según el IPGOH <sub>E</sub> .....	203
Figura 7.3.- Priorización gráfica de las actuaciones de Endesa según el IPGOH <sub>E</sub> .....	204
Figura 7.4.- Variación de posición de las actuaciones en función del sistema de cálculo .....	206
Figura 7.5.- Variación de posición de las actuaciones en función del sistema de cálculo .....	209
Figura 7.6.- Contribución de cada indicador al IPGOH <sub>E</sub> .....	213
Figura 7.7.- Coeficiente de dispersión (Cd) de cada indicador.....	215
Figura 7.8.- Representación gráfica del IPGOH <sub>A</sub> de las actuaciones de la ACA .....	218
Figura 7.9.- Priorización gráfica de las actuaciones de la ACA según el IPGOH <sub>A</sub> .....	219
Figura 7.10.- Variación de posición de las actuaciones en función del sistema de cálculo .....	222
Figura 7.11.- Contribución de cada indicador al IPGOH <sub>A</sub> .....	223
Figura 7.12.- Comparativa de valoraciones: a) IPGOH <sub>A</sub> <sup>E</sup> vs IPGOH <sub>E</sub> <sup>E</sup> ; b) IPGOH <sub>E</sub> <sup>A</sup> vs IPGOH <sub>A</sub> <sup>A</sup> .....	226
Figura 7.13.- Comparativa entre variantes caso actuaciones de Endesa: a) Valoraciones; b) Posiciones.....	230
Figura 7.14.- Comparativa entre variantes caso actuaciones de la ACA: a) Valoraciones; b) Posiciones.....	231

### Capítulo 8: Conclusiones y futuras líneas de investigación

Figura 8.1.- Fases de la decisión y variables de la Fase 1 (igual a la figura 5.5 del capítulo 5) .....	240
---	-----



## ÍNDICE DE TABLAS

### Capítulo 1: Introducción

<i>Tabla 1.1.- Objetivos específicos</i> .....	6
<i>Tabla 1.2.- Relación de presas visitadas</i> .....	9

### Capítulo 2: Estado del conocimiento

<i>Tabla 2.1.- Causas de daño asociadas a la explotación ordinaria de presas de hormigón</i> .....	27
<i>Tabla 2.2.- Indicadores para la obtención del <math>F_c</math> (adaptada de Conesa, 2010)</i> .....	35

### Capítulo 3: Diagnóstico del daño

<i>Tabla 3.1.- Fases y etapas del diagnóstico</i> .....	44
<i>Tabla 3.2.- Número de bloques hormigonados por trimestre</i> .....	47
<i>Tabla 3.3.- Magnitudes a medir en una presa de hormigón (adaptado ITCOLD, 1988)</i> .....	49
<i>Tabla 3.4.- Actividades a realizar en la etapa de inspección de campo</i> .....	50
<i>Tabla 3.5.- Datos necesarios para el estudio de relaciones</i> .....	73
<i>Tabla 3.6.- Datos necesarios para el estudio de relaciones</i> .....	74
<i>Tabla 3.7.- Características geométricas y físicas de las barras del modelo</i> .....	81
<i>Tabla 3.8.- Resultados de la aplicación de las dos hipótesis en el modelo</i> .....	82

### Capítulo 4: Contrastación del modelo de diagnóstico: presa de Urrúnaga

<i>Tabla 4.1.- Características de la presa y del embalse</i> .....	88
<i>Tabla 4.2.- Detalles de los informes técnicos sobre Urrúnaga</i> .....	89
<i>Tabla 4.3.- Detalles de las actuaciones de mantenimiento realizadas en Urrúnaga</i> .....	90
<i>Tabla 4.4.- Ubicación de las distintas muestras tomadas durante la visita</i> .....	101
<i>Tabla 4.5.- Análisis químico del agua de la presa</i> .....	103
<i>Tabla 4.6.- Datos necesarios para el estudio</i> .....	104
<i>Tabla 4.7.- Características geométricas y físicas de las barras del modelo</i> .....	114
<i>Tabla 4.8.- Resultados de la aplicación de las dos hipótesis en el modelo</i> .....	115
<i>Tabla 4.9.- Composición química de las rocas</i> .....	117

### Capítulo 5: Índice de Priorización en la Gestión de Obras Hidráulicas (IPGOH)

<i>Tabla 5.1.- Atributos que definen la variable Grado de Daño</i> .....	131
<i>Tabla 5.2.- Atributos que definen la variable Ubicación del Daño</i> .....	133
<i>Tabla 5.3.- Atributos que definen la variable Extensión del Daño</i> .....	135
<i>Tabla 5.4.- Atributos que definen la variable Evolución del Daño</i> .....	136
<i>Tabla 5.5.- Variables que definen el DñE con sus respectivas puntuaciones</i> .....	137
<i>Tabla 5.6.- La escala fundamental de los números absolutos (Saaty, 2008)</i> .....	138
<i>Tabla 5.7.- Matriz de comparación pareada, M</i> .....	139

Tabla 5.8.- Valor de los coeficientes $\alpha$ , $\beta$ , $\eta$ , $\nu$ en las variantes del análisis de sensibilidad .....	141
Tabla 5.9.- Análisis de sensibilidad .....	145
Tabla 5.10.- Niveles de clasificación del IPGOH .....	148

## Capítulo 6: Componentes del árbol de decisión

Tabla 6.1.- Rama del requerimiento Social .....	153
Tabla 6.2.- Puntuación asignada a los atributos de la variable NPA .....	155
Tabla 6.3.- Puntuación asignada a los atributos de la variable TOE .....	156
Tabla 6.4.- Puntuación asignada a los atributos de la variable DOC .....	160
Tabla 6.5.- Puntuación asignada a los atributos de la variable Hlc .....	161
Tabla 6.6.- Puntuación asignada a los atributos de la variable ATL .....	164
Tabla 6.7.- Puntuación asignada a la variable tIS .....	165
Tabla 6.8.- Puntuación asignada a la variable PME .....	168
Tabla 6.9.- Rama del requerimiento Medio Ambiental .....	169
Tabla 6.10.- Puntuación asignada a los atributos de la variable InI .....	170
Tabla 6.11.- Puntuación asignada a los atributos de la variable ExI (Arboleda, 1994) .....	171
Tabla 6.12.- Puntuación asignada a los atributos de la variable DuI (Arboleda, 1994) .....	171
Tabla 6.13.- Puntuación asignada a los atributos de la variable TEN .....	172
Tabla 6.14.- Rama del requerimiento Económico .....	176
Tabla 6.15.- Tanto por ciento de posible incremento de producción según el grado de daño .....	184
Tabla 6.16.- Valores de $\alpha$ .....	185

## Capítulo 7: Contrastación del modelo de decisión: priorización de actuaciones

Tabla 7.1.- Los indicadores de la decisión con sus pesos .....	190
Tabla 7.2.- Contextualización genérica de las actuaciones a priorizar .....	192
Tabla 7.3.- Características básicas de las actuaciones de Endesa a priorizar .....	193
Tabla 7.4.- Características básicas de las actuaciones de la ACA a priorizar .....	194
Tabla 7.5.- Puntuación del DñE y de las variables que lo determinan .....	201
Tabla 7.6.- IPGOH de cada actuación y puntuación de las variables que lo determinan .....	202
Tabla 7.7.- Priorización de actuaciones de Endesa según IPGOH <sub>E</sub> .....	204
Tabla 7.8.- Priorización de actuaciones por el método Endesa (IP_End) .....	205
Tabla 7.9.- Comparativa entre la priorización del IPGOH <sub>E</sub> y la del IP_End .....	206
Tabla 7.10.- Comparativa entre la priorización del IPGOH y la del IP_DñE .....	207
Tabla 7.11.- Priorización de actuaciones con el árbol modificado (IP_AM) .....	208
Tabla 7.12.- Comparativa entre la priorización del IP_AM y la del IPGOH <sub>E</sub> .....	209
Tabla 7.13.- Coeficiente de Variación (Cv) y Coeficiente de Dispersión (Cd) del IPGOH <sub>E</sub> .....	211
Tabla 7.14.- Contribución de los indicadores al valor final del IPGOH <sub>E</sub> .....	213
Tabla 7.15.- Coeficiente de dispersión (Cd) de cada indicador .....	215
Tabla 7.16.- Puntuación del DñE y de las variables que lo determinan .....	216
Tabla 7.17.- IPGOH <sub>A</sub> de cada actuación y puntuación y de las variables que lo determinan .....	217
Tabla 7.18.- Priorización de actuaciones de la ACA según IPGOH <sub>A</sub> .....	219
Tabla 7.19.- Comparativa entre la priorización del IPGOH <sub>A</sub> y la del IP_DñE .....	220
Tabla 7.20.- Priorización de actuaciones con el árbol modificado (IP_AM) .....	221
Tabla 7.21.- Comparativa entre la priorización del IP_AM y la del IPGOH <sub>A</sub> .....	221
Tabla 7.22.- Coeficiente de Variación (Cv) y Coeficiente de Dispersión (Cd) del IPGOH <sub>A</sub> .....	222
Tabla 7.23.- Contribución de los indicadores al valor final del IPGOH <sub>A</sub> .....	223
Tabla 7.24.- Coeficiente de dispersión (Cd) de cada indicador .....	224
Tabla 7.25.- Priorización de actuaciones de Endesa según IPGOH <sub>A</sub> <sup>E</sup> comparado con IPGOH <sub>E</sub> <sup>E</sup> .....	226
Tabla 7.26.- Priorización de actuaciones de la ACA según IPGOH <sub>E</sub> <sup>A</sup> comparado con IPGOH <sub>A</sub> <sup>A</sup> .....	227
Tabla 7.27.- Valores de los estadísticos globales más significativos .....	227
Tabla 7.28.- Pesos de los requerimientos utilizados en el análisis de sensibilidad .....	228
Tabla 7.29.- Resultado del análisis sensibilidad para el caso de las actuaciones de Endesa .....	229
Tabla 7.30.- Resultado del análisis sensibilidad para el caso de las actuaciones de la ACA .....	230

## Capítulo 8: Conclusiones y futuras líneas de investigación

Tabla 8.1.- Fases y etapas del Diagnóstico (igual a la tabla 3.1 del capítulo 3) .....	238
--	-----

## ÍNDICE DE PRESAS

- Aldeadávila: 9, 62, 64  
Belesar: 60  
Camarasa: 9, 64, 128  
Canelles: 9, 128  
Castrovido: 9, 14  
Charco del Cura: 9, 23  
Ciurana: 9  
Cuerda del Pozo: 15  
Graus: 9, 44, 55, 62, 63, 68, 72, 73, 75, 77,  
80, 81, 82, 128, 288  
Ilsee: 9, 15, 64  
Isola: 9, 67  
La Baells: 9  
Lago Colombo: 58  
Malpaset: 159  
Mequinenza: 8, 9, 10, 61, 65, 66  
Molina: 9, 63  
Panix: 9, 128  
Paso Nuevo: 9, 53, 55, 57, 66, 75, 128  
Pont de Rei (central hidroeléctrica): 89  
Portademouros: 64  
Ribarroja: 9, 128  
Riudecanyes: 9, 14  
Roggiasca: 8, 9, 10  
Rumedo: 9, 55, 63  
San Esteban: 9, 46, 49, 50, 57, 61, 74, 75,  
Sant Antoni: 25  
Santa Maria: 9  
Susqueda: 9, 26  
Tavascán: 9, 51, 69  
Torán: 9, 47, 56, 60, 128  
Torrejón-Tajo: 62  
Torrejón-Tiétar: 60, 61  
Ullivarri: 9, 87, 128  
Urrúnaga: 9, 10, 75, 85-122, 239, 273, 288  
Vega de Tera: 159



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1.- INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos son uno de los condicionantes más importantes en la constitución y desarrollo de una sociedad. En aquellos países en que por desgracia no son un bien abundante, las presas ejercen un rol determinante en el binomio necesidad-disponibilidad, permitiendo un aumento de la calidad de vida que se traduce en un crecimiento poblacional, económico y cultural.

El proyecto, la construcción y, sobre todo, la explotación de obras hidráulicas se justifica por la importancia que supone corregir los desajustes de disponibilidad de agua que pueden darse en distintas zonas de un mismo país. Así se genera un recurso que puede ser utilizado, en primera instancia, para abastecimiento y riego, aunque también puede utilizarse como fuente de energía o incluso como esencia de una actividad lúdica.

Esta práctica ha gestado un gran patrimonio ingenieril en España, que se sitúa entre los primeros países con mayor número de grandes presas construidas, 1225 (el 66,5% son de hormigón) según datos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAAMA, 2014), de las cuales más del 50% superan los de 40 años de edad (ver figura 1.1). Este gran patrimonio es una responsabilidad para la comunidad científico-técnica, la cual debe fomentar el estudio y la conservación de estas obras civiles, que por



su edad empiezan a presentar, en algunos casos, signos de deterioro progresivo causados por daños diversos.

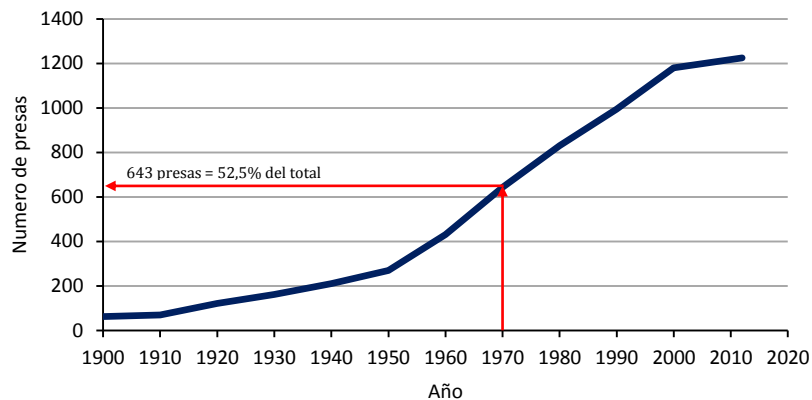


Figura 1.1.- Evolución del número de presas construidas en España (fuente: MAAMA, 2014)

Las estructuras, como los seres humanos, presentan unos daños que van variando en forma, modo y/o origen con el paso de los años. En las fases de construcción, puesta en carga e inicio de explotación (período que se asemeja a la edad infantil de una persona), normalmente los problemas son numerosos (justificándose los seguros anual, trianual y decenal a los diferentes vicios o defectos constructivos, que garantizan el resarcimiento de los daños materiales que éstos puedan causar). Una vez superada esta etapa el funcionamiento se estabiliza, y durante la explotación ordinaria (madurez) no aparecen nuevos daños, excepto casos extraordinarios de sollicitación, hasta que el envejecimiento (3ra edad) es una realidad, ver figura 1.2.

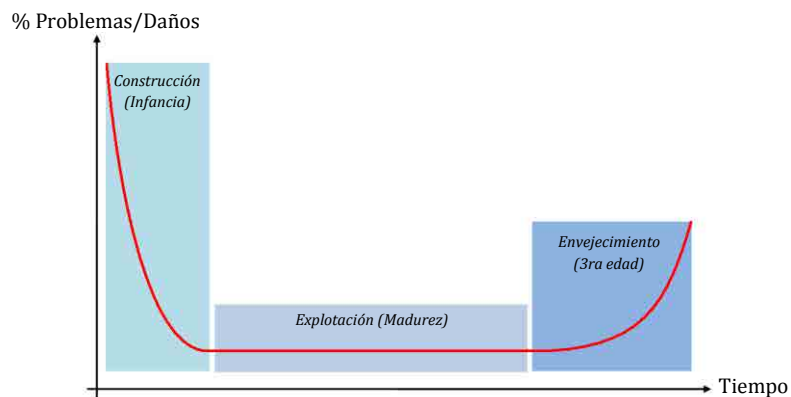


Figura 1.2.- Evolución de los problemas en personas y estructuras con el tiempo

Con el paso de los años, las estructuras pueden perder capacidad resistente, mientras que, por norma general, las sollicitaciones no disminuyen. Aunque normalmente existe un margen de protección entre la acción y la capacidad de reacción de la estructura, se debe revisar el estado de toda obra civil para poder garantizar que ésta, incluso con el paso del tiempo, es segura.

Los entes públicos han tomado conciencia de este hecho. En el ámbito hidráulico, una prueba de ello es el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses

(Dirección General de Obras Hidráulicas, 1996), de aplicación a todas las presas cuyo titular es el Ministerio de Medio Ambiente o un Organismo autónomo de él dependiente. También es de aplicación a aquellas presas y embalses que sean objeto de concesión administrativa por dicho Ministerio conforme a lo dispuesto en la Ley 29/1985, a partir de la entrada en vigor de la orden por la que se aprobó dicho reglamento.

El Artículo 5.8 del reglamento indica la necesidad de llevar a cabo la revisión de la seguridad de las presas -con una periodicidad no superior a cinco años en las presas de categoría A, o de diez años en las de categoría B y C, y siempre después de situaciones excepcionales, como grandes avenidas o seísmos-. El objetivo es evaluar la situación de seguridad de estas estructuras, identificando defectos e insuficiencias, con el fin de proponer las actuaciones necesarias para mantener el nivel de seguridad y garantizar, de esta forma, el buen estado de las mismas, evitándose males mayores.

Además de los informes derivados de estos estudios, los titulares de las presas disponen de otros estudios, encargados por propia voluntad, que giran alrededor del mismo objetivo. Sin embargo, todos estos trabajos carecen de una metodología específica que ordene los procesos lógicos de diagnóstico, con lo cual es prácticamente imposible que puedan determinar la causa/origen de los daños.

La ambigüedad del diagnóstico conlleva que en la mayoría de informes aparezcan unas conclusiones poco concretas y algo ambiguas (sea dicho esto sin el afán de poner en duda la profesionalidad de aquellos que los redactan). La consecuencia directa que se deriva de este proceder es la recomendación de una serie de actuaciones<sup>1</sup> que son poco realistas y que en algunos casos no representan la solución de los problemas manifestados, tal y como puede verse en las dos muestras textuales que se adjuntan a continuación, extraídas de sendos informes tipo:

*“En una recomendación-conclusión orientada a frenar el fenómeno, se puede decir que convienen los niveles de embalse altos, más protectores; también que habrá que pensar en protecciones exteriores para cuando el embalse no pueda estar alto, o parar mejorar aquella protección y que habrá que caminar hacia entender mejor el problema, su génesis y la manera de pararlo”.*

*“Con el objetivo de establecer los procesos evolutivos que pueden estar desarrollándose en el hormigón del cuerpo de presa, y que pueden estar condicionando mucho su comportamiento, es preciso llevar a cabo un estudio de caracterización de este fenómeno así como implantar aparatos de medida directa de estas expansiones”.*

---

<sup>1</sup> Las actuaciones propuestas con la intención de tratar los daños acontecidos pueden definirse, en un contexto general, como aquellas acciones tendentes a restablecer o a mejorar características funcionales, mecánicas o que afecten a la seguridad, ya sean en la propia presa, y/o bien sobre el entorno de la misma (distintos elementos o instalaciones afines).

El estado actual del parque de presas, envejecido, como ha quedado patente en la figura 1.1, fomenta que los informes encargados resuelvan a menudo que existe la necesidad de realizar numerosas actuaciones en diversas presas en un mismo periodo. Ante la evidencia de que todas las actividades recomendadas no pueden realizarse de forma simultánea, ya sea por factores técnicos o económicos, surge la necesidad de tomar una decisión y establecer una priorización. Es de vital importancia realizar una selección de aquellas intervenciones que corrijan los daños estructurales que traen asociados los mayores riesgos.

## 1.2.- RAZÓN DE SER

Los administradores de obras hidráulicas necesitan una herramienta, basada en conceptos técnicos, capaz de estructurar el pensamiento y de establecer un criterio racional que les ayude a gestionar de forma óptima todas aquellas situaciones en las que aparecen daños en las estructuras. Porque gestionar de forma responsable es, según Drucker (2000), ocuparse de cualquier cosa que afecta al rendimiento de una institución. Desafortunadamente, hasta la fecha, como recuerda León *et al.* (2007), en estas situaciones los ingenieros y arquitectos sólo han podido hacer uso de su experiencia y buen juicio.

Para desarrollar una herramienta de gestión que sirva para evaluar daños y priorizar las actuaciones que pueden corregirlos se han hilado dos campos del conocimiento distantes y poco desarrollados en el ámbito de las obras hidráulicas que van a ser los ejes que fundamenten este trabajo: el diagnóstico (eje 1) y la priorización de actuaciones (eje 2), tal y como se puede ver en la figura 1.3. Así, se puede, en primer lugar, comprender que sucede en la estructura, y en segundo lugar se cuantifica la importancia del problema a abordar, con el fin de ordenar los daños según su “valor”. Un orden que debe servir para priorizar las actuaciones/inversiones de reparación.

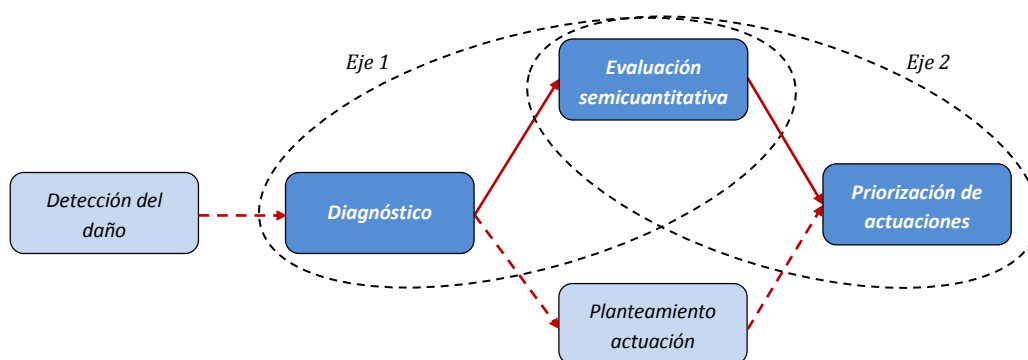


Figura 1.3.- Relación existente entre los ejes principales de la tesis doctoral

Evaluar la prioridad de estas actuaciones no es una tarea sencilla. La evolución de los daños y sus consecuencias derivadas dependen de una serie de parámetros interdependientes que pueden tener matices distintos dependiendo de la presa en la que se manifiesten los problemas.

Para dar inicio al proceso racional, que tiene por origen la detección de un daño, surge la necesidad de instaurar una metodología eficiente de diagnosis (eje 1). Solamente se puede proponer un tratamiento adecuado cuando éste se sustenta y se basa en un razonamiento correcto que sea capaz de interpretar el porqué de la manifestación del daño. Con la implantación de esta metodología se podría conseguir que aquellos informes técnicos, que tantas veces se desperdician por su excesiva aridez, pasen a ser altamente provechosos al ser más concretos y rigurosos.

Este eje, impulsado por una resolución del International Commission on Large Dams (ICOLD)<sup>2</sup>, se planteó, en primer lugar, enfocado a la realización de una metodología pensada para el diagnóstico de reacciones químicas expansivas, aunque al final se decidió ampliar el ámbito de estudio a patologías relacionadas con la explotación ordinaria de una presa, con la intención de que sirva como fundamento para el segundo eje.

Cuando se ha definido el diagnóstico del daño, debe realizarse la evaluación objetiva de la necesidad de actuar y corregir la incidencia estructural (eje 2). A tal fin, se plantea un método de análisis que valora la importancia que tiene solucionar un daño midiendo el grado de sostenibilidad que aporta la actuación correctora.

La universidad, fuente de conocimiento e innovación, es el entorno ideal para desarrollar una herramienta metodológica capaz de engranar estos conceptos. El resultado es un instrumento que puede ser utilizado por los entes responsables de las obras hidráulicas para gestionar y administrar sus recursos de forma eficiente.

Sin duda, la materialización de este método de trabajo significa un avance estratégico. La organización que lo implemente transferirá un valor añadido a los proyectos de rehabilitación, asignando preferencia en la ejecución a aquellos que se estimen prioritarios desde un punto de vista sostenible.

El éxito de la herramienta recae en dos factores: es fácil y rápida de utilizar. No se necesitan grandes estudios teóricos para determinar los parámetros sobre los que se sustenta y además cuando estos están definidos su implementación es prácticamente instantánea. Porque como avanzó Gates (2000) la sociedad actual valora básicamente la *velocidad* en la obtención de resultados, como valoraba en los años 80 la *calidad*, y en los 90, la *reingeniería*.

Por todo lo expuesto, este trabajo, con el apoyo y la financiación de dos de los más importantes gestores privados de obras hidráulicas (Endesa Generación e Iberdrola Generación), además del apoyo de la Generalitat de Catalunya y del Ministerio de Educación y Ciencia, aborda estos aspectos de gran interés práctico sobre los cuales, como se ha dicho, todavía no existe una investigación exhaustiva. Se pretende que la consecuencia final de todo el trabajo sea contribuir a la transferencia de conocimiento universidad-empresa, eje y sentido del I+D+i.

---

<sup>2</sup> El 24 de mayo de 2010, en Hanoi, el Comité de Presas de Hormigón acordó la realización de un boletín técnico específico dedicado al diagnóstico, rehabilitación y prevención de las reacciones expansivas.

## 1.3.- OBJETIVOS

### 1.3.1.- Objetivo generales

El objetivo general de la presente tesis doctoral es crear una metodología de gestión integral de obras hidráulicas de hormigón en explotación que pretende conjugar el diagnóstico de daños con la evaluación y priorización de las actuaciones necesarias para repararlos.

Todo el estudio se basa en un análisis riguroso de los daños presentes en las estructuras para que estos sean juzgados de forma objetiva, permitiéndose de esta forma su ordenación, según sean más o menos importantes desde un punto de vista sostenible. La metodología debe tener además del rigor teórico, un enfoque práctico que permita asegurar su aplicabilidad en el sector hidroeléctrico.

### 1.3.2.- Objetivos específicos

En aras de dar respuesta a las diferentes cuestiones señaladas a lo largo del apartado segundo, en la tabla 1.1 se enumeran los objetivos específicos principales:

Tema	Objetivos Específicos
Diagnóstico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar los principales signos de deterioro que pueden aparecer en una presa en su etapa de explotación ordinaria.</li> <li>• Definir una metodología sistemática de análisis de daños capaz de determinar su origen e importancia.</li> <li>• Validar la metodología propuesta a través la implementación en un caso práctico</li> </ul>
Evaluación Semicuantitativa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proponer un sistema de evaluación de daños homogeneizador que permita comparar afecciones dispares detectadas en unidades estructurales diferentes.</li> </ul>
Priorización actuaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Detallar los indicadores más significativos en la gestión ordinaria de obras hidráulicas.</li> <li>• Desarrollar una herramienta de ayuda a la toma de decisiones capaz de evaluar objetivamente las consecuencias sociales, medioambientales y económicas que pueden acarrear los daños presentes en una estructura hidráulica.</li> <li>• Ordenar las actuaciones correctoras propuestas por entes públicos y privados de más a menos importantes según el criterio de la herramienta desarrollada.</li> </ul>

*Tabla 1.1.- Objetivos específicos*

## 1.4.- METODOLOGÍA

Para dar una respuesta adecuada a los objetivos planteados en el apartado anterior, el trabajo se divide en ocho capítulos y ocho anexos, agrupados en cuatro grandes bloques, tal y como puede verse en la figura 1.4.

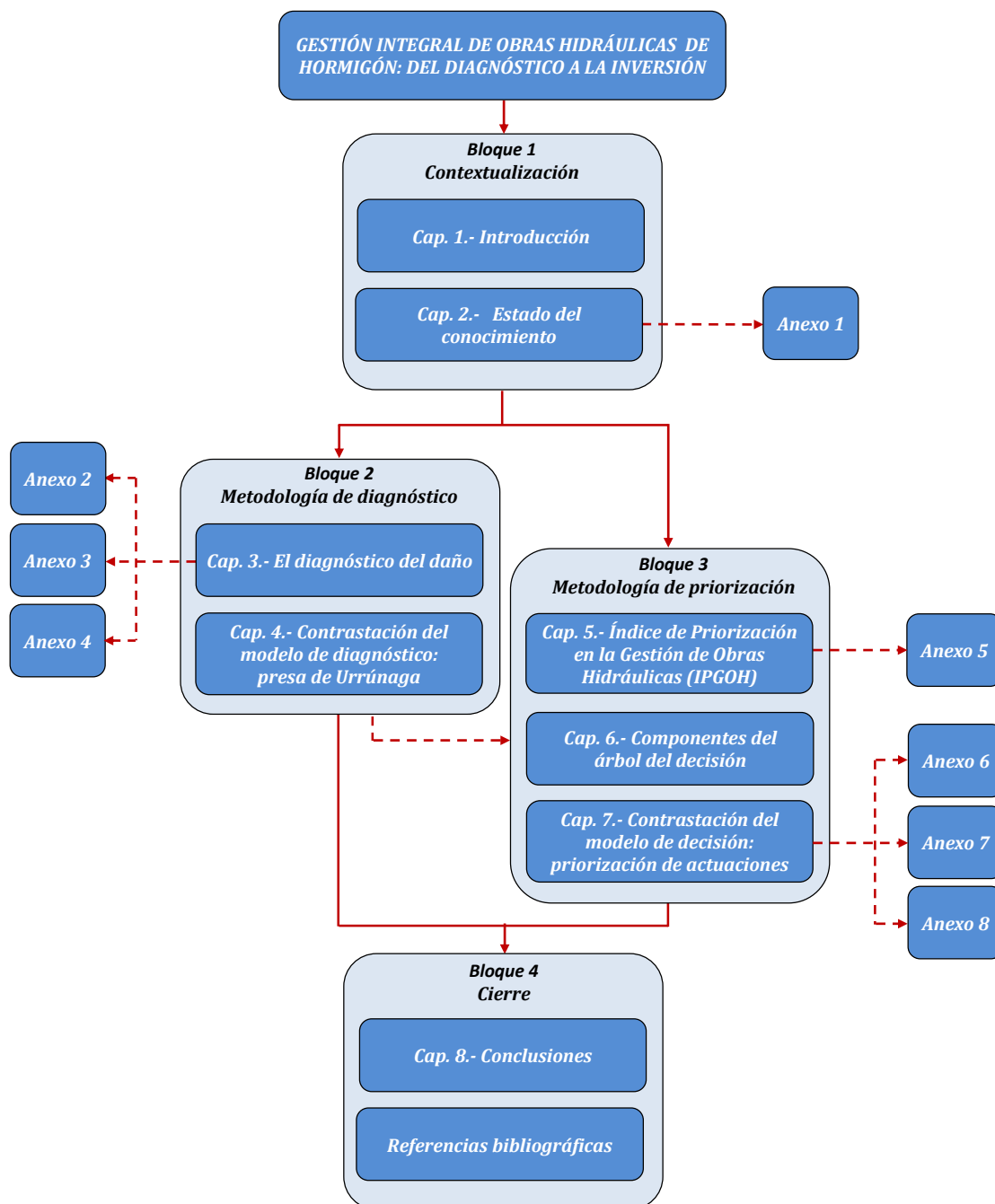


Figura 1.4.- Esquema de la estructura que vertebra la tesis doctoral

El primer bloque, compuesto por los capítulos 1 y 2, pretende presentar y contextualizar la tesis doctoral. A tal fin, en este *primer capítulo* se exponen los motivos que han impulsado la investigación; y en el *segundo* se desarrolla un breve estado del conocimiento de los campos principales tratados a lo largo del documento (presas, diagnóstico, gestión de daños y análisis de valor) y las interrelaciones ya existentes entre ellos.

El segundo bloque se dedica íntegramente a proponer una metodología de diagnóstico de los daños que pueden aparecer durante la explotación ordinaria de una presa, entendida ésta como la obra hidráulica de hormigón de referencia. Aunque el autor tiene marcada experiencia en la diagnosis de presas afectadas por reacciones químicas expansivas, el texto tiene un carácter generalista, que permite que el procedimiento que se establece pueda utilizarse ante cualquier tipología de daño.

Si bien son muchos los ingenieros que se han “enfrentado” al reto de determinar el origen de los daños que se manifiestan en estas estructuras, no se conoce ningún texto que haya aglutinado este conocimiento. Este bloque, con el fin de llenar el vacío existente en la literatura, pretende organizar las actividades (básicamente de discernimiento) que los técnicos vienen realizando para resolver los enigmas que se les presentan a la hora de dirimir la/s causa/s de una lesión en cualquiera de las unidades estructurales que forman una presa, con el objetivo de sistematizarlas. El texto en ningún momento pretende aportar nuevas técnicas, ni nuevas fórmulas de cálculo, simplemente quiere dar un nuevo relieve al examen físico de la presa, que aun siendo la base del argumento y por tanto, un elemento principal del proceso, se ha visto relegado en muchos casos a un segundo plano por los técnicos, quienes solamente han resaltado la importancia de los ensayos de laboratorio y los estudios numéricos.

La metodología propuesta no se ha desarrollado en base a conocimientos teóricos obtenidos de fuentes bibliográficas, aunque se han tenido en cuenta. La metodología se ha concebido principalmente en base a los conocimientos prácticos adquiridos a través de las visitas técnicas (enmarcadas en proyectos de investigación) realizadas en las 25 presas de hormigón enumeradas en la tabla 1.2, y que quedan ejemplificadas en las dos imágenes de la figura 1.5, correspondientes a sendas visitas realizadas a las presas de Mequenza y Roggiasca. Las 10 primeras de estas presas han sido objeto de estudio detallado por parte del doctorando. Un trabajo visualizado en numerosos informes de diagnóstico cuyos resultados han sido altamente satisfactorios, dándose respuestas a las preguntas que se formulaban los expertos desde hacía años.

Cabe destacar que 6 de las 25 presas visitadas son suizas (números 11 a 16 de la tabla 1.2). Todas ellas propiedad de la empresa pública Axpo Holding AG, donde el autor realizó una estancia. En este periodo de tiempo, además de realizar las visitas, el autor pudo intercambiar conocimientos con los responsables de seguridad y mantenimiento del patrimonio hidráulico de la compañía.

Nº	Nombre	Ubicación	Tipología	Titular	Altura (m)	L. Corona. (m)
1	GRAUS	Lladorre (Lleida)	Gravedad	Endesa	25,5	99,5
2	TAVASCÁN	Lladorre (Lleida)	Gravedad	Endesa	31,3	56,8
3	TORÁN	Canjena (Lleida)	Gravedad	Endesa	40	64,7
4	MEQUINENZA	Mequinenza (Lleida)	Gravedad	Endesa	79	461
5	SAN ESTEBAN	Noguera de Ramuin (Orense)	Arco-gravedad	Iberdrola	115	295
6	URRUNAGA	Villareal de Álava (Álava)	Contrafuertes	Iberdrola	31	487,4
7	ULLIVARRI	Arrazua-Ubarrundia (Álava)	Contrafuertes	Iberdrola	37	535
8	RUMEDO	Lladorre (Lleida)	Gravedad	Endesa	9,3	91
9	PASO NUEVO	Benasque (Huesca)	Arco-gravedad	Acciona	72,6	195
10	CAMARASA	Camarasa (Lleida)	Gravedad	Endesa	103	215,9
11	ILSEE	Sierre (Suiza)	Gravedad + Arco-gravedad	Axpo AG	25	270
12	ISOLA	San Bernardino (Suiza)	Bóveda	Axpo AG	45	290
13	PANIX	Ilanz (Suiza)	Gravedad	Axpo AG	53	270
14	MOLINA	Grono (Suiza)	Gravedad	Axpo AG	54	93
15	ROGGIASCA	Roverdo (Suiza)	Bóveda	Axpo AG	68	177
16	SANTA MARIA	Disentis/Muster (Suiza)	Bóveda	Axpo AG	117	560
17	CHARCO DEL CURA	El Tiemblo (Ávila)	Gravedad	CH Tajo	32,3	130
18	CIURANA	Cornudella de Montsant (Tarragona)	Gravedad	ACA	62,7	274,4
19	RIUDECANYES	Riudecanyes (Tarragona)	Gravedad	ACA	51	235
20	ALDEADÁVILA	Aldeadávila de la Ribera (Salamanca)	Arco-gravedad	Iberdrola	139,5	250
21	SUSQUEDA	Susqueda (Girona)	Bóveda	Endesa	135	510
22	CANELLES	Estopiñan del Castillo (Huesca)	Bóveda	Endesa	151	210
23	RIBARROJA	Riba-Roja d'Ebre (Tarragona)	Gravedad	Endesa	60	362,4
24	LA BAELLS	Berga (Barcelona)	Bóveda	ACA	102,3	302,4
25	CASTROVIDO (en construcción)	Sales de los Infantes (Burgos)	Gravedad	CH Duero	97	544,6

*Tabla 1.2.- Relación de presas visitadas*





Figura 1.5.- a) Equipo de la UPC (Drs. Aguado, Agulló, Campos, Chinchón y Oliveira junto con el doctorando) en la presa de Mequinenza; b) Doctorando en la presa de Roggiasca (Suiza)

Con el objetivo de demostrar la validez de la metodología, el bloque se cierra con su implementación práctica en la presa de Urrúnaga.

La gran mayoría de fotografías que ilustran el documento fueron tomadas por el doctorando en las mencionadas visitas, por esta razón a lo largo del texto solamente se especificará la fuente de aquellas cuya propiedad intelectual sea de otros autores.

El tercer bloque, que se alimenta conceptualmente del *segundo*, se ocupa del desarrollo teórico de una metodología para la priorización de inversiones destinadas a reparar y mantener obras hidráulicas que se encuentran en explotación. El fruto de todo el trabajo es la definición del *Índice de Priorización en la Gestión de Obras Hidráulicas* (IPGOH), según el cual se ordenan las diferentes actuaciones conforme su realización sea más o menos conveniente.

El binomio presa-embalse es una realidad extensa y muy diversa, donde se pueden presentar daños muy heterogéneos. Antes de priorizar se debe comparar, y solamente se pueden comparar aquellos sujetos considerados análogos.

El documento, basándose en la metodología de diagnóstico y en los conocimientos obtenidos a partir del estudio de casos reales, propone un sistema innovador para la evaluación semicuantitativa de cualquier modo de daño, realizando una homologación conceptual de lesiones que afectan a distintos elementos estructurales, siendo posible, a partir de ese momento, su comparación.

Para valorar la necesidad real de una actuación se debe sopesar, además del daño, las consecuencias que de él pueden desprenderse. Con el objetivo de poder considerar las variables más decisivas en este sentido se presenta un árbol de decisión donde aparecen todos los conceptos que se evalúan en cada una de las actuaciones a priorizar. La presentación en forma de árbol permite ordenar fácilmente los procesos mentales que hasta la fecha han realizado los técnicos de forma inconsciente, gracias a su raciocinio y experiencia.

El bloque se cierra con un capítulo en el que se aplica la metodología de priorización para evaluar 19 actuaciones ordinarias consideradas en los presupuestos tanto de gestores públicos como privados. El objetivo es ordenarlas según los criterios definidos previamente. Con su implementación se quiere demostrar que los resultados obtenidos son coherentes con los criterios técnicos de los expertos, además de plasmar que su implementación e interpretación es relativamente rápida, sobre todo para aquellos técnicos familiarizados con la explotación ordinaria de obras hidráulicas.

Finalmente, el cuarto bloque, considerado de cierre, está constituido por el capítulo de conclusiones y por las referencias bibliográficas. El *capítulo 8*, el de conclusiones, recoge una valoración final que remarca las principales aportaciones que se hacen a lo largo del documento. En él además se enumeran una serie de propuestas para seguir avanzando técnicamente, tanto en el ámbito del diagnóstico como en el ámbito de priorización de inversiones.



## CAPÍTULO 2

# ESTADO DEL CONOCIMIENTO

### 2.1.- INTRODUCCIÓN

La concepción de un sistema de gobierno de obras hidráulicas en explotación, tal y como se ha planteado en el capítulo anterior, es sumamente complejo. En él se relacionan dos ramas diferentes de conocimiento: la del diagnóstico de daños en presas de hormigón, y la de la gestión y toma de decisiones. Para poder realizar cualquier propuesta de mejora, es necesario hacer de antemano un estudio del conocimiento existente que sea versátil, además de concreto.

Por esta razón, el objetivo principal del presente capítulo es realizar una revisión general de los trabajos que se han considerado más relevantes a nivel internacional en los dos ámbitos de estudio mencionados.

Por un lado se hace imprescindible, por su propia naturaleza, revisar como se ha planteado el diagnóstico de daños en el ámbito hidráulico. Por el otro, es necesario estudiar las técnicas utilizadas por los diferentes gestores internacionales para gobernar sus instalaciones dañadas, al mismo tiempo que se debe seleccionar algún método teórico de ayuda a la decisión multicriterio generalista, ya existente, que se considere apto para adaptarse al ámbito hidráulico. Y todo esto sin olvidar los diferentes elementos clave que hacen que el binomio presa-embalse sea una de las infraestructuras más difíciles de gestionar.

Para tratar de dar respuesta a las exigencias planteadas, el presente capítulo, que sirve para cerrar el bloque de contextualización de esta tesis (§1.4), se divide en cinco grandes apartados:

- Las presas. Un patrimonio necesario (§2.2)
- El estudio de los daños en presas (§2.3)
- Causas de daño en presas (§2.4)
- La priorización de actuaciones en el ámbito hidráulico (§2.5)
- MIVES, un sistema de ayuda a la decisión (§2.6)

## 2.2.- LAS PRESAS. UN PATRIMONIO NECESARIO

El agua ha sido y seguirá siendo fuente de vida, aunque la cuantía y el uso que se le ha dado ha ido cambiando con el paso de los años como consecuencia de la evolución que ha experimentado la civilización humana (Diez-Marta, 1997). Las presas, obras civiles singulares que se construyen desde hace más de 4500 años (Schnitter, 2000), han contribuido a esta evolución.

A pesar de la variabilidad de caudales que pueden experimentar los ríos, sus principales funciones eran, en un primer momento: el abastecimiento humano, el riego, y el control de avenidas a lo largo de todo el año. Sirva de ejemplo la presa de Riudecanyes (figura 2.1a), puesta en servicio en 1918 y que aún hoy proporciona agua de abastecimiento y riego a una parte del Baix Camp.

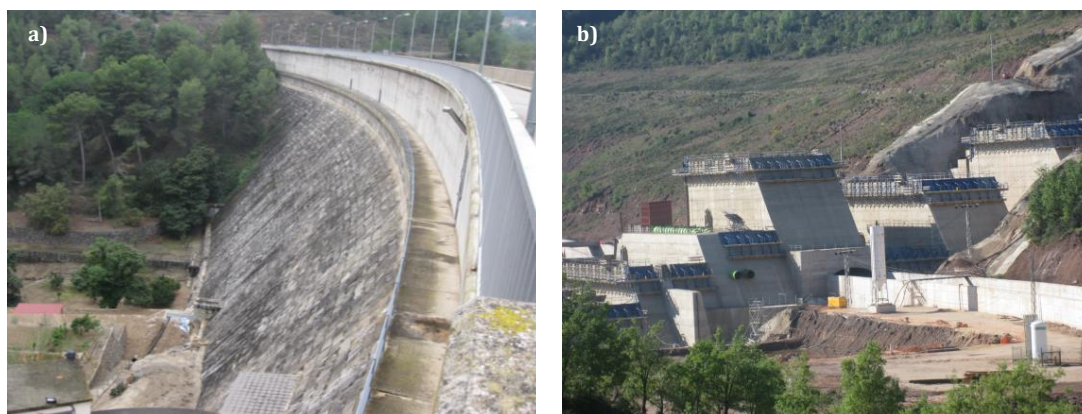


Figura 2.1.- a) Presa de Riudecanyes; b) Presa de Castrovido

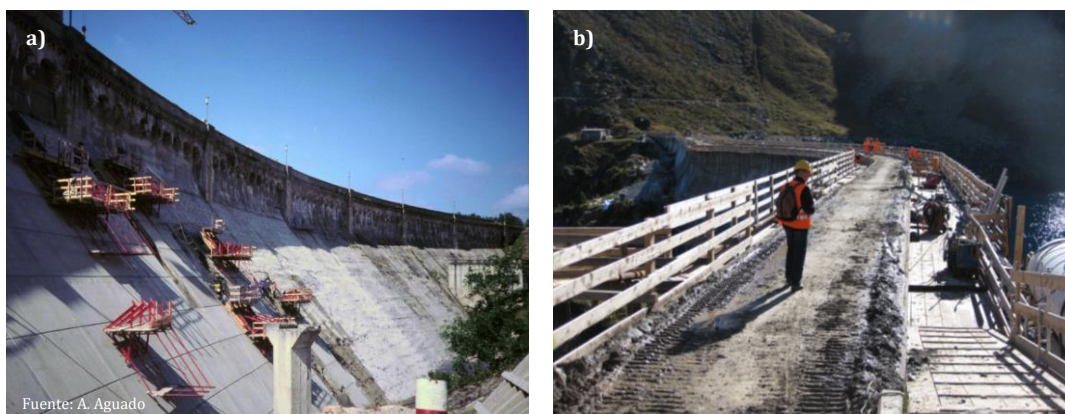
Actualmente, estas estructuras se construyen con el mismo afán, aunque se le han sumado otras aportaciones complementarias, como pueden ser la producción de energía, la navegación, la pesca o incluso el ocio. La Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD, 2007) considera a las presas una obra capital para el desarrollo de las naciones, al aportarles numerosas ventajas socio-económicas y ambientales. Son tales sus beneficios que siguen proyectándose y construyéndose, a pesar de las circunstancias económicas

adversas, como demuestra el caso de la presa de Castrovido (figura 2.1b) que tiene prevista su finalización en año 2015.

Una de las últimas grandes contribuciones ambientales de las presas ha sido el impulso de la energía hidráulica. La creciente sensibilidad por explotar fuentes de energía limpias y renovables que no emiten CO<sub>2</sub> a la atmosfera ha reforzado este tipo de energía que se viene utilizando desde el tiempo de la civilización griega. Esto hace que, según datos de IDAE (2011), en los próximos 35 años en España se espere un incremento de potencial hidroeléctrico que puede ir del 18 al 44%.

De acuerdo con el ICOLD (1997), la principal contrapartida de estas estructuras es el evidente impacto ambiental y social que causa su construcción, además de requerirse una gran inversión económica. Su puesta en servicio cambia el régimen del río, modifica la vida acuática, e inunda una gran superficie de terreno, con lo que las personas ven alterado su hábitat natural, su forma de vida (pueden verse obligados a desplazarse a otros territorios), sus tradiciones e incluso su economía, además, obviamente de las modificaciones que se pueden causar en la fauna y flora de la zona.

Dada esta coyuntura, y ante la evidencia que no se puede prescindir de los beneficios que aportan las presas, el ser humano está obligado a maximizar la vida útil de las que ya se encuentran en explotación. El 40% de presas del mundo superan los 40 años de edad (ICOLD, 2011), porcentaje que en España se eleva hasta el 50%, tal y como se vio en el capítulo anterior (figura 1.1). A esta edad, según Diez-Cascón (2003), las presas entran en una fase que se podría denominar de deterioro progresivo, que exige realizar esfuerzos importantes en actuaciones periódicas de mantenimiento para garantizar su operatividad y seguridad. Sirvan de ejemplo los trabajos de rehabilitación que se han llevado a cabo en la presa de Cuerda del Pozo, construida en 1941 (figura 2.2a), y en la presa de Ilsee (Suiza), construida en 1962 (figura 2.2b).



*Figura 2.2.- Obras de rehabilitación en presas*

### 2.3.- EL ESTUDIO DE LOS DAÑOS EN PRESAS DE HORMIGÓN

Las presas, como la mayoría de estructuras de hormigón, se han proyectado y construido para una determinada vida útil. Aun así, todas ellas pueden padecer una serie de daños que pueden condicionar la capacidad operativa de las instalaciones, además de conllevar problemas de seguridad. El mantenimiento y conservación eficiente del parque actual de presas, necesario para evitar este tipo de problemas, depende de la capacidad para dictaminar una hipótesis de diagnóstico que se sustente en el estudio detallado de los daños. Cuando se supone conocido el origen del problema, se pueden programar las actuaciones dirigidas a repararlo o corregirlo.

En esta tesitura, se dedica este apartado a repasar como la comunidad técnica ha tratado hasta la fecha el estudio de los principales daños que afectan a una presa en un periodo ordinario de explotación.

#### 2.3.1.- La aportación del ICOLD

El ICOLD, organización internacional no gubernamental que fomenta y propicia foros de debate para el intercambio de conocimiento y experiencia en ingeniería de presas, ha publicado, en los últimos 50 años, 147 boletines, en los que sus expertos trabajan en temáticas individuales, entre 3 y 5 años, para desarrollar sus estados del arte y una serie de recomendaciones. Estos boletines se pueden agrupar por temáticas en 8 grandes grupos: Análisis Sísmico (AS), Auscultación y Vigilancia (AV), Mantenimiento y Conservación (MC), Gestión Económica (GE), Proyecto y Construcción (PC), Sostenibilidad y Medioambiente (SM), Seguridad y Riesgo (SR), y Otros Temas (OT). El número de boletines que conforman cada grupo varía considerablemente, tal y como se puede ver en la figura 2.3. Para más información acerca de los boletines publicados por el ICOLD se recomienda la lectura del anexo 1.

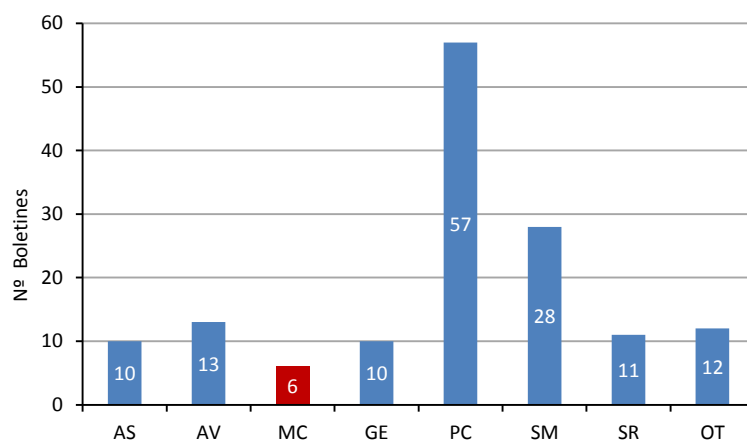


Figura 2.3.- Número de boletines publicados por el ICOLD en cada temática

El proyecto y construcción (PC) ha sido la temática que más atención ha suscitado por parte de la comunidad técnica que se integra en el ICOLD, considerada de referencia a nivel internacional. Esta es una situación lógica y natural, si se entiende que un buen proyecto y una óptima construcción son claves para que la fase de explotación se

desarrolle sin complicaciones. En segundo lugar, los técnicos se han dedicado a estudiar la interacción entre la presa y el medio ambiente (SM), ante el evidente impacto que causan estas estructuras en el entorno natural en el que se construyen. Por detrás de este grupo, se sitúan en un orden de magnitud parecido el resto de temáticas, siendo el grupo dedicado al mantenimiento y conservación (MC) el que menos boletines acumula, con tan sólo 6 de los 147.

Es precisamente en este último grupo donde quedan encuadrados los trabajos de estudio del daño, mezclados con los trabajos de rehabilitación y tratamiento de los mismos. Los boletines que lo conforman son:

- B.71- Exposure of dam concrete to special aggressive waters (1989)
- B.79- Alkali-aggregate reaction in concrete dams (1991)
- B.93- Ageing of dams and appurtenant Works (1994)
- B.102- Vibrations of Hydraulic Equipment for dams (1996)
- B.107- Concrete dams - Control and treatment of cracks (1997)
- B.119- Rehabilitation of dams and appurtenant works (2000)

De entre estos boletines, los 4 dedicados al análisis de daños (B.71, B.79, B.93 y B.107) se sustentan en una revisión de casos históricos. En ellos se enumeran los problemas detectados, las causas que los originan, y los métodos utilizados para corregirlos, pero no se propone explícitamente una metodología de diagnóstico para dictaminar el origen de los daños en estudios futuros. Aun así, se debe reconocer que se hacen algunas aportaciones muy interesantes para impulsar este tipo de metodologías.

El mejor ejemplo se encuentra en el boletín B.79 (ICOLD, 1991), que trata sobre la reacción álcali-árido (RAA), sin referirse al ataque sulfático interno (ASI), en el que se hace especial énfasis en esta tesis. Éste boletín apunta que un diagnóstico acertado puede hacerse solamente después de encadenar las siguientes actividades: visita detallada al sitio, recopilación de datos de los materiales utilizados, métodos constructivos y la consiguiente historia del hormigonado, y finalmente, si así lo recomiendan los datos observados, el examen de las muestras tomadas. Además, recomienda el estudio de cualquier tipo de información relativa a la presa y a su entorno, y la inspección de otras obras antiguas de hormigón construidas por la zona donde se encuentra la presa.

El B.93 (ICOLD, 1994), dedicado al envejecimiento, también hace especial hincapié en que existen una serie de técnicas para estudiar los daños. En él se destaca la importancia de la inspección visual y de la interpretación de los datos registrados por el sistema de auscultación para detectar y valorar los procesos de envejecimiento, aunque no se explicita como deben hacerse ambas cosas.

El B.71 (ICOLD, 1989) tiene un pequeño apartado en el que se indica cómo puede detectarse si una presa se ha visto afectada por aguas agresivas. El trabajo se centra en especificar qué tipo de ensayos o análisis deben realizarse al agua y al hormigón (sea *in*



*situ*, sea a testigos extraídos). Aun así, el texto remarca la importancia de la inspección visual como primera etapa del estudio, en la que se deben apuntar los signos que denotan que se ha dado alguna anomalía. También hace especial hincapié en la importancia que tiene el examen de los registros de los datos de auscultación para detectar un cambio de comportamiento de la estructura.

El B.107 (ICOLD, 1997), dedicado al control y tratamiento de fisuras, no hace referencia alguna al diagnóstico, ni a ninguna de sus fases.

En el entorno del ICOLD, el trabajo más destacado en el ámbito del diagnóstico lo ha desarrollado el Comité Italiano de Grandes Presas (ITCOLD, 2012). Como indica el propio documento, su objetivo es estudiar el diagnóstico de presas porque es un tema que en los últimos años no ha suscitado la atención de la comunidad científico-técnica.

El documento describe la potencialidad, los límites y las posibles líneas de mejora de las técnicas que pueden utilizarse como apoyo al diagnóstico en este sector. Para hacerlo se centra en los modelos matemáticos. De éstos dice que son un elemento de apoyo muy importante en la segunda fase del diagnóstico, la de interpretación de observaciones y de datos registrados. Sin embargo, hay una pequeña parte introductoria que permite situar el diagnóstico en su visión más global.

El proceso diagnóstico, según el ITCOLD (2012) no se puede delegar a la intuición o a la experiencia de los técnicos. Su éxito se sustenta en criterios objetivos que se obtienen de una serie de actividades reguladas que permiten entender qué sucede en la estructura. Desde su punto de vista las principales actividades a desarrollar en cualquier proceso diagnóstico son: inspección visual, caracterización del material que constituye el conjunto presa-cimientos-embalse, monitorización estática y monitorización dinámica. A continuación se exponen las que dicho texto considera las características principales de estas actividades.

- *Inspección visual.* Actividad básica para individualizar las posibles manifestaciones de deterioro. El equipo que la realiza debe ser pluridisciplinar y debe prestar especial atención a las fisuras, movimientos estructurales y desalineaciones, así como a los compuestos de las aguas de los drenes. Para facilitarla se aconseja desarrollar una lista de chequeo previa.
- *Caracterización del material que constituye el conjunto presa-cimientos-embalse.* Actividad que pretende determinar el estado y calidad del material, para evaluar la degradación que haya podido experimentar. El objetivo final es hacer una previsión de cómo puede comportarse y si puede o no afectar a la presa. A tal fin, se recomienda realizar las siguientes acciones: revisión de información histórica, inspección puntual de elementos degradados (manchas de humedad, eflorescencias, productos neoformados), pruebas in situ (ultra sonido, permeabilidad) y pruebas de laboratorio. El texto, en este apartado, desarrolla en detalle la caracterización físico-mecánica del hormigón que puede hacerse mediante ensayos de laboratorio.

- *Auscultación estática.* Para establecer un buen diagnóstico se considera fundamental que el conjunto presa-cimientos-embalse disponga de un sistema permanente de sensores que registren de forma periódica una serie de variables clave para explicar el comportamiento de la estructura. Las variables que se deben registrar se dividen en dos grupos: las variables causa (nivel del embalse, temperatura...), y las variables efecto (deformaciones, movimientos, subpresión...).
- *Monitorización dinámica.* Además de la auscultación estática, existe una auscultación dinámica que trata de dar una visión de conjunto del comportamiento del sistema. Esta auscultación se ha desarrollado sobre todo para estudiar el comportamiento de la presa ante fenómenos sísmicos.

En este sentido, se debe apuntar que el ICOLD ha dedicado 13 boletines a temas relacionados con la vigilancia y auscultación de presas (ver figura 2.3), si bien su principal cometido es proponer sistemas para mejorar el registro de datos para detectar anomalías sin entrar a proponer metodologías para tratar la información que estos facilitan a efectos de realizar diagnósticos.

### 2.3.2.- Otros trabajos

En otros contextos existen trabajos de carácter específico que tratan el diagnóstico de daños en presas. En ellos se muestran dos tendencias muy diferenciadas a la hora de plantear un sistema para dictaminar el origen de los daños que afectan a estas estructuras.

Trabajos como Wu y Qie (2002), Peyras *et al.* (2006) o Xu (2011) plantean unos sistemas informáticos de ayuda a la decisión, basados en grandes bases de datos, que permitan al técnico determinar el origen de los daños sin tener que realizar un juicio experto. La sola identificación de daños, junto con las características de la presa, sirven para que el sistema haga una valoración de la situación y del estado de la estructura.

En la figura 2.4 se muestra el esquema teórico del modelo de Wu y Qie (2002) que, como el de Xu (2011), solamente se han concebido para presas de materiales sueltos. El modelo que propone Peyras *et al.* (2006), aunque se ha implementado en una presa de materiales sueltos, puede adaptarse en teoría a presas de hormigón.

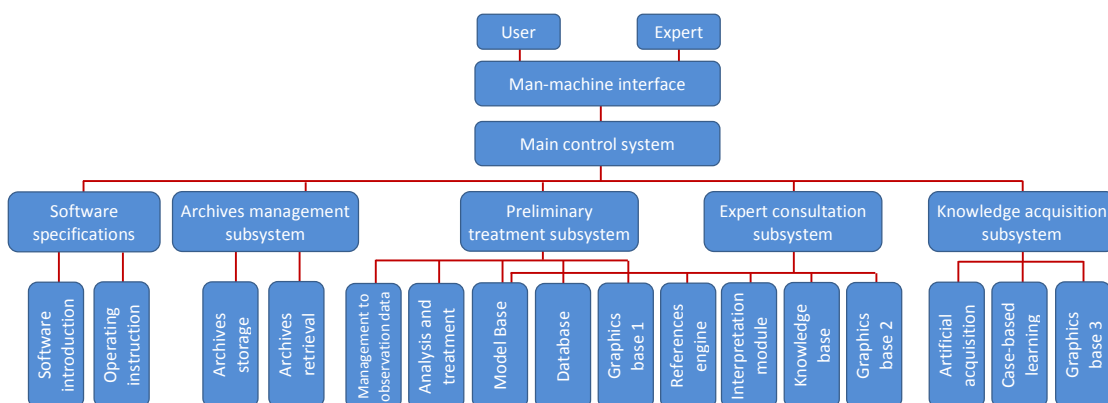


Figura 2.4.- Esquema teórico del sistema EDFDES propuesto por Wu y Qie (2002)

Estos modelos interrelacionan el conocimiento de los expertos (a través de la base de datos), la inteligencia artificial, los análisis numéricos y los recursos computacionales que existen. Esta combinación les convierte en unas herramientas muy interesantes, que normalmente se asocian al análisis de riesgo.

De todas formas, y aunque se les denomina herramientas de diagnóstico, este no es su principal cometido. Solamente se hace una exposición objetiva de hechos, no se hacen valoraciones acerca de qué puede haber causado el daño. La principal función del sistema es el pronóstico, donde se valora cómo el daño afecta a la seguridad y por tanto, se valora si puede darse el fallo o no de la presa.

Por otro lado, existen trabajos como los de Leiro *et al.* (1996) o Fargier *et al.* (2012) que proponen sistemas de diagnóstico de índole más clásica, donde la base del diagnóstico se centra en una serie de actividades que deben permitir al técnico, a través de su juicio, encontrar las causas que dan origen al daño. Esta manera de entender el proceso diagnóstico es la que se desarrolló y se mantiene aún vigente en el mundo de la medicina (Laín, 1988), y es la que también se ha propuesto en ITCOLD (2012).

El trabajo de Leiro *et al.* (1996), centrado en la evaluación de acciones de origen químico que pueden afectar al hormigón de una presa, asegura que un buen estudio patológico de diagnóstico se comprende de las siguientes etapas: estudio de los datos de la presa, estudio de los datos de control de calidad de la presa, inspección visual y toma de muestras, y finalmente trabajos de laboratorio, tal y como puede verse en la figura 2.5. De cada una de estas etapas, el texto hace las consideraciones particulares que se detallan a continuación.

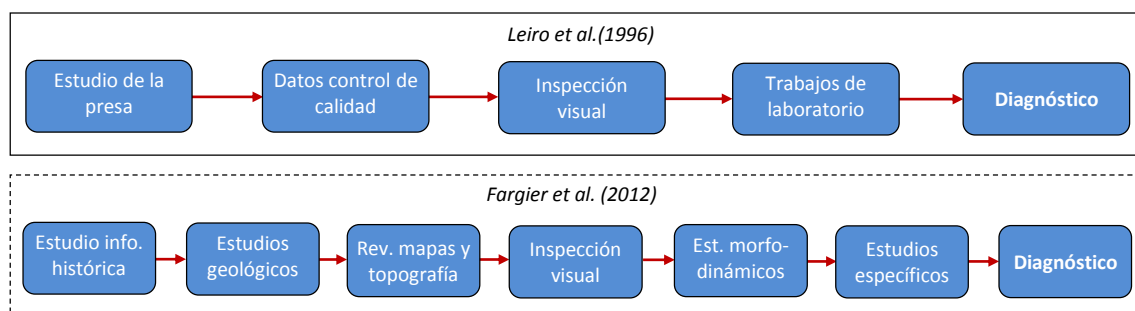


Figura 2.5.- Comparativa de las metodologías de Leiro *et al.* (1996) y Fargier *et al.* (2012)

- *Estudio de la presa.* En esta etapa se deben recopilar los siguientes datos: tipo de presa y situación, año de construcción, cantera y áridos utilizados, tipo de cemento utilizado, su fabricante, dosificación, resistencia característica del hormigón. Este se debe considerar un planteamiento de máximos, porque en ocasiones puede ser difícil obtener datos referentes al cemento y al hormigón.
- *Datos de control de calidad.* En esta etapa se deben recopilar: análisis químicos del árido, cemento y agua de amasado, conjuntamente con las fechas de hormigonado. El texto apunta que esta información puede ser clave para valorar la evolución del daño. De todas formas no se puede olvidar que son datos muy difíciles de

encontrar entre la información que habitualmente se dispone de las presas antiguas.

- *Inspección visual.* Se debe realizar una visita a la presa, revisando el estado general del hormigón. El texto hace especial énfasis en el estudio de las fisuras. La inspección se debe aprovechar para determinar en qué lugares se debe realizar la extracción de testigos que se utilizarán para realizar los análisis de laboratorio.
- *Trabajos de laboratorio.* Es la última etapa considerada. Se deben realizar distintos ensayos de laboratorio a hormigones, áridos, aguas y muestras provenientes del interior de las fisuras. El texto detalla el tipo de ensayos que recomienda para cada uno de estos materiales.

Por su parte, Fargier *et al.* (2012) propone una metodología general de diagnóstico para presas de materiales sueltos y diques que se aplica en Électricité de France (EDF), la principal empresa de generación y distribución eléctrica de Francia. En ella se hace especial énfasis en los estudios específicos para el análisis del cuerpo de presa. Aun así, son interesantes algunas de las reflexiones que hace referentes a las etapas previas a estos estudios específicos. Las etapas, de las que a continuación se hace una breve descripción, son (ver figura 2.5): estudio de la información histórica, estudios geológicos, revisión de mapas y topografía, inspección visual, estudios morfo-dinámicos.

- *Estudio de la información histórica.* Etapa que sirve para conocer cómo se construyó la presa y con qué tipo de materiales. También se debe investigar qué tipo de actuaciones de mantenimiento se han realizado en la estructura.
- *Estudios geológicos.* Se deben estudiar los materiales geológicos de la zona que pudieran haberse utilizado en la construcción de la presa. Esta fase se debe concretar mediante el estudio de mapas y mediante una observación *in situ*.
- *Revisión de mapas y topografía.* Se recomienda el estudio de los planos para ver los puntos por donde puede peligrar la estabilidad, y el riesgo que pueden correr las tuberías que se encuentran en el interior de la estructura. Este tipo de documentación puede ayudar a situar daños detectados en la inspección visual o utilizar sus datos para la realización de modelos numéricos.
- *Inspección visual.* Esta etapa de observación *in situ* de la estructura sirve para confirmar, completar o invalidar la información que se ha recopilado hasta el momento. Se debe revisar la zona de coronación y ambos paramentos.
- *Estudios morfo-dinámicos.* En esta fase se debe comprender como se comporta el embalse (sedimentación, hidrología...) para ver como la evolución del agua puede afectar a la estructura.

No se entra al detalle de las explicaciones que hace Fargier *et al.* (2012) acerca de los estudios específicos porque solamente pueden implementarse en presas de materiales sueltos o diques del mismo tipo de material.

El objetivo que persiguen ambas metodologías es que con estas etapas se consiga la información suficiente para poder emitir un diagnóstico. Sin embargo, para que un técnico de explotación pueda guiarse en su día a día, sería necesario que se detallara como debe realizarse cada una de las tareas, sobretodo, como debe tratarse la información que se consigue recopilar en las distintas etapas cara a dictaminar un diagnóstico.

### 2.3.3.- Valoración del estudio de daños

Según Andriolo (2002), es usual leer en los informes técnicos y documentos relacionados con el mantenimiento de presas expresiones como “... las reparaciones fueron realizadas sin buscarse el origen de los problemas...”, o “... después de varias acciones reparadoras sin éxito, se hizo un análisis de los problemas...”, o “... las averiguaciones no indicaron las causas de los problemas...”.

Si los técnicos son conscientes de la conveniencia de llevar a cabo acciones periódicas para estudiar los daños, como remarca el propio Andriolo (2002), sorprende que el diagnóstico haya recibido, como se ha podido comprobar, una atención menor por parte de la comunidad técnica dedicada a las presas. Además, en los casos que si se ha trabajado en este tema no se ha prestado atención al método de trabajo, por lo que no existe una metodología clara de cómo debe realizarse.

Ante esta realidad, y teniendo en cuenta que en el sector médico, el referente evidente al que se puede recurrir, el diagnóstico es considerado de máxima importancia para la elección de cualquier tipo de tratamiento (valgan como ejemplo, Morgan y Engel, 1971; Laín, 1988; Friedman, 2004; y Carter *et al.*, 2005), es apropiado plantear una propuesta metodológica en esta dirección como la que se hace en el capítulo 3. En ella se enumeraran las actividades que debe comprender un buen diagnóstico, se hará una descripción detallada de los signos y datos que deben estudiarse en cada momento y el trato que se debe dar a la información que estos aportan. Y todo esto, con una numerosa ilustración de casos reales de estudio. Esta conjunción de propiedades hará que sea una metodología sin par en este ámbito que, además, se podría convertir en la base para el estudio de otro tipo de estructuras de hormigón.

Se debe remarcar que en la revisión bibliográfica no se han tenido en cuenta los trabajos relacionados directamente con ensayos de laboratorio y modelos numéricos, aunque por su valor científico, y por lo visual y experimental de sus resultados, son muchos los trabajos de estas características que ya se han desarrollado en el ámbito del diagnóstico. En este documento se les considera, como lo hace la medicina (Balsells, 2010), trabajos complementarios que deben servir para validar o descartar las hipótesis de diagnóstico, lo que sin duda les sigue transfiriendo mucha relevancia, aunque los traslada a una etapa temporal distinta a la que se trata en este documento. Por su naturaleza, este tipo de trabajos no pueden iniciarse hasta que se ha dictaminado la hipótesis. En el caso de

que se inicien antes, y no focalicen bien el objetivo que persiguen, se pueden malgastar unos recursos (no solamente económicos) que podrían utilizarse para otros fines más justificados.

## 2.4.- CAUSAS DE DAÑO EN PRESAS DE HORMIGÓN

Con el objetivo de sentar las bases necesarias para desarrollar una metodología de diagnóstico genérica, se realiza una descripción breve de las principales causas de daño que pueden afectar a una presa de hormigón. La literatura técnica de referencia, entre la que se puede citar New York State-Department of Environmental Conservation (1987), Aguado *et al.* (1996a), Bureau of Reclamation (1997), ITCOLD (1999), Alaejos y Bermudez (2003), Groza y Toda (2011) y British Columbia (2011), considera que estas causas son: reacciones expansivas, ataque por ácidos, erosión por abrasión, erosión por cavitación, ciclos hielo-deshielo, efectos térmicos, acciones (deformación) del macizo rocoso, y la subpresión.

No se toman en consideración los daños que pueden causar fenómenos naturales puntuales (seísmo, oleaje extraordinario...) porque su condición de excepcionales les aleja del régimen ordinario de explotación, cometido principal de este documento.

### Reacciones expansivas

Las reacciones expansivas son una de las causas principales del deterioro del hormigón de presas (British Columbia, 2011). Si se usan áridos reactivos, con el paso del tiempo y en ambientes húmedos, éstos pueden reaccionar con los componentes de la pasta del cemento dando lugar a unos productos que generan una expansión volumétrica. Aunque existen otro tipo de compuestos que pueden generar un incremento de volumen en el interior del hormigón con efectos similares, los áridos son la causa principal y más estudiada de la expansión. En todo caso, la afectación es de carácter crónico (irreversible), es decir, no existe manera de corregirlo a menos que se sustituya la totalidad de hormigón afectado.

Las reacciones químicas que causan la expansión del hormigón se suelen clasificar en dos grandes grupos: reacciones álcali-árido y reacciones sulfáticas (Bureau of Reclamation, 1997; Menéndez, 2007; y Groza y Toda, 2011).

El incremento de volumen causado por estas reacciones genera un nuevo estado tensional que da lugar a una fisuración (mapeada y longitudinal) en el hormigón, quedando afectadas sus propiedades mecánicas. Además de esta fisuración, el ICOLD (1994) señala que los principales signos de daño que pueden observarse en una presa son: la presencia de productos de la reacción (geles y óxidos), movimientos remanentes que pueden ocasionar problemas de operatividad de los elementos móviles (compuertas) o fijos (tapas de pozos), y aumento de filtraciones, sobre todo en galerías. A modo de ejemplo, en la figura 2.6a se presenta el paramento aguas abajo de la presa de Charco del Cura con evidentes signos de daño causados por una reacción álcali-árido.



Figura 2.6.- Daños causados por: a) reacción expansiva; b) erosión; c) efectos térmicos

### Ataque por ácidos

El hormigón de una presa se puede ver afectado por la acción de los ácidos contenidos en aguas cuyo pH es inferior a 7. Según Alaejos y Bermudez (2003) y Groza y Toda (2011) estas aguas generan unas condiciones que propician una reacción ácido-base donde se forman unas sales de calcio que se desprenden de la superficie del hormigón generando productos lixiviados.

El daño causado por este ataque es fácil de identificar. El hormigón, sobre todo el de pequeño espesor, aparece desmenuzado superficialmente, con el árido grueso expuesto, aunque, a diferencia de la abrasión, no se encuentra pulido (Bureau of Reclamation, 1997). Además, pueden formarse depósitos de sal (eflorescencia) que se depositan en las juntas de hormigón o en fisuras existentes, contribuyendo a su progresiva apertura (Groza y Toda, 2011), dando lugar a un aumento de la filtración.

### Erosión por abrasión

La superficie del hormigón puede degradarse por no tener suficiente capacidad de resistir el desgaste por frotamiento y fricción que le puede ocasionar un flujo de agua que transporta arena, gravas, rocas pequeñas u otros elementos, en lo que se conoce como erosión por abrasión. Puede afectar aliviaderos, cuencos de amortiguación y túneles de desagüe. Los factores que, según el ACI (1998), determinan el grado de erosión son:

- La forma, el tamaño, la dureza y la cantidad de partículas transportadas

- La velocidad de circulación del agua
- La calidad y capacidad resistente del hormigón

El principal signo de la abrasión es que la superficie del hormigón está notablemente lisa y desgastada, quedando expuestos los áridos gruesos que aparecen pulidos (Bureau of Reclamation, 1997; y Groza y Toda 2011). La pérdida de material puede ir de pocos centímetros (en el mejor de los casos) hasta llegar incluso a un metro de profundidad (ACI, 1998).

#### Erosión por cavitación

La cavitación es un fenómeno por el cual el agua, cuando circula a gran velocidad por una superficie irregular, puede descomponerse pasando de su estado líquido a vapor. Según el Bureau of Reclamation (1997) y el ACI (1998), el daño se produce si el vapor implota cerca de la superficie de hormigón, donde se forman unos cráteres o coqueras, unos huecos en forma de picadura que son muy característicos de esta tipología de erosión, que además la hacen muy distinguible de la erosión por abrasión.

Los mayores problemas ocasionados por este tipo de erosión, causada básicamente por un mal proyecto o una deficiente ejecución del mismo, se presentan en aliviaderos, dientes de pie de presa, túneles de descargas y tuberías forzadas (Aguado *et al.*, 1996a; y British Columbia, 2011). En la figura 2.6b se muestra la erosión causada por una gran avenida en el aliviadero lateral de la presa de Sant Antoni.

#### Ciclos hielo-deshielo

Si la presa se ubica en un clima frío, donde se suceden las heladas, es posible que el hormigón este dañado por el efecto que causan los ciclos hielo-deshielo. El agua al congelarse aumenta de volumen, si el hormigón presenta un grado de saturación superior al 80%, no existe espacio para absorber la expansión y se generan unas tensiones que degradan la superficie del hormigón, hasta llegar a fisurarla (Alaejos y Bermudez, 2003).

El ICOLD (1994) asegura que es un tipo de envejecimiento progresivo, que se inicia en la superficie del hormigón y que penetra hacia su interior por el efecto acumulativo de los ciclos. Neville (1981) explica que la repetitividad de los ciclos produce un fallo que se asemeja al fallo por fatiga. Sus efectos dependen, según Aguado *et al.* (1996a), de las condiciones de exposición (mayores consecuencias, cuanto más extremas son las condiciones ambientales), de la distribución y del tamaño de poros, y de la velocidad de repetición de los ciclos (a más ciclos, más deterioro del hormigón).

Los signos de daño más evidentes, que son la desintegración de la superficie de hormigón y una ligera fisuración aleatoria, normalmente se presentan en los paramentos aguas abajo, aliviaderos y pasarelas de coronación, las superficies de la presa que más expuestas se encuentran a las inclemencias meteorológicas.



### Efectos térmicos

En fase de explotación, el hormigón en masa de una presa puede verse sometido a unos efectos térmicos que pueden generar un estado tensional similar al de otras sollicitaciones mecánicas o hidráulicas (Aguado *et al.* 1996b). Si la cota de embalse se mantiene relativamente constante, son la temperatura ambiente, la radiación solar e incluso la velocidad del viento quienes condicionan el efecto térmico (Agulló *et al.*, 1995). El gran espesor de la masa de hormigón y su baja conductividad térmica facilita que exista un gradiente de temperatura entre el paramento aguas abajo y el paramento aguas arriba, “protegido” por el agua embalsada (ACI, 1993). Esta situación propicia según Agulló *et al.* (1995) que se generen, en el paramento aguas abajo, unas tensiones autoequilibradas que pueden provocar una serie de fisuras longitudinales sin direcciones predominantes.

La transmisión de carga entre bloques provoca que las deformaciones impedidas y sus consecuentes tensiones den lugar, además de a la fisuración, a unos ligeros movimientos que se recuperan al finalizar el ciclo térmico, por lo que no pueden considerarse movimientos remanentes.

En la figura 2.6c se puede ver la fisuración longitudinal que afecta la parte superior de la presa de Susqueda y que según Rebollo (1992) es causada por un efecto térmico.

### Acciones del macizo rocoso

Siendo la presa una estructura hiperestática, la rigidez del macizo rocoso, donde ésta se apoya (cimientos y estribos), influye no solamente en la deformación de la estructura sino también en la repartición de las fuerzas internas y así en las sollicitaciones sobre la masa de hormigón. Cualquier circunstancia que altere el estado de equilibrio puede, por tanto, generar perjuicios en la presa, Lombardi (1994).

Según Romana (2004) el cuerpo de presa se puede fisurar como consecuencia de que el macizo rocoso experimente una deformación que el hormigón no sea capaz de asimilar. Lo ideal, apunta, es que la presa pueda acomodarse a las deformaciones del terreno sin tener que dejar de prestar servicio. En la misma línea, Gómez (2008) asegura que la deformabilidad de la cerrada es un aspecto de significativa importancia por la evidente posibilidad de que su acción genere fisuras en la presa que propicien la evacuación de agua.

Aunque no son objeto de este estudio, aparte de la acción del macizo rocoso sobre la presa, existen una serie de problemas propios de la cimentación de la presa que no afectan directamente a la estructura, aunque pueden imposibilitar la operatividad de la misma o incluso provocar su colapso.

### La subpresión como efecto amplificador de daños

El empuje que el agua ejerce bajo el hormigón de una presa se debe principalmente a la naturaleza porosa de la estructura. Este empuje también puede darse cuando el agua

se infiltra en el hormigón a través de vías preferentes, como son las fisuras y las juntas de construcción (European Club-ICOLD, 2004).

En las fisuras, la magnitud de subpresión depende de factores como las propiedades de la fisura (altura, la magnitud de la apertura, la rugosidad...), las propiedades de los drenes y el tipo de flujo (University of Colorado, 1993). En todo caso, por pequeño que sea su efecto, este empuje hidrostático impide el cierre de las fisuras e incluso tiende a abrirlas (lo mismo sucede con las juntas), acentuando los movimientos remanentes de nivelación y colimación que ya se hayan podido constatar. A pesar de la importancia que tienen, por tanto, en la seguridad de presas, el registro de la presión intersticial en el cuerpo de presas casi nunca se mide (European Club-ICOLD, 2004), si bien hay una tendencia creciente en esa dirección.

A modo de resumen, en la tabla 2.1 se presentan las distintas causas de daño tratadas en el presente apartado, con sus principales signos de daño asociados, posibles ubicaciones y consecuencias derivadas.

Acción/Causa	Signo	Ubicación	Consecuencias
Reacciones expansivas	Fisuración enramada, movimientos remanentes y productos de las reacciones. Acodamiento de elementos móviles	Cualquier elemento de hormigón	Proceso irreversible que puede afectar a elementos vitales de la presa
Degradación por ácidos	Desmenzamiento y pérdida de material superficie hormigón. Formación depósitos de sal.	Cuerpo de presa, sobre todo en los bordes de paramentos con presencia de agua y aire	Riesgos estructurales bajos
Erosión por abrasión	Perdida de espesos, con una superficie de hormigón lisa, con los áridos gruesos pulidos	Aliviaderos, cuencos de amortiguación y túneles de desagüe	Daños menores en relación a la estabilidad de la presa; posibles problemas en el régimen de explotación
Erosión por cavitación	Coqueras con distribuciones aleatorias; ruidos y vibraciones	Aliviaderos, trampolines de lanzamientos, túneles de descargas, tuberías forzadas y solera y dientes en cuencos de amortiguamiento	Daños menores en relación a la estabilidad de la presa; posibles problemas en el régimen de explotación
Hielo-deshielo	Extensiones en la superficie del hormigón	Paramentos aguas abajo, superficie de coronación y losas de aliviaderos	Riesgos estructurales bajos
Efectos térmicos	Fisuras (sin direcciones predominantes)	Paramento aguas abajo (mayoritariamente) y paramento aguas arriba	Riesgos estructurales significativos
Deformación macizo rocoso	Fisuras longitudinales. Movimientos remanentes	Paramento aguas arriba y aguas abajo. Galerías superiores	Riesgos estructurales significativos
Subpresión	Apertura de juntas y fisuras de construcción. Movimientos remanentes	Cuerpo de presa	Riesgos estructurales significativos

*Tabla 2.1.- Causas de daño asociadas a la explotación ordinaria de presas de hormigón*

## 2.5.- LA PRIORIZACIÓN DE ACTUACIONES EN EL ÁMBITO HIDRÁULICO

Según ICOLD (1987), una estructura es segura cuando está libre de cualquier condición que pueda conducir a su deterioro o destrucción. A partir de esta definición, se deduce que “grado de seguridad” son los márgenes que separan el estado real de una presa de aquellos que la llevan al fallo o destrucción.

La principal preocupación de las instituciones que gestionan las presas ha sido, y es, mantener este margen lo más grande posible, dentro de unos estándares económicos razonables, para garantizar la seguridad. Para evaluar el grado de seguridad se han desarrollado básicamente dos tipologías de estudios: los índices de condición, y los análisis de riesgo, como puede verse en la figura 2.7. Los índices de condición pueden servir como base de los estudios de análisis de riesgo en la categoría determinista.

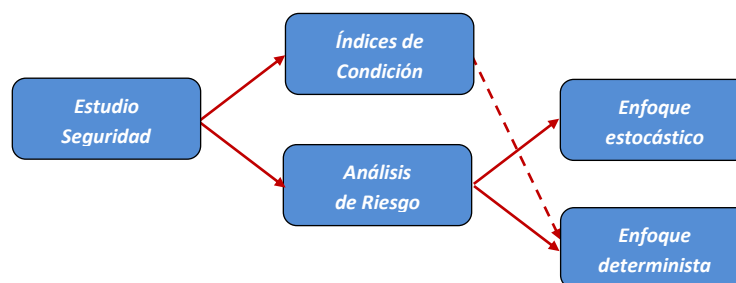


Figura 2.7.- Métodos de estudio de la seguridad en obras hidráulicas

Sin ser sistemas de ayuda a la decisión, estos estudios han actuado como tal. Sus resultados han servido para impulsar, y por tanto priorizar, actuaciones de mantenimiento en aquellos casos en que se ha detectado que se sobrepasa el umbral de seguridad establecido.

### 2.5.1.- Índices de condición

Las metodologías de gestión de infraestructuras, basadas en índices de condición, tienen su origen en el *Índice de Condición de Pavimentos* o metodología PCI, por su nombre en inglés (Shahin, Dartes y Kohn, 1977). Un sistema de análisis ideado para estudiar el estado de conservación de los pavimentos en los campos de aviación.

El sistema, a partir de un estudio detallado del pavimento, evalúa el tipo de daño, la cantidad de daño y la severidad del daño para obtener el valor del PCI, que varía desde 100, para un pavimento que se encuentra en perfecto estado, hasta 0, para un pavimento que se encuentra en estado de fallo, llegando a diferenciar siete niveles de condición (Shahin y Walther, 1990). En la figura 2.8 se presenta un esquema teórico del proceso de evaluación. A pesar de los avances tecnológicos desarrollados desde los años 70, este método sigue siendo el sistema de referencia para la industria aérea (Brotten y De Sombre, 2001).

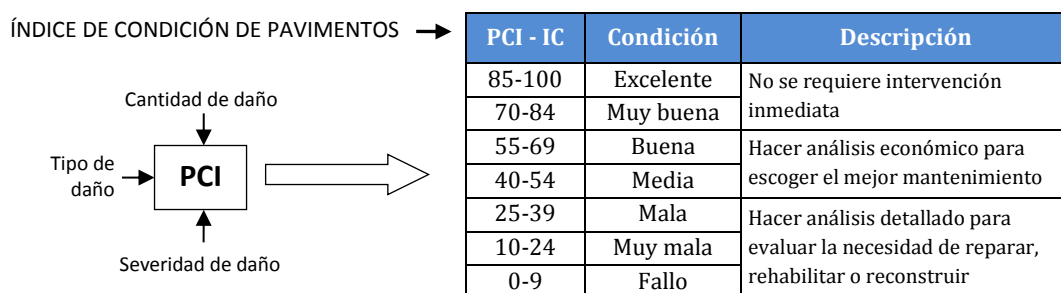


Figura 2.8.- Desarrollo conceptual del PCI (adaptado de Shahin y Walther, 1990)

Índice de Condición del U.S. Army Corps of Engineers

Tomando como referencia clara el PCI, el U.S. Army Corps of Engineers desarrolló un Índice de Condición (IC) para evaluar el estado del hormigón del cuerpo de presas, incluidos los aliviaderos (Bullock y Folz, 1995), y otro de particular para evaluar el estado de conservación de las compuertas (Greimann *et al.* 1995), al entenderse que no era posible desarrollar un sistema único de evaluación. La escala de valores utilizada para el análisis en ambos sistema es idéntica a la desarrollada para el PCI, presentada en la figura 2.8.

El sistema de Bullock y Folz (1995) define el nivel de conservación del cuerpo de presas identificando 18 posibles categorías de daño, agrupadas en 5 grandes grupos: desalineaciones (1), fisuras (9), pérdida de volumen (6), degradación del acero (1) y filtraciones (1). Dependiendo de la intensidad de cada daño se asigna una puntuación (DV) a cada una de las categorías. En algunos casos la asignación es directa y en otros se evalúa, a través de un ábaco, el porcentaje de hormigón afectado y el porcentaje de pérdida de sección. La puntuación es mayor cuanto más daño. El valor final de IC se calcula mediante la ecuación 2.1.

$$IC = 100 - [DV_1 + (0,4) \cdot DV_2 + (0,2) \cdot DV_3 + (0,15) \cdot DV_4 + (0,1) \cdot DV_5] \quad [ec. 2.1]$$

donde DV<sub>1</sub>= valor deducido de daño más alto  
 DV<sub>5</sub>= valor deducido de daño más bajo

Aunque teóricamente se debe identificar que parte de la presa está afectada (paramento aguas arriba, paramento aguas abajo, pilares, aliviadero...), esta información no se utiliza en la evaluación. Por tanto, no se tiene en cuenta la trascendencia del elemento que está afectado, aunque no deja de ser un dato relevante. Al considerar únicamente la tipología de daño y su intensidad se hace difícil comparar la afectación que puede suponer un mismo daño en dos elementos estructurales de hormigón de índole muy diversa, como puede ser, por ejemplo, el cuenco amortiguador de la presa y la toma de agua.

Un complejo hidráulico no está compuesto únicamente por elementos de hormigón, y la excesiva concreción del sistema de evaluación en este tipo de estructuras

hace que no pueda utilizarse para evaluar los daños que pueden aparecer en los estribos, en el vaso o en los órganos auxiliares, como son las compuertas.

Precisamente para paliar este déficit se desarrolló el sistema de Greimann *et al.* (1995) para la evaluación del estado de conservación de las compuertas, un procedimiento conceptualmente muy diferente al anterior. En este caso se identifican 10 categorías de daños: ruido y vibraciones, vibraciones con flujo, desalineación, deterioro del anclaje, fisuras, corrosión y erosión, filtraciones, desgaste de cables, abolladuras, y deterioro del muñón de giro. Para cada una de las categorías se calcula un IC, en función del nivel de daño. El IC global de la compuerta se calcula mediante la ecuación 2.2.

$$IC = \frac{1}{100} \cdot (W_1 \cdot IC_1 + W_2 \cdot IC_2 + \dots + W_n \cdot IC_n) = \frac{1}{100} \sum_1^n W_i \cdot IC_i \quad [\text{ec. 2.2}]$$

donde  $n$  = número de categorías de daño registradas

$W_i$  = peso correspondiente al IC  $i$ ésimo. Depende de  $n$

Aunque la escala de valores utilizada para determinar el nivel de deterioro y la necesidad de actuación sea la misma, tal y como ya se ha comentado, no se pueden comparar los valores obtenidos por el sistema de Bullock y Folz (1995) y el de Greimann *et al.* (1995) porque se tienen en cuenta conceptos muy diferentes, tanto en número como en forma. De hacerlo, se daría por sentado que estos valores también se pueden comparar con los del PCI utilizado para evaluar pavimentos y, en cambio, en este caso tal comparación se entiende como impropia.

Estos sistemas se centran en el estudio de la estructura. Su naturaleza imposibilita que evalúen las afecciones derivadas que pueden ocasionar los daños detectados en otros elementos, sean de la propia presa o del entorno. Esta es una carencia considerable, a tener en cuenta, cuando se pretende utilizar este tipo de sistemas como herramientas de ayuda a la decisión.

Otra limitación de ambos sistemas es que no hacen una valoración económica de la situación. No se analizan las pérdidas que puede suponer el deterioro en la explotación hidráulica ni tampoco se valora qué puede costar realizar una actuación correctora. Solamente en el caso que el IC se encuentre entre 40 y 55 puntos se hace un estudio económico para seleccionar la actuación a nivel de costes.

Por lo tanto, como ya se ha apuntado, estos sistemas no son adecuados para priorizar actuaciones, sobretodo en el caso en que se deban comparar tipologías estructurales diversas. Sirven básicamente para comprender en qué situación se encuentran las estructuras y sus componentes.

### Índice de Daño del Hydro-Québec

El Hydro-Québec, uno de los mayores productores de energía hidroeléctrica del mundo, carecía, a principios del s.XXI, de un sistema de evaluación de daños en presas.

Hasta ese momento, eran los ingenieros, a través de su juicio experto, los que determinaban si una actuación era o no pertinente. Con la determinación del *Índice de Daño* (Saleh *et al.* 2003; y Mosser, 2004), se trató de impulsar un sistema que evaluara la conveniencia de una intervención, mediante el análisis objetivo y consistente de los daños presentes en una presa de hormigón.

Aunque el Ministerio de Transportes del Quebec desarrolló un sistema de evaluación de daños para todo tipo de estructuras (Drapeau y Bélanger, 1995), se decidió no utilizarlo como base del nuevo sistema. Sus principales inconvenientes son que el sistema no es capaz de integrar las dos variables que utiliza para tomar la decisión y, sobretodo, que no permite comparar la importancia de los daños presentes en estructuras diversas (Mosser, 2004), sirviendo solamente para comparar la importancia de los daños entre los elementos de una misma estructura.

El *Índice de Daño* ( $I_E$ ) se fundamenta en el IC de Bullock y Folz (1995). Como sus predecesores, el  $I_E$  es un valor numérico que se comprende entre 0 y 100, y el estado del hormigón se caracteriza con el criterio del PCI, según la tabla de la figura 2.8.

El  $I_E$  es el resultado de evaluar 5 parámetros para cada tipología de daño que afecta a un subelemento estructural: índice de estructura ( $I_S$ ), el índice de degradación ( $I_D$ ), el índice de calidad ( $I_Q$ ), el índice de medida ( $I_M$ ), y el índice de fenómeno ( $I_P$ ). Todos ellos se relacionan según la ecuación 2.3. Todas las variables reciben una puntuación que va de 0 (sin importancia) a 100 (máxima importancia), excepto el  $I_P$ , que se puntúa de 0 a 1. Según Mosser (2004) las puntuaciones no son públicas por razones de confidencialidad.

$$I_E = 100 - [f(I_S, I_D, I_Q, I_M) \cdot I_P] \quad [\text{ec. 2.3}]$$

El *Índice de estructura* ( $I_S$ ) evalúa, a priori, la importancia relativa de un subelemento estructural afectado, a partir de la tipología, la dimensión y su funcionalidad. Se consideran 27 tipos de subelementos, agrupados en 4 grandes grupos (presa, aliviadero, toma de agua, y central), según explica Saleh *et al.* (2003). Esta variable genera un sesgo inicial innecesario, otorgando mayor importancia a unos elementos estructurales sin que quede demostrado que su afectación es más relevante que la de otros. A modo de ejemplo, se puede decir que es irrelevante que la presa sea de gravedad o de contrafuertes en un caso de filtraciones en el cuerpo de presa.

El *Índice de degradación* ( $I_D$ ) evalúa la importancia del tipo de signo de deterioro identificado en el hormigón de la presa. En este caso se diferencia 15 tipologías de afectación. Como en el caso anterior asignar un valor mayor o menor solamente por una etiqueta no parece muy razonable, porque lo importante no es el tipo de deterioro, sino los efectos que causa.

El *Índice de calidad* ( $I_Q$ ) evalúa la importancia de la afectación caracterizando, mediante atributos, las 15 tipologías enumeradas en el  $I_D$ . La caracterización es particular para cada categoría y se hace en base al trabajo desarrollado por Fortin *et al.* (1995). La

diferenciación que se establece de cada categoría hace complicado que se puedan comparar los valores que se obtienen.

El *Índice de medida* ( $I_M$ ) evalúa la importancia de los valores de degradación medidos. También en este indicador se distinguen las 15 categorías establecidas en el  $I_D$ . A alguna categoría se le asigna la puntuación evaluando dos variables, por ejemplo, las fisuras, donde se valora profundidad y longitud; y en otras solamente se evalúa una variable, por ejemplo, la zona de hormigón reparada, donde solamente se valora si es pequeña, mediana o grande.

Finalmente, el *Índice de fenómeno* ( $I_P$ ) evalúa el tipo de consecuencia que puede ocasionar el daño analizado en el comportamiento estructural del elemento afectado. Este indicador diferencia entre 4 posibles consecuencias: problemas de estabilidad, funcionalidad, estanquidad y estéticos. La misión del  $I_P$  es ponderar el resto de índices, permitiendo que el valor final del  $I_E$  se encuentre entre 0 y 100.

Para cada tipología de daño que afecta a un subelemento debe calcularse el *Valor Deducible Ponderado* de degradación (VDP) a partir de la ecuación 2.4. Con el VDP de cada tipología de daño, y con unos complejos sumatorios que se detallan en Mosser (2004), se pueden calcular sucesivamente el índice de daño de cada subelemento ( $I_{ES}$ ), el índice de daño de los distintos elementos estructurales ( $I_{EC}$ ), y finalmente, el índice de daño de todo el complejo hidráulico ( $I_{EB}$ ).

$$VDP = 0,25 \cdot (I_S + I_D + I_Q + I_M) \cdot I_P \quad [\text{ec. 2.4}]$$

Para pasar de un nivel de cálculo a otro (de tipologías de daño a subelemento, de subelemento a elemento, o de elemento a todo el conjunto) solamente se utilizan los 5 valores de daño calculados más elevados de cada nivel. Esto significa que, si el trabajo se hace con rigor, centenares de evaluaciones se pierden a lo largo del proceso, quedando sin valor y descapitalizándose el esfuerzo realizado.

Aunque la gran especificidad del sistema permita hacer una valoración de gran detalle ésta no se amortiza de forma adecuada. Además, la excesiva concreción en el análisis provoca que la evaluación, que al final acaba siendo muy genérica, se realice con conceptos excesivamente particulares a cada tipología de afección, provocando que cuando deben compararse o sumarse índices de daño (en cualquier nivel) se mezclen valores heterogéneos que nada tienen que ver los unos con los otros.

Otro gran inconveniente de este sistema es que tiene dos índices ( $I_s$  y  $I_d$ ), como ya se ha comentado, que no valoran el daño por el deterioro que causa en la estructura. Estos índices simplemente valoran conceptos teóricos preconcebidos que pueden conducir a un análisis global erróneo. Desde un punto de vista teórico, para evitar errores, estos dos índices imposibilitan la comparación entre subelementos diferentes y entre tipologías de daño diversas.

Del mismo modo que el resto de índices de condición, el  $I_E$  no realiza la evaluación de consecuencias. Solamente pretende evaluar la integridad física y el comportamiento de la estructura.

### 2.5.2.- Análisis de riesgos

El análisis de riesgo ha sido la metodología principal y de referencia en el estudio de la seguridad. Son muchos los trabajos de esta índole que ya se han publicado (Hennig *et al.*, 1997; Bowles *et al.*, 1997; Fell *et al.*, 2000; Bowles, 2001; Scott, 2011; Altarejos-García *et al.* 2012; y SPANCOLD, 2013). El riesgo se define, según el ICOLD (2005), como una medida de la probabilidad y severidad de los efectos de un evento adverso sobre la vida, la salud, la propiedad pública o privada, o el medio ambiente.

#### Métodos estocásticos

El enfoque estocástico del análisis de riesgo utiliza, en todas sus variantes teóricas, unas expresiones de cálculo muy similares, aun cuando presentan matices particulares que se revelan como sello de identidad de quien las ha desarrollado. A modo de ejemplo en la ecuación 2.5 se presenta la utilizada por el United States Bureau of Reclamation (Cyganiwicz y Smart, 2000) por ser una de las más clásicas y representativas.

$$Riesgo = P(carga) * P(fallo/carga) * Consecuencias \quad [ec. 2.5]$$

Donde se combinan 2 tipos de probabilidades: la probabilidad de que se manifieste una carga,  $P(carga)$ , y la probabilidad condicionada del fallo de la presa dada cierta carga,  $P(fallo/carga)$ ; con las *Consecuencias* negativas que pueden darse en el entorno.

Este tipo de enfoque no se adapta a las necesidades de la gobernanza corriente de las obras hidráulicas<sup>1</sup>. Existe la limitación de que todo cálculo de riesgo se asocia a eventos o cargas que ocasionan una rotura o fallo de la presa (ICOLD, 2005). Es cierto que en el caso de que se dé el colapso de la estructura, las consecuencias van a ser dramáticas, pero no es menos cierto, como indica Alonso y Zaragoza (2001) que la probabilidad de que se dé esta circunstancia es baja (del 2% en las presas construidas antes de 1950; 0,5% para presas construidas en el período 1951-1980; y del 0,2% en las construidas en los últimos 30 años).

El mismo ICOLD (2005) reconoce también que este tipo de evaluaciones no es tarea fácil, sobre todo para técnicos que necesitan y buscan métodos simples y puramente cuantitativos. Por esta razón, recomienda incluso el acercamiento a un entorno más subjetivo como el de los análisis o juicios de valor.

---

<sup>1</sup> Así lo manifestaron los responsables de la Dirección General de Agua en la Jornada Técnica de Gobernanza y Priorización de Inversiones en Infraestructuras (11/12/2012) organizada por SPANCOLD en el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.



### Métodos deterministas

Conscientes de la complejidad conceptual y procedimental de estos cálculos, el Bureau of Reclamation y Army Corps of Engineers (2010) afirma que es posible transformar el enfoque estocástico en un enfoque determinista, utilizando métodos cualitativos o semicuantitativos, cuando se deben evaluar de forma rápida una serie de casos para decidir qué actuaciones de reducción del riesgo deben realizarse con prioridad. Esta institución, dependiente del Ministerio del Interior de los E.E.U.U., obtiene la severidad del riesgo en una presa relacionando la probabilidad de fallo de un evento,  $P(\text{fallo})$ , con las consecuencias sobre ciudadanos y medioambiente que puede causar el fallo (ver ecuación 2.6), convirtiendo el enfoque estocástico en determinista.

$$\text{Riesgo} = P(\text{fallo}) * \text{Consecuencias} \quad [\text{ec. 2.6}]$$

donde:  $P(\text{fallo})$  puede ser baja, moderada, alta o muy alta

Consecuencias pueden ser Nivel 1 (mínimo), Nivel 2, Nivel 3 o Nivel 4 (máximo)

Para evaluar el nivel de riesgo desarrollaron una matriz (ver figura 2.9) donde en el eje vertical aparece la probabilidad de fallo y las consecuencias en el eje horizontal. Dependiendo de la zona de la matriz donde se sitúe el caso de estudio, a éste se le asigna un nivel más alto o más bajo de preferencia. El problema de un sistema tan general es que pueden situarse en el mismo nivel de preferencia gran cantidad de daños. Por tanto, este método puede servir para hacer una primera clasificación aunque no permita detallar un orden exacto de preferencia.

$P(\text{fallo})$	Muy alto			
	Alto			
	Moderado			
	Bajo	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
		<i>Consecuencias</i>		

Figura 2.9.- Matriz de Riesgo (Bureau of Reclamation y Army Corps of Engineers, 2010)

En esta dirección, ENDESA, mediante Conesa (2010), desarrolló, con el soporte de la UPC, un sistema determinista sencillo para evaluar el riesgo que ciertos elementos de una instalación pueden suponer para la sociedad y el entorno, natural y construido. A tal fin, definió el *Índice de riesgo* ( $I_R$ ) según la ecuación 2.7. El método divide los elementos a estudiar en 5 familias de riesgo: presa, canales, tuberías, galerías y compuertas.

$$I_R = (100 - I_E) \times F_C \quad [\text{ec. 2.7}]$$

donde:  $I_E$  = Índice de estado, basado en los índices de condición

$F_C$  = Factor de consecuencias

El *Índice de estado* ( $I_E$ ), que quiere representar la probabilidad de fallo de la ecuación 2.6, se basa en los valores deducibles (VD) del método de Bullock y Folz (1995), aunque el sistema de cálculo, el número de VD considerados, y el peso de cada VD, es diferente según el grupo al que pertenece el elemento estructural analizado. Aun así, el valor del  $I_E$  siempre oscila entre 0 (elemento en estado inmejorable) y 100 (elemento en estado de fallo).

El *Factor de consecuencias* ( $F_c$ ) sirve para valorar las repercusiones que se pueden dar si el elemento estudiado falla. Este método valora con una puntuación que va de 1 a 10, según la tabla 2.2, las consecuencias que pueden afectar a la población, al medio ambiente, a las infraestructuras y a la funcionalidad de la propia instalación.

El resultado final del  $F_c$  se obtiene mediante el sumatorio que se presenta en la ecuación 2.8.

$$F_c = \delta_1 F_{c1} + \delta_2 F_{c2} + \delta_3 F_{c3} + \delta_4 F_{c4} \quad [\text{ec. 2.8}]$$

donde:  $\delta_i$  = Pesos del indicador y de las consecuencias (no publicados por razones de confidencialidad)

	Consecuencias				
Sobre Población ( $F_{c1}$ )	Certeza de pérdida de vidas humanas.	Alta probabilidad de pérdida de vidas humanas	Baja probabilidad de pérdida de vidas humanas	No es probable la pérdida de vidas humanas	No hay víctimas humanas
Sobre el medio ambiente ( $F_{c2}$ )	La recuperación ambiental es prácticamente imposible. Los costes de restitución son muy altos. Zonas naturales de especial interés y/o con figuras de protección específicas	La recuperación ambiental tarda más de 3 años. Los costes de restitución son altos. Zonas naturales de especial interés y/o con figuras de protección específicas de rango menor.	La recuperación ambiental tarda entre 1 y 2 años. Los costes de restitución son altos.	La recuperación ambiental se produce en un plazo de tiempo inferior a 1 año. Los costes de restitución son medios.	La recuperación ambiental se produce a corto plazo. Los costes de restitución son reducidos.
			Zonas sin figura de protección ambiental específica.		
Sobre infraestructuras y servicios ( $F_{c3}$ )	Interrupción de servicios básicos y accesibilidad a nivel regional-nacional	Interrupción de servicios básicos y accesibilidad a nivel regional	Interrupción de servicios básicos y accesibilidad a nivel local-regional de forma transitoria	Interrupción de servicios básicos y accesibilidad local de forma puntual.	No hay interrupción de servicios básicos o de accesibilidad.
Sobra la propia instalación ( $F_{c4}$ )	Instalaciones con graves daños o en colapso. Interrupción de la producción por período de tiempo indefinido y muy altos costes de reposición.	Instalaciones dañadas y/o con riesgo de colapso. Funcionalidad con estrictas limitaciones a la explotación. Producción sujeta a severas restricciones y/o paros temporales	Instalaciones dañadas y/o sin riesgo de colapso. Funcionalidad con limitaciones a la explotación. Producción sujeta a ciertas restricciones.	Instalaciones con daños menores, con alguna afección a su funcionalidad. Producción sujeta a limitaciones ocasionales.	La funcionalidad de las instalaciones no está afectada. No se interrumpe la producción.
			Muy altas (10-9 p)	Altas (8-7 p)	Medias (6-5 p)

Tabla 2.2.- Indicadores para la obtención del  $F_c$  (adaptada de Conesa, 2010)

El sistema utilizado para valorar las consecuencias, aunque es sencillo y muy cualitativo, se debe valorar por incorporar en el análisis dos ámbitos nuevos, el de las infraestructuras y el de la funcionalidad de la instalación.

Al valorar de forma simultánea el índice de estado y las consecuencias, el índice de riesgo ( $I_R$ ) sirve para tomar de modo más consciente decisiones en las que solamente se comparen  $I_R$  de elementos que se encuentren en la misma familia de riesgo. Como en el caso de los métodos basados en los índices de condición, la particularidad en el cálculo del  $I_E$  hace que no puedan compararse los valores obtenidos para los elementos que se encuentran en familias distintas.

### **2.5.3.- Valoración de la priorización de actuaciones en el ámbito hidráulico**

Los distintos trabajos presentados a lo largo del presente apartado demuestran la evidente necesidad que tiene la comunidad técnica de contar con una metodología de análisis global que ayude a decidir qué actuaciones de mantenimiento ordinarias deben considerarse prioritarias de entre las múltiples y diversas que puede llegar a considerar un gestor de presas para garantizar la seguridad del complejo. Se necesita un sistema único para evaluar todo tipo de daños.

Teniendo en cuenta que el principal objetivo de la metodología debe ser ayudar a tomar una decisión, es razonable desarrollarla en base a un sistema multicriterio, precisamente de ayuda a la decisión, tal y como se hace en el capítulo 5 de esta tesis, una opción que de forma explícita no se había contemplado hasta la fecha.

## **2.6.- MIVES, UN SISTEMA DE AYUDA A LA DECISIÓN**

Desde tiempos remotos son muchas las ocasiones en que los individuos se encuentran ante un número discreto de alternativas entre las que deben seleccionar, según su juicio experto, la que mejor respuesta ofrece a sus necesidades o demandas. La creciente exigencia de los decisores y los avances teóricos desarrollados en el mundo de las ciencias han contribuido al desarrollo de distintas metodologías de ayuda a la decisión. De las más simples, basadas en un único criterio de elección, a las más complejas, basadas en varios criterios (sistemas multicriterio, MCDM).

Los sistemas multicriterio dotan al decisor de una herramienta que le permite considerar a la vez diferentes variables fundamentales en la decisión. El objetivo que persiguen es seleccionar la alternativa de compromiso que a nivel general mejor se ajuste a las demandas de quien tiene la responsabilidad de decidir, permitiendo, incluso, incorporar las demandas o sensibilidades de diferentes actores sociales.

En ningún caso estos sistemas pueden decidir por sí solos, simplemente ayudan a estructurar las ideas y a facilitar el cálculo a través de distintos algoritmos. La decisión se toma cuando se escogen las variables que se miden y el peso relativo que se asigna a cada

una de ellas, proceso racional que es totalmente independiente de la herramienta de soporte utilizada.

De las numerosas herramientas de ayuda a la decisión que existen según Kabir *et al.* (2013), esta tesis ha optado por utilizar el sistema MIVES, Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones Sostenibles, surgido del proyecto MAT 2002-04310. MIVES es un sistema de ayuda a la decisión concebido para el ámbito de la construcción de edificios industriales y posteriormente para cualquier tipo de decisión, cuyo objetivo es valorar de una forma integrada todos los aspectos que intervienen en el desarrollo sostenible (San-Jose y Garrucho, 2010; Aguado *et al.*, 2011; Aguado *et al.*, 2012; Pons y Aguado, 2012; y Pons y Fuente, 2013).

La gran ventaja de MIVES es que es el único modelo que combina la toma de decisiones multicriterio (MCDM) y la teoría de la utilidad multiatributo (MAUT) en términos de estandarización de unidades diversas, al incorporar al análisis el concepto de función de valor (Alarcón *et al.* 2010). Una función matemática única que permite convertir las variables cualitativas y cuantitativas, con sus diferentes unidades y escalas, a una escala única que va de 0 a 1 (valores que representan, respectivamente, el mínimo y máximo grado de satisfacción del decisor). De esta manera se pueden sumar los resultados obtenidos de las distintas variables medidas y obtener un único valor para cada una de las alternativas estudiadas.

La configuración del modelo de decisión consta de cuatro etapas. El proceso se inicia con la identificación de un problema y la definición precisa de la decisión que se debe tomar. Para organizar y estructurar los conceptos a evaluar se desarrolla un árbol de decisión, como el que se presenta en la figura 2.10. En el primer nivel de la ramificación se encuentran los requerimientos, que responden a los aspectos más generales; en niveles intermedios se sitúan los criterios, y en el último nivel los indicadores, que van a ser valorados directamente.

Dentro de cada nivel debe establecerse un grado de importancia entre los distintos aspectos que lo configuran, determinando un valor porcentual para cada uno de ellos, de tal manera que el sumatorio de los valores asignados a los aspectos de un mismo nivel sea igual a 100. La asignación de pesos se realiza o bien de forma directa o mediante la utilización del sistema Analytic Hierarchy Process (Saaty, 1980).

A cada uno de los indicadores del árbol se le asigna una función de valor que debe reproducir para ese concepto la voluntad del decisor. La definición conceptual del indicador y las variables utilizadas para medirlo van a condicionar absolutamente la función en su forma y en su intervalo.

La expresión utilizada en MIVES para definir la función de valor depende de 5 parámetros (Alarcón *et al.* 2010), cuya variación permite obtener todo tipo de funciones, como puede verse en la figura 2.11: lineales, en forma de S, convexas o cóncavas, según determine el decisor. Los parámetros que definen el tipo de función son:  $X_{\min}$ ,  $X_{\max}$ , P, C, y K

(ecuación 2.9 para funciones crecientes). El valor de B que aparece en la ecuación 2.9 se calcula partiendo de los 5 valores anteriores (ecuación 2.10).

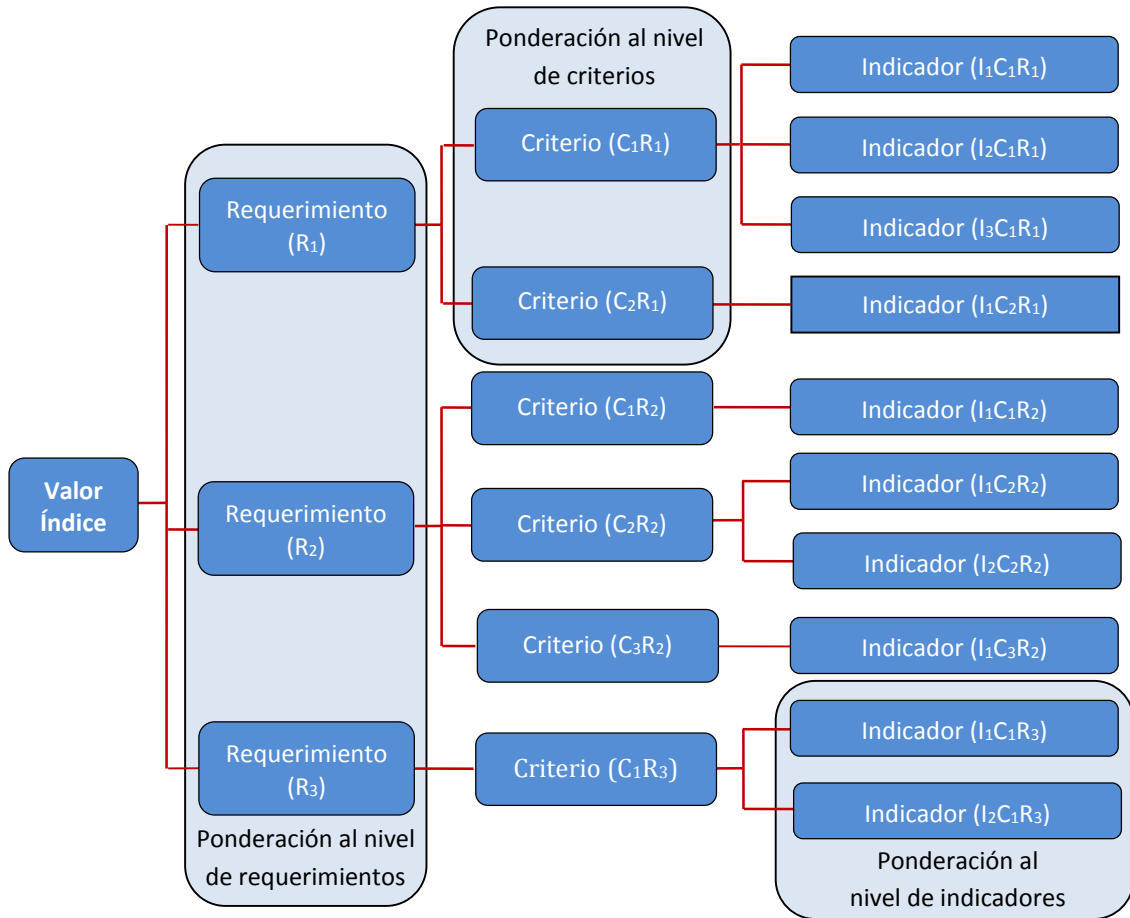


Figura 2.10.- Estructura de un árbol de decisión genérico

$$VI = B * \left[ 1 - e^{-K * \left( \frac{|X - X_{\min}|}{c} \right)^P} \right] \quad [\text{ec. 2.9}]$$

donde:  $X_{\min}$  es la abscisa mínima del intervalo en el que se mueven las actuaciones para el indicador evaluado.

- X es la cuantificación del indicador evaluado (diferente o no, para cada actuación).
- P es un factor de forma que define si la curva es cóncava, convexa, lineal o en forma de "S", obteniéndose curvas cóncavas para valores de  $P_i < 1$ , convexas o en forma de "S" si  $P_i > 1$  y próximas a rectas para valores  $P_i = 1$ . Además, determina de forma aproximada la pendiente de la curva en el punto de inflexión.
- C se aproxima a la abscisa del punto de inflexión.
- K se aproxima a la ordenada del punto de inflexión.

B es el factor que permite que la función se mantenga en el rango de valor de 0 a 1. Este factor viene definido por la ecuación 2.10.

$$B = \left[ 1 - e^{-K \cdot \left( \frac{X_{\max} - X_{\min}}{c} \right)^p} \right]^{-1} \quad [\text{ec. 2.10}]$$

siendo  $X_{\max}$  la abscisa del indicador que genera un valor igual a 1 (en el caso de funciones de valor crecientes).

Alternativamente se pueden utilizar funciones decrecientes, esto es, que adopten el valor máximo en  $X_{\min}$ . La única diferencia de la función de valor es que se substituye la variable  $X_{\min}$  por la variable  $X_{\max}$  adaptando la expresión matemática correspondiente.

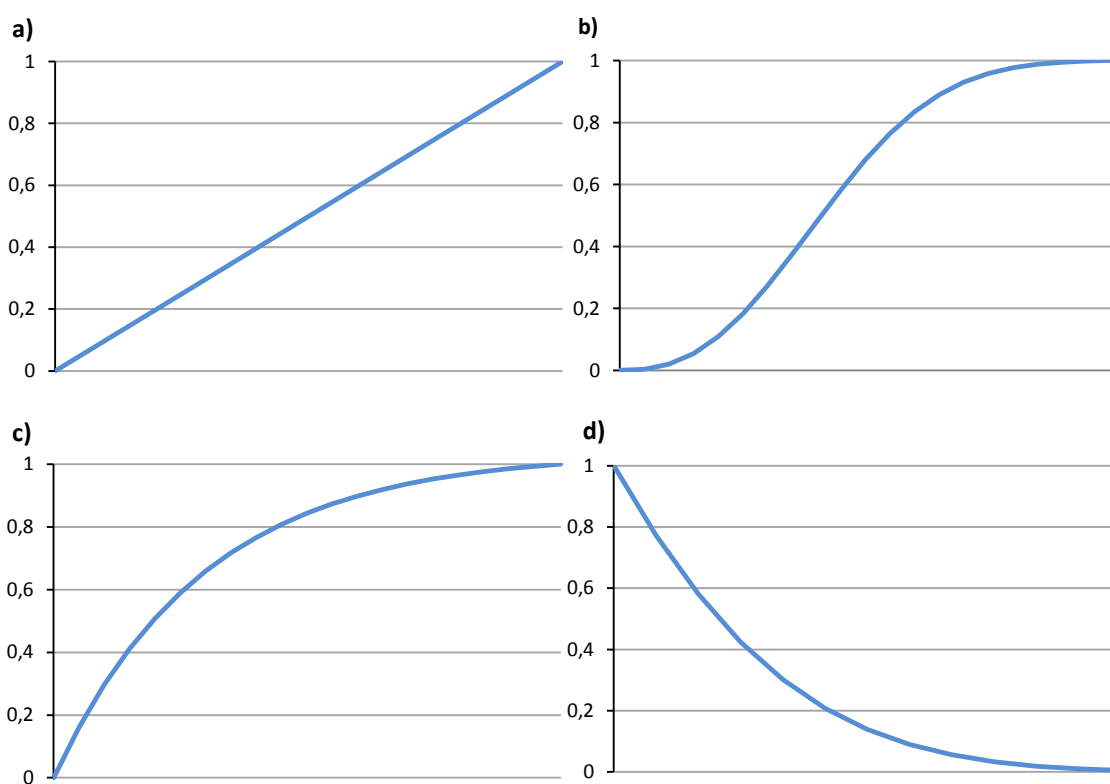


Figura 2.11.- Formas de las funciones; a) lineal; b) S; c) convexa y d) cóncava (decreciente)

Se trabaja con funciones que no presentan máximos y mínimos en el intervalo considerado porque no se quiere que dos cuantificaciones diferentes de un indicador sirvan para encontrar un mismo valor de éste. La gran ventaja de la función de valor de MIVES es que todos los parámetros que intervienen en su definición tienen un sentido físico, lo que la convierte en una función manejable y comprensible para cualquier tipo de usuario.

Con la definición de la función de valor para cada uno de los indicadores se cierra el proceso de configuración del modelo. A partir de ese instante solamente debe valorarse el conjunto de alternativas que se desee analizar. El procedimiento de evaluación se inicia con el cálculo del valor de todos los indicadores de una alternativa. El valor obtenido de

cada indicador, que debe oscilar entre 0 y 1, se multiplica en cascada por el peso asignado al propio indicador, por el peso del criterio al que pertenece y, finalmente, por el peso del requerimiento del que depende el criterio. El valor final de la alternativa se obtiene de sumar el valor de todos los indicadores cuando ya se les ha aplicado los pesos correspondientes. Los resultados numéricos son fáciles de obtener y de analizar, posibilitando los análisis comparativos.

Hasta ahora, el método MIVES ha servido para evaluar diversas alternativas de diseño que sirven para resolver el problema planteado, comparándose en todo momento soluciones homogéneas que presentan características muy similares, que pueden analizarse fácilmente con las mismas variables. En el caso que ocupa esta tesis, en cambio, los problemas planteados y por ende las soluciones a comparar son muy diferentes. Es necesario, por tanto, adaptar el método MIVES mediante la incorporación de alguna variante conceptual para poderlo utilizar en casos en que las alternativas a comparar no son homogéneas, sino heterogéneas.

## CAPÍTULO 3

# DIAGNÓSTICO DEL DAÑO

### 3.1.- INTRODUCCIÓN

Como en un ser vivo, un daño estructural puede entenderse, en última instancia, como el fracaso de la estructura en la lucha contra elementos internos o externos que la intentan agredir. Su detección da inicio a un proceso racional llamado diagnóstico. Este debe responder, también, en ingeniería hidráulica a dos claros objetivos: el primero, definir la naturaleza del proceso dañino en términos científicos -definir la *causa*-; y el segundo, determinar las consecuencias que el daño puede ocasionar en el elemento que lo padece, Feinstein (1967)<sup>1</sup>.

Así, el diagnóstico debe entenderse como un análisis sistemático de los signos físicos registrados en la presa. Los resultados obtenidos deben compararse, en primer lugar, con los estados establecidos como normales por la ingeniería; y, en segundo lugar, con el estado original de la presa. En este proceso racional ningún detalle es insignificante, tal y como indica Dunphy y Botsford (1956), más si se tienen en cuenta las múltiples variables que intervienen. El juicio correcto descansa a menudo en balancear cuidadosamente todas las posibilidades.

---

<sup>1</sup> A pesar de su antigüedad, la obra de Feinstein hoy aún es de las más referenciadas en clínica médica. Talavera y Rivas-Ruiz (2012), apunta que todo médico sensato debería conocerla y aplicarla.



El diagnóstico del daño es, sin duda, uno de los mayores retos para la ingeniería del siglo XXI. La ausencia de trabajos generales de esta índole en el ámbito de presas, que se demostró en el capítulo 2, promueve que el objetivo del presente capítulo sea establecer un razonamiento lógico que garantice un proceder riguroso en la identificación y evaluación de la/s causa/s que produce/n el deterioro o daño, aprovechando las técnicas ya existentes.

El documento pretende determinar y explicar la secuencia en que deben ordenarse todas las tareas que conforman el diagnóstico racional. Al trabajarse con el conocimiento, este proceso acostumbra a ser delicado, según apunta Williams (2009), porque a pesar de estar constituido por pocas actividades, estas son, normalmente, dependientes unas de otras.

En una era donde la modernidad tecnológica es la esencia del nuevo conocimiento, el lector se puede preguntar cuál es, en su esencia más clásica, el papel del diagnóstico. Se podría pensar que éste es un procedimiento obsoleto, con tendencia al desuso. Sin embargo, los grandes avances tecnológicos, tanto a nivel de estudios de laboratorio como a nivel de estudios numéricos, no pueden sustituirlo, pues son un complemento para este juicio racional. Solamente se puede realizar la primera hipótesis de diagnóstico cuando se supone conocido el origen de la patología<sup>2</sup> estructural. Esta es la que va a orientar los trabajos de fases “secundarias”, entre las que se encuentran los estudios de detalle y las actuaciones correctoras.

El presente capítulo perteneciente al segundo bloque de esta tesis (§1.4), se divide en cinco grandes apartados:

- Las bases del diagnóstico (§3.2)
- Estudio de la historia “clínica” (§3.3)
- Inspección de campo (§3.4)
- Trabajos de gabinete (§3.5)
- 1ª hipótesis de diagnóstico (§3.6)

A lo largo del capítulo los conceptos teóricos se acompañan de ejemplos reales, porque la mejor forma de contrastar una teoría es mediante su visualización en la propia estructura.

---

<sup>2</sup> Las expresiones *Patología* (del griego: estudio del “sufrimiento o daño”) y *Patología de la Construcción* son incorrectas. Su uso en construcción es probablemente de origen francés y aunque se ha intentado encontrar expresiones gramaticalmente más correctas, la realidad es que el poder evocador del nombre y su brevedad han hecho fortuna y pueden considerarse definitivamente acuñados, Calavera (2005).

### 3.2.- LAS BASES DEL DIAGNÓSTICO

Para alcanzar el objetivo con rigor, la metodología de diagnóstico debe seguir los siguientes principios:

- 1- El diagnóstico debe basarse en conceptos científico-técnicos que permitan explicar la realidad estudiada.
- 2- Debe identificarse la afectación que padece la estructura.
- 3- Debe determinarse el porqué del daño.

Las corrientes clásicas defienden que la capacidad para dictaminar un diagnóstico certero se basa en un sumatorio compuesto por ciencia más arte (Gudiol, 2006). La ciencia individual se constituye a base de conocimientos (teóricos y prácticos) obtenidos mediante la observación y el estudio de patrones homogéneos, a partir de los cuales se pueden extraer conclusiones, leyes generales o principios. El arte, en cambio, es una capacidad natural -un talento o intuición- que tienen algunos ingenieros para realizar ciertos razonamientos que conducen hacia acertados diagnósticos con escasez de recursos. Este arte se sirve en muchos casos de la experiencia entendida como percepción particular que un sujeto logra sobre la realidad externa debido a la avisada repetición de una determinada actividad.

De todas formas, si el ingeniero entiende el proceso que le va a llevar al diagnóstico como un experimento científico y se rige por las normas que éste establece, en el sumatorio se puede reducir a la mínima expresión el concepto arte. Aunque, también, debe comprender, por la naturaleza del elemento con el que trabaja, que tal experimento no puede concebirse como el clásico trabajo de laboratorio.

Para articular este “experimento” y así conseguir que el proceso diagnóstico sea completo, se propone, en base a la experiencia adquirida a través del estudio de numerosas presas (ver tabla 1.2), una secuencia de actividades divididas en dos grandes fases, tal y como se muestra en la tabla 3.1:

- La primera fase (objeto de esta tesis), que dura unas pocas semanas, está compuesta por: detección de la anomalía, estudio de la historia de la presa, inspección de campo, primeros trabajos de gabinete y definición de la 1ª Hipótesis de Diagnóstico.
- La segunda, que ha sido ampliamente tratada en foros científico-técnicos y que puede llegar a durar meses, está compuesta por: ensayos de laboratorio, estudios analíticos y numéricos, verificación del diagnóstico y la definición del pronóstico definitivo.

Fase	Etapa		Tiempo
1ª	Detección de la anomalía		Semanas
	Objeto Tesis	Estudio de la historia "clínica"	
		Inspección de Campo	
		Primeros trabajos de gabinete	
1ª HIPÓTESIS DE DIAGNÓSTICO			
2ª	Ensayos de laboratorio		Meses
	Estudios analíticos y numéricos		
	Verificación del diagnóstico		
PRONÓSTICO			

Tabla 3.1.- Fases y etapas del diagnóstico

Este es un proceso cíclico, sujeto a constantes revisiones. Cuando el resultado de los ensayos de laboratorio o de los estudios analíticos-numéricos no concuerda con la hipótesis establecida se debe replantear el diagnóstico. Es fundamental incorporar al proceso de discernimiento los hallazgos que se obtienen a medida que se avanza en el conocimiento de la estructura. El proceso debe reiniciarse por completo si algún dato revela tal necesidad.

Así, por ejemplo, el estudio continuo de la presa de Graus propició que el equipo de la UPC modificara en 2011 el diagnóstico establecido a principio de los años 90, tal y como explica Campos (2012). En un primer momento, se consideró que los desplazamientos horizontales medidos en la presa eran debidos a una reacción química expansiva causada por un ataque sulfático interno (ASI). Con el paso de los años, se ha considerado que las elevaciones medidas tanto en la galería como en coronación no pueden ser debidas únicamente a un ASI. En estos momentos se estudia la posibilidad de que coexista el ASI con una reacción álcali-árido (RAA), ya contemplada en los informes realizados a principio de los años 90.

Con el objetivo de reforzar su eficiencia, es necesario que durante el desarrollo de la secuencia continua de actividades que guían el diagnóstico, el técnico exhiba las siguientes calidades personales (independientes de las virtudes técnicas, consideradas intrínsecas al buen profesional). Estas aptitudes son una adaptación de las propuestas en Morgan y Engel (1971) donde se describe al clínico ideal.

- *Observar continuamente.* Desde el momento en que se le hace el encargo, el técnico debe empezar a estudiar la estructura y su entorno, intentando analizar cada uno de los detalles que le presenten.
- *Ser sistemático en su estudio.* El técnico debe seguir la secuencia de forma metódica para no omitir ningún detalle. Esto no implica inflexibilidad, el técnico debe estar

preparado para detectar nuevos signos y cambiar en consecuencia su conducta diagnóstica.

- *Utilizar la razón.* El técnico debe analizar cuidadosamente cada uno de los detalles presentes para elaborar el diagnóstico, pues sabe que con un enfoque automático y rutinario no es suficiente, cada presa y su entorno son únicos.
- *Relacionarse con personas.* El facultativo no trata simplemente con una estructura y con el daño que viene asociado a ésta. Las relaciones con el titular de la presa se basan en la empatía, en saber comprender cuáles son sus preocupaciones, e intentar de esta forma dar respuestas a las preguntas que éste se plantee.
- *Ser consciente de las limitaciones de su propio saber.* El técnico intentará ampliar sus conocimientos constantemente. Entenderá cada estudio como una oportunidad para que así sea. Ante una situación difícil, el técnico debe estar dispuesto a pedir consejo a otros expertos.
- *Ser capaz de rectificar ante un posible error.* El técnico debe ser capaz de ofrecer un dictamen sabiendo que cualquier diagnóstico y su consecuente tratamiento pueden estar sujetos a revisión al surgir nuevos datos que así lo aconsejen. En caso de ser necesaria una corrección, no debería vacilar en modificar su visión de la realidad.

### 3.3.- ESTUDIO DE LA HISTORIA “CLÍNICA”

Esta etapa consiste en recopilar toda aquella documentación que permita contextualizar la investigación. El objetivo final es que el técnico adquiera un conocimiento básico de la estructura que va a diagnosticar. Este trabajo se divide en dos áreas: documentación histórica y datos de auscultación.

Antes de iniciar el estudio detallado de la presa es bueno, siempre que se pueda, revisar las características técnicas generales de aquellas estructuras coetáneas que puedan presentar ciertas similitudes tipológicas con la que es objeto de estudio. Las experiencias del pasado, que pueden aparecer en esta documentación, pueden inspirar alguna reflexión. A tal fin se recomienda examinar las obras locales de referencia (entiéndase por ejemplo: Vallarino, 1991; Díez-Cascón y Bueno, 2001; SPANCOLD, 2006).

#### 3.3.1.- Documentación histórica

##### Objetivo

Esta actividad pretende estudiar la historia de la presa, desde el proyecto a la explotación, pasando por la construcción y puesta en carga. Disponer de esta información tiene un gran valor asistencial ya que permite la atención continuada por equipos distintos, además de favorecer la docencia o la realización de estudios de investigación

(Castro y Gámez, 2002). En algunos casos, de forma previa al estudio, puede que se deba realizar una tarea de búsqueda de información (reconstrucción de la historia). Hasta hace pocas décadas no se dio el rigor necesario a este tipo de documentos, lo que genera que aunque la información exista, no sea sencillo recuperarla.

### Estrategia

La mejor forma de dar inicio al estudio de la estructura es examinando el Inventario de Presas y Embalses (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2014). Esta base de datos estatal facilita de manera rápida y sencilla las características técnicas más elementales de la presa que sirven para que el técnico se haga una composición de lugar.

Para profundizar en el estudio de la estructura, se aconseja examinar y tratar toda aquella información disgregada que pueda aparecer en distintos documentos. Gracias a esta revisión, quizás se identifiquen particularidades históricas que pueden tener una relación (directa o indirecta) con la patología que se está investigando. Pequeños detalles (mapas de hormigonado, fechas de aparición, aspecto y ubicación de fisuras, comportamiento de las juntas, sistemas de auscultación instalados) pueden ser trascendentales en la formación de una opinión.

Además de los libros ya mencionados, entre los documentos que pueden ser de interés, se encuentran:

- Informes diversos (libro de presa que debe abarcar la etapa constructiva y la de explotación, visitas realizadas, estudios anteriores internos de la empresa o bien encargados a otras instituciones).
- Libro técnico de la construcción.
- Planos descriptivos de la presa (plantas, perfiles, detalles).
- Fotografías.
- Proyectos y descripción de obras de reparación u otras obras realizadas.
- Artículos publicados en congresos y/o revistas.
- Libros o monografías de una determinada presa.
- Propaganda de empresas vinculadas con el sector.

Para ilustrar la significación de la información que se puede obtener en esta etapa se presenta el caso del plano de hormigonado por trimestres de la presa de San Esteban (ver figura 3.1), que ha podido realizarse gracias a otro plano donde aparecían las fechas en que se vertían las tongadas de hormigón.

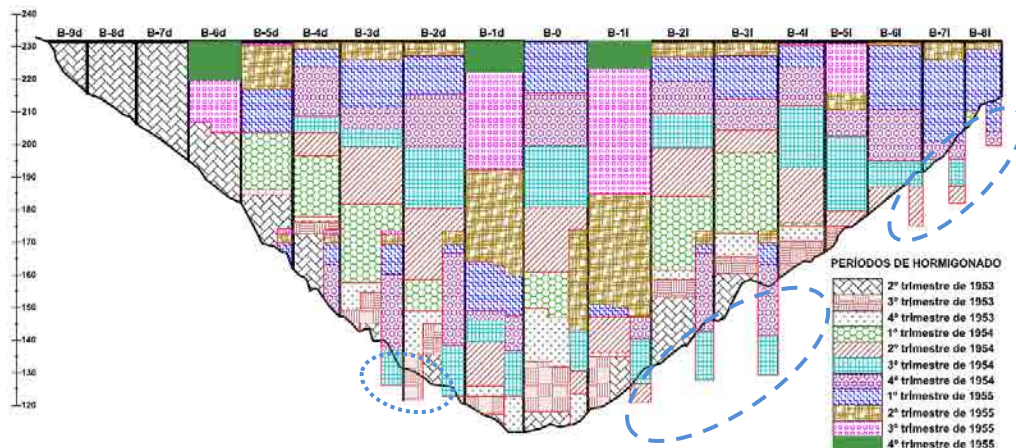


Figura 3.1.- Plano de hormigonado de la presa por trimestres

Del plano original difícilmente se podían extraer conclusiones, en cambio, gracias a la nueva representación se han podido extraer las siguientes:

- La construcción se realizó a un ritmo muy alto y constante. En once trimestres (algo menos de tres años) se vertió el hormigón de toda la estructura. Un ritmo tan fuerte y mantenido puede ser síntoma de que no aparecieron incidencias.
- La presa se construyó de forma relativamente homogénea. En la tabla 3.2 se presenta el desglose del número de bloques hormigonados en cada uno de los trimestres. Lo que hace presagiar que las características técnicas del hormigón de toda la presan son similares.

Número de bloques hormigonados cada trimestre										
Año 1953			Año 1954				Año 1955			
2º	3er	4º	1er	2º	3er	4º	1er	2º	3er	4º
13	10	7	7	12	12	13	13	13	5	3

Tabla 3.2.- Número de bloques hormigonados por trimestre

- La única particularidad que se puede apreciar es que el estribo derecho (bloques referidos con la “i”) presenta seis talones de una longitud remarcable, representados en la figura 3.1 por las columnas que entran en el terreno (marcadas en línea discontinua), mientras que el estribo izquierdo solamente presenta dos y mucho más cortos (marcados línea de puntos). Esta diferencia se podría deber a particularidades en la orografía o en las características geológicas de la cimentación que obligasen a buscar zonas de mayor capacidad mecánica.

Otro ejemplo es el de la presa de Torán. El paramento aguas arriba se encuentra revestido por una de capa impermeabilizante desde hace años, lo que imposibilita visualizar su estado de conservación. Por fortuna se encontró en la Revista de Obras Públicas, como indica Río *et al.* (2008), una imagen publicitaria de la empresa que

desarrolló los trabajos de impermeabilización con el paramento descubierto. En la instantánea pueden identificarse diversos signos de daño que se desconocía que existieran.

Aun siendo muy valiosa, la información que se obtiene en esta etapa solamente debe servir para orientar las etapas sucesivas, pero no debe condicionarlas. De ser así, podría alterar de manera inconsciente los resultados de la investigación.

### 3.3.2.- Datos de auscultación

#### Objetivo

Se dedica un apartado específico a los datos registrados por los sistemas de medición instalados/utilizados en la mayoría de presas porque comprenden una parte muy importante de la documentación histórica desde la puesta en carga de la estructura. El registro continuo y regular de estos datos permite describir cómo evoluciona el comportamiento de la presa con el tiempo.

#### Estrategia

En una presa de hormigón son muchas las variables que se miden en el tiempo. En la tabla 3.3, editada por el Comité Italiano de Grandes Presas (ITCOLD, 1988), se presentan las magnitudes que se miden, el momento en que se miden y el instrumento/os que se utilizan a tal fin.

La consecuencia directa de esta actividad es que son muchos los datos registrados, siendo su gestión y análisis muy complicado. Para optimizar los tiempos, en esta fase es usual que básicamente se estudien los datos referentes a:

- Movimientos horizontales.
- Movimientos verticales.

Según el ICOLD (2000) y Lombardi *et al.* (2001), de todos los parámetros que pueden controlarse en una presa, los movimientos son los más significativos, además de ser los que se miden de forma más precisa. Lombardi *et al.* (2001) añade además que la gran ventaja de las presas de hormigón es que cualquier acontecimiento importante que ocurra en el cuerpo de presa o en su cimentación provoca una respuesta global de la estructura que se refleja en los movimientos.

El control y análisis de estas medidas debe permitir diferenciar entre los movimientos cíclicos recuperables y los movimientos remanentes, o no recuperables. Los movimientos cíclicos son consecuencia del empuje hidrostático y de la acción térmica que afectan el régimen normal de explotación de una presa, y no acostumbran a representar un problema precisamente porque son reversibles. En cambio, los remanentes son consecuencia de la aparición de algún fenómeno anormal. Los movimientos de

cimentaciones y laderas, y las reacciones expansivas son las causas principales de este segundo tipo de movimientos.

	Magnitud a Medir	Construcción			1r Llenado			Explotación			Instrumentos
en el Ambiente	Temperatura del aire	x			x			x			Termómetros
	Precipitaciones	x			x			x			Pluviómetros
	Presión atmosférica	x			x			x			Barómetro
	Humedad del aire	x			x			x			Higrómetro
	Temperatura del agua	0			x			x			Termómetros
en el Cuerpo de Presa	Mov. horizontales	0	0	0	x	x	x	x	x	x	Triangulación, colimación y péndulos
	Movimientos verticales	x	x	0	x	x	x	x	x	x	Nivelación topográfica
	Apertura de juntas	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Extensómetros, defórmegos
	Apertura de fisuras	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Extensómetros, defórmegos
	Temperatura del hormigón	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Termómetros
	Deformación hormigón	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Extensómetros
	Solicitación hormigón	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Tensiómetros
en la Cimentación	Mov. horizontales	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Péndulos
	Movimientos verticales	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Nivelación topográfica y extensómetros
	Deformaciones de la roca	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Extensómetros
	Módulo elástico	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Velocidad sísmica
	Solicitación hormigón	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Tensiómetros
	Subpresión	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Piezómetros
		G	A	C	G	A	C	G	A	C	

G= presa gravedad, A= presa arco, C= presa de contrafuertes, x=magnitud medida y 0= magnitud no medida.

Tabla 3.3.- Magnitudes a medir en una presa de hormigón (adaptado ITCOLD, 1988)

Históricamente han sido los péndulos directos e invertidos y los extensómetros de varillas los que se han encargado de realizar la medición y registro de los movimientos horizontales y verticales. La información que aporta este tipo de aparatos es muy local, por lo que si se quieren conocer valores globales que puedan referirse a gran parte de la presa es necesario instalar un gran número de dispositivos. Hoy, para realizar esta labor y para evitar llenar la presa de instrumentos se utilizan las técnicas geodésicas de nivelación y colimación, registrando la posición de una serie de puntos y analizando a posteriori su evolución espacial.

En la figura 3.2 se presentan los movimientos de colimación y nivelación registrados en la coronación de la presa de San Esteban. Los movimientos en la base 3I (estribo derecho) son notablemente superiores a los registrados en la base 3D (estribo izquierdo), quedando entremedio los correspondientes a la base "0" (bloque central).

Los distintos movimientos de vaivén, de aproximadamente 2-3 mm, que se aprecian en ambos gráficos, son los causados por el ciclo térmico natural. El movimiento horizontal acumulado, que se puede cifrar en 120 mm, entre los años 1975 y 2009, y el



movimiento vertical acumulado, que asciende a algo más de 30 mm en una serie de datos que va de 1982 a 2007, hacen pensar que existe un fenómeno no cíclico que introduce deformaciones permanentes en la estructura.

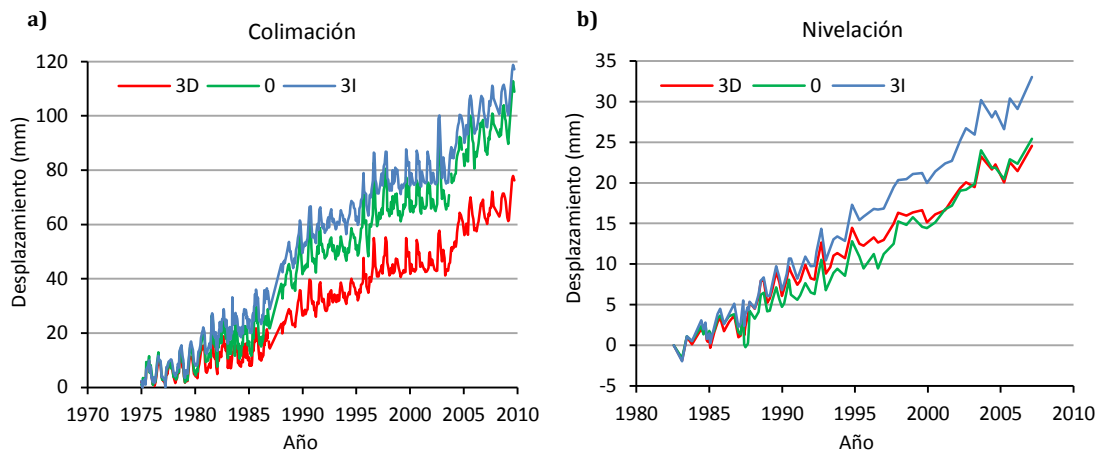


Figura 3.2.- Movimientos registrados en la presa de San Esteban

El registro de los movimientos puede realizarse sólo en coronación o extenderse, también, a las galerías horizontales o a otros puntos del cuerpo de presa, con lo que la información obtenida es mayor y con ello es más fácil entender el comportamiento global de la estructura, ICOLD (2000). En un mismo bloque, en el caso de que los movimientos remanentes estén causados por un problema puntual en una zona de la presa (por ejemplo en cimentación), los movimientos de nivelación registrados en cualquier base de medida deberían ser prácticamente idénticos, independientemente de su cota. Si por el contrario la causa del movimiento es generalizada, cuanto mayor sea la cota de la base de medida, mayor debería ser su movimiento. Este razonamiento no se puede aplicar a los movimientos de colimación, condicionados por el efecto *brazo de palanca*, por lo que los puntos de mayor cota siempre registran un movimiento mayor.

La frecuencia de medición de los movimientos se puede determinar en función de los intereses del órgano gestor. Aunque pudiera parecer lo contrario, no se mide mejor por tener más datos. Con la voluntad de no acumular un gran número de datos y teniendo en cuenta que los movimientos que realmente son importantes de registrar son los no recuperables, se hacen tres propuestas de frecuencia de medición. Los movimientos de los puntos seleccionados se podrían medir:

- Una vez al año: Se consigue ver la evolución anual de los puntos sin interferencia alguna. Se aconseja que la medición se realice siempre en la misma fecha, en los meses de abril u octubre (meses en los que se suele registrar la temperatura mínima y máxima respectivamente del hormigón en el interior de la presa).
- Dos veces al año: Además de ver fácilmente la evolución anual de los movimientos no remanentes, permite valorar, sin acumular gran número de datos, la importancia de la variación de la temperatura y del régimen hidráulico en el comportamiento de la presa. Medir en abril y medir en octubre permite conocer el comportamiento de la presa en dos situaciones extremas y contrapuestas.

- Una vez al mes (doce veces al año): mediante esta medición también se puede ver la evolución de los movimientos no remanentes, aunque pueden acumularse datos redundantes. La ventaja que tiene esta frecuencia, además de enseñar el comportamiento de la presa bajo cualquier tipo de condición de contorno, es que se puede detectar un comportamiento anómalo al poco tiempo de que se manifieste, acortándose notablemente los tiempos de reacción.

En la figura 3.3 pueden verse tres representaciones distintas de los movimientos de nivelación de la presa de Tavascán. Independientemente del número de medidas utilizadas (una, dos o doce al año) para realizar la representación, se observa que la presa crece desde el año 1966 (mes 0) hasta el año 2008 (mes 504) entre 47 y 65 mm según el bloque medido. Se demuestra, por tanto, que para ver la tendencia del comportamiento no es necesario hacer un registro excesivo de datos.

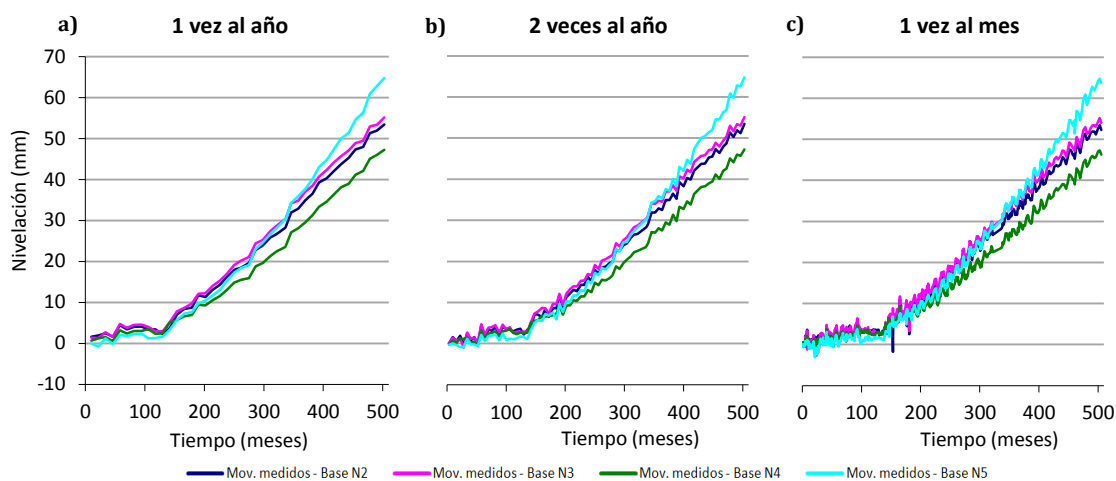


Figura 3.3.- Frecuencia de medida de los movimientos

### 3.4.- INSPECCIÓN DE CAMPO

La inspección de campo o inspección visual de la estructura es la exploración física que practica personalmente el técnico a toda la presa y a su entorno. Es de importancia primaria al posibilitar el reconocimiento de las alteraciones estructurales y/o signos anormales que van a formar la opinión del experto (ver tabla 3.4).

Esta técnica, que puede parecer básica, permite descubrir varias anomalías que en algunos casos no son detectables por otros sistemas de control o estudio. Mediante la misma, según Fleitz y Hopp (2008), se puede realizar lo que se considera una auscultación de tipo distribuida, es decir, obtener información continua sobre la presa en todas sus zonas visibles, especialmente paramentos y galerías. Cajete y Gil (2000), por su parte, destacan la inspección visual como acción imprescindible, ya que a lo largo de la vida de la presa se acumula una gran carga de información visual que debe ser registrada y sistemáticamente documentada. Su gran hándicap es que la información que facilita es sobre todo cualitativa.

Etapa	Estudio	Zona	Signos a observar...
Inspección de campo	Formación geológica	Cantera	Áridos reactivos y degradación superficial
		Estribos	Discontinuidades, intrusiones, degradación superficial y productos neoformados
	Estructuras anejas		Coqueras, corrosión de armaduras, humedades, crecimiento biológico, etc.
	Presa	Exterior	Movimientos remanentes y degradación hormigón (roturas parciales o locales, degradación superficial, apertura de juntas de construcción, manchas, filtraciones, etc.)
		Interior	Degradación hormigón (filtraciones, productos lixiviados, productos reactivos neoformados, deterioro superficial del hormigón, etc.)
	Elementos móviles		Degradación hormigón y desalineaciones

Tabla 3.4.- Actividades a realizar en la etapa de inspección de campo

Durante la inspección de campo se deben realizar una serie de actividades complementarias (recogida de muestras, registro de datos, toma de fotografías...) que se describen con detalle en el anexo 2, todas ellas importantes para el desarrollo de las distintas etapas que conforman el estudio.

### 3.4.1.- Estudio formaciones geológicas

Esta etapa persigue conocer las posibles interacciones existentes entre el terreno y el daño detectado en la presa en periodo de explotación. A tal fin, se debe estudiar tanto la cantera, siempre que sea posible, como los estribos. En esta etapa se descarta el estudio de la cimentación, a no ser que sea accesible al ojo humano desde la zona de galerías.

#### 3.4.1.1.- Cantera

##### Objetivo

La inspección de la cantera debe realizarse para evaluar si las características geológicas de los áridos pueden ser una fuente de problemas. Este es un ejercicio que se recomienda por la influencia que han ejercido las reacciones expansivas en la formación del autor de este documento.

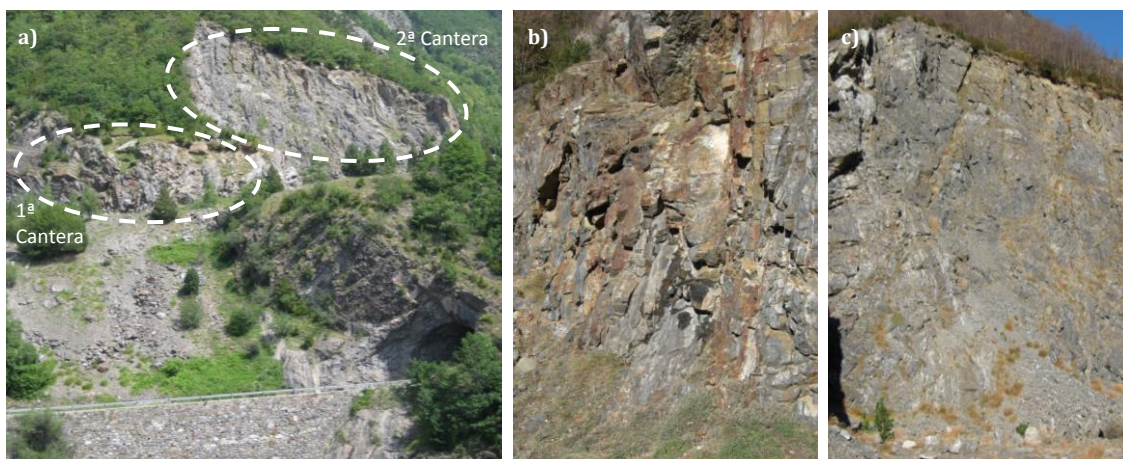
##### Estrategia

Un frente abierto de cantera es una zona expuesta a la agresión de elementos externos ante los que el macizo rocoso no puede prácticamente defenderse. La indefensión en la que se encuentra esa roca permite que se den los procesos químicos propios de sus características geológicas; así, su proceso de degradación es un magnífico espejo del que se podría estar dando en los áridos que de ella se extrajeron.

Si la roca de alguno de los frentes presenta señales de alteración es muy probable que el árido de la presa contenga minerales que, bajo determinadas condiciones de exposición, reaccionen con el agua o con los compuestos de la pasta de cemento dando lugar a reacciones expansivas. De todas formas, cabe especificar que esta es una reflexión hecha pensando en las canteras que puedan contener sulfuros.

Es importante que la inspección se realice a todos los frentes de cantera. Al tratarse de extensiones considerables de terreno podría darse el caso de que no todas las zonas de extracción de áridos fueran problemáticas. Debe tenerse en cuenta que puede que la cantera haya quedado inundada por el propio embalse o haya sido objeto de una rehabilitación ambiental, con lo cual será imposible su estudio.

En la presa de Paso Nuevo, el hormigón contiene áridos procedentes de dos canteras distintas (ver figura 3.4). Su identificación y estudio resultó trascendental para la determinación del diagnóstico. Si bien los dos frentes se encuentran muy cercanos, las rocas del primero, figura 3.4b, tienen una alta reactividad química debido a su contenido en compuestos de azufre y en cambio las rocas del segundo frente, figura 3.4c, no presentan capacidad reactiva. De no haberse identificado los dos frentes, solamente se hubiera estudiado el segundo (el único que consta en la documentación) con lo que hubiera sido muy complicado determinar el origen de los daños que presenta la presa.



*Figura 3.4.- Canteras de la presa de Paso Nuevo*

La inspección de la cantera, aunque no sea del todo concluyente, puede aportar información útil que sirva de punto de partida en el análisis preliminar del diagnóstico. Se debe comprobar que las hipótesis que se planteen a partir de este estudio no sean contradictorias con las características de los áridos que realmente se encuentran en el hormigón de la presa.

### 3.4.1.2.- Estribos

#### Objetivo

El objeto principal de este estudio es determinar si el comportamiento de los estribos puede generar una interacción terreno-estructura que afecte a la conservación de la presa.

Estos estudios, aunque tienen un marcado carácter práctico, también deben plantearse desde una óptica teórica. Es importante estudiar el mapa geológico y el geotécnico de la zona publicados por el Instituto Geológico y Minero de España. En ellos puede detectarse alguna particularidad morfológica que puede proporcionar algún indicio al técnico. Se debe tener en cuenta que muchas de las presas que pueden presentar problemas se construyeron cuando este tipo de información no estaba disponible, por lo que los estudios de la época referentes a estos ámbitos puede que fuesen limitados en su contenido.

#### Estrategia

Los estribos generan unas restricciones horizontales en las presas que no existen en el plano vertical. El movimiento relativo en una discontinuidad, la meteorización de la roca o la expansión del material existente en las diaclasas pueden ocasionar una alteración en el sistema de fuerzas actuantes del estribo sobre la estructura que puede producir efectos negativos en ella.

Los factores que van a determinar las consecuencias son, entre otros: la magnitud del empuje (que depende de la causa), su dirección principal (que puede ser variable, o no uniforme, en altura), una posible asimetría en el comportamiento de los estribos y la tipología de la presa.

Si los efectos estructurales son causados por la meteorización de la roca, la sollicitación no es uniforme en altura, siendo más grande la compresión que ejerce el estribo sobre la presa cuanto más cerca está la roca de la zona de coronación. La parte superior de los estribos es la zona del terreno que más tiempo se encuentra expuesta a la degradación natural, pues es la última zona que queda “protegida” por el hormigón de la presa, por lo que el deterioro de la roca, y su posible expansión, es mayor que la dada en las zonas más cercanas a la cimentación.

Además, existe un fenómeno constructivo que puede facilitar que las consecuencias de la expansión de los estribos sean más significativas en la parte alta de la presa. La rigidez de la presa es mucho mayor en la base que en la zona superior, por lo que es más fácil resistir cualquier acción en la zona baja de la estructura que no en la zona superior de los bloques.

En la figura 3.5 se presenta un perfil característico de una presa de gravedad (izquierda) con tres gráficos asociados donde se presentan: el tiempo de exposición

(centro izquierda), la expansión del terreno (centro derecha) y la rigidez de la presa (derecha) en función de la altura de la presa. A mayor cota, mayor tiempo de exposición, mayor expansión del terreno y menor rigidez, por tanto más probable que aparezcan fisuras estructurales.

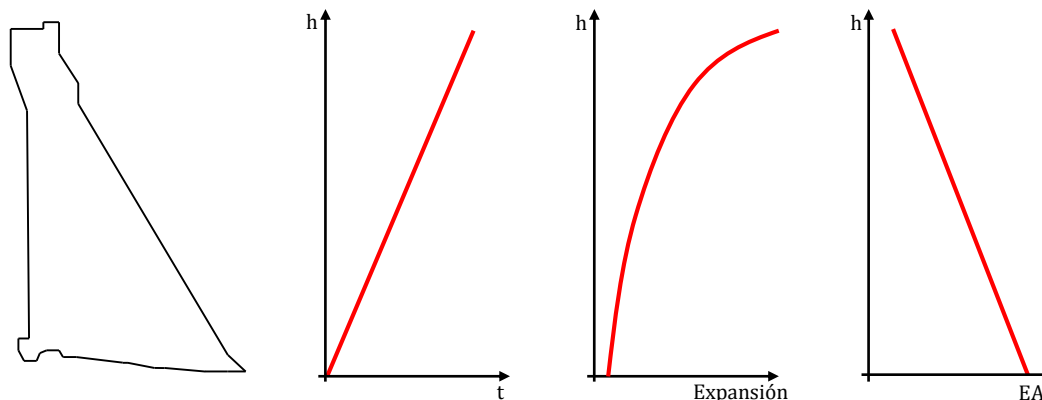


Figura 3.5.- Evolución en altura de las variables que influyen en la aparición de fisuras

Por todo lo indicado, el técnico, durante la inspección de los estribos debe estudiar, básicamente dos aspectos. De un lado, debe verificar si existe alguna discontinuidad o intrusión geológica susceptible de generar movimientos relativos en el macizo. Del otro, debe verificar si existen manchas superficiales o productos neoformados en la roca, que son un indicio de la presencia de minerales potencialmente alterables. En la gran mayoría de casos en que se degrada la roca, las consecuencias de la meteorización son fácilmente detectables, aunque la ausencia de indicios no significa automáticamente su inexistencia.

En la figura 3.6 se muestran tres estribos correspondientes a las presas de Graus (figura 3.6a), Rumedo (figura 3.6b) y Paso Nuevo (figura 3.6c). En ellos se aprecian manchas superficiales de color marrón oscuro, típico de la oxidación de los sulfuros de hierro.

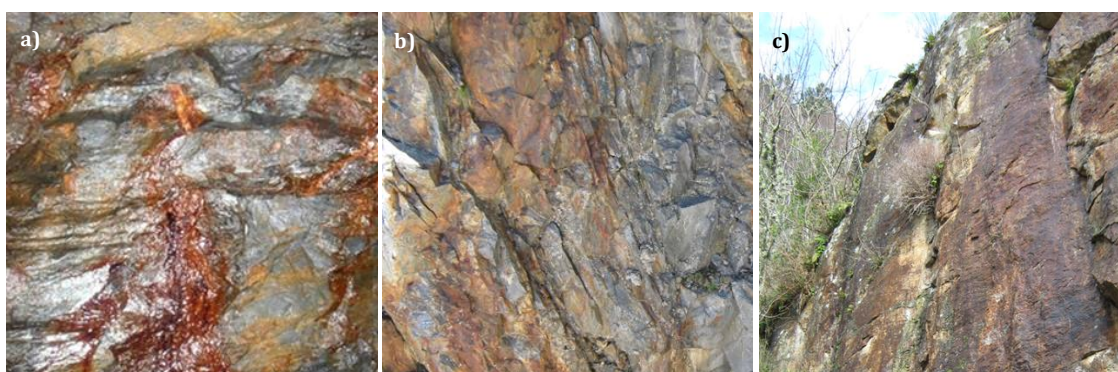


Figura 3.6.- Productos de alteración en la roca de los estribos de distintas presas

En lo que se refiera a la estructura, como consecuencia de la sollicitación generada por los estribos, la presa puede presentar en las zonas cercanas a coronación, normalmente por encima de la cota de embalse, unas fisuras longitudinales con un ángulo respecto a la horizontal que puede oscilar entre  $0^\circ$  y unos  $45^\circ$  dependiendo de la

inclinación existente en el contacto presa terreno. En la figura 3.7 se presenta un alzado tipo de una presa donde se puede ver el perfil de los estribos con una aproximación de los empujes asimétricos (flechas) resultantes de la expansión del terreno. Las flechas no tienen magnitud, solo orientación, y son perpendiculares a la superficie del estribo. En línea discontinua se presenta la traza teórica que tendrían las fisuras que podrían aparecer en los paramentos.

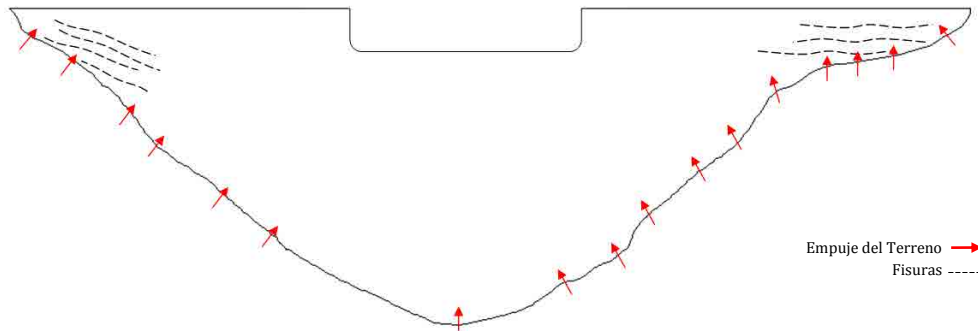


Figura 3.7.- Representación teórica de empujes y fisuras

Para ilustrarlo, se presenta el caso particular de la presa de Torán (ver figura 3.8, con un detalle del alzado incluido, visto desde aguas abajo). El estribo izquierdo ejerce una compresión sobre la presa en dos direcciones, vertical (flechas continuas) y horizontal (flechas discontinuas). La compresión en sentido vertical es superior a la horizontal por la cantidad de terreno que existe bajo la presa. En la zona próxima a la coronación existe muy poco hormigón, por tanto, poco peso propio, y en consecuencia no es posible contrarrestar la nueva sollicitación vertical. Las tracciones surgidas en la perpendicular son las que causan unas fisuras longitudinales, en este caso prácticamente horizontales.

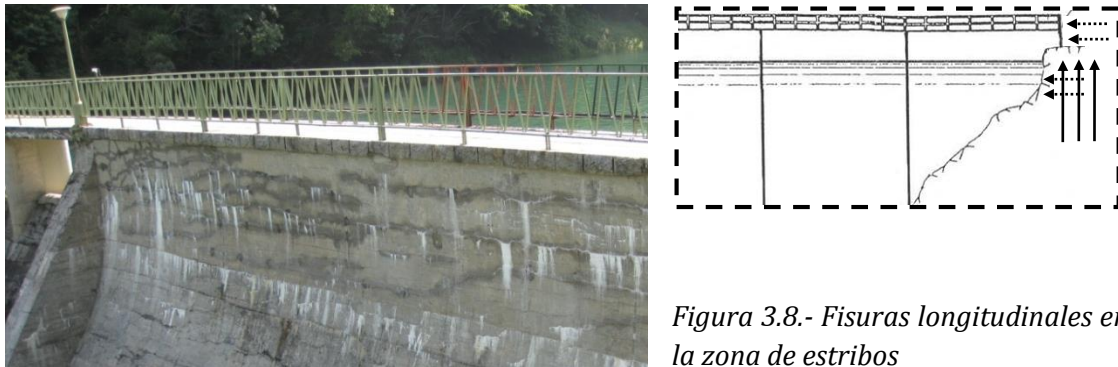


Figura 3.8.- Fisuras longitudinales en la zona de estribos

En el caso de que aparezcan estas fisuras longitudinales, se presentan también en el paramento aguas arriba, aunque no siempre sea sencillo observarlas. En muchas ocasiones la lámina impermeable o los tratamientos realizados en este paramento las pueden tapar, como se ha apuntado con anterioridad (ver apartado 3.3.1).

La interacción estribo-estructura también puede estudiarse durante la visita a las galerías de la presa, desde donde es fácil visualizar el contacto entre la roca del estribo y la presa. Si el hormigón está expuesto a la sollicitación de la roca aparece, también, en esta

zona, una fisuración inclinada (véase figura 3.9, correspondiente a la presa de Paso Nuevo).

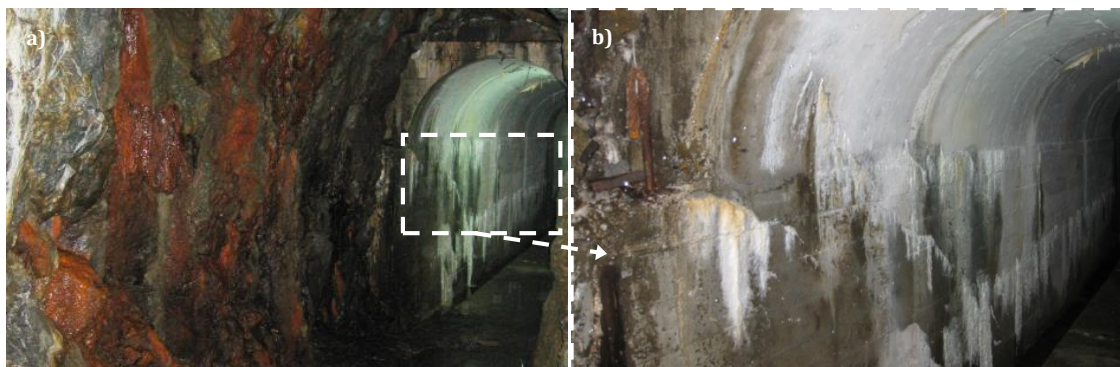


Figura 3.9.- Interacción suelo-estructura en galerías; a) vista general b) detalle fisura

Otra posibilidad es que la acción del terreno genere un efecto de torsión, es decir que se produzca un giro diferencial entre los distintos bloques. En este caso las fisuras que aparecen en los dos paramentos tienen inclinaciones diferentes. En las galerías, las fisuras son oblicuas, suelen comenzar en el hastial de uno de los paramentos para ir cambiando su posición hasta finalizar en el hastial del paramento opuesto.

En la presa de San Esteban, el estribo derecho está situado en el contacto entre granitos muy deformados y esquistos con intercalaciones de cuarcitas, según se desprende del estudio detallado del corte geológico de la hoja 188 (Nogueira de Ramuin) del Mapa Geológico del Instituto Geológico y Minero de España (1971) presentado en la figura 3.10. La información específica se obtiene de las figuras 3.10b y 3.10c, donde se presentan respectivamente una ampliación de la zona donde queda emplazada la presa y un corte geológico correspondiente al cauce del río.

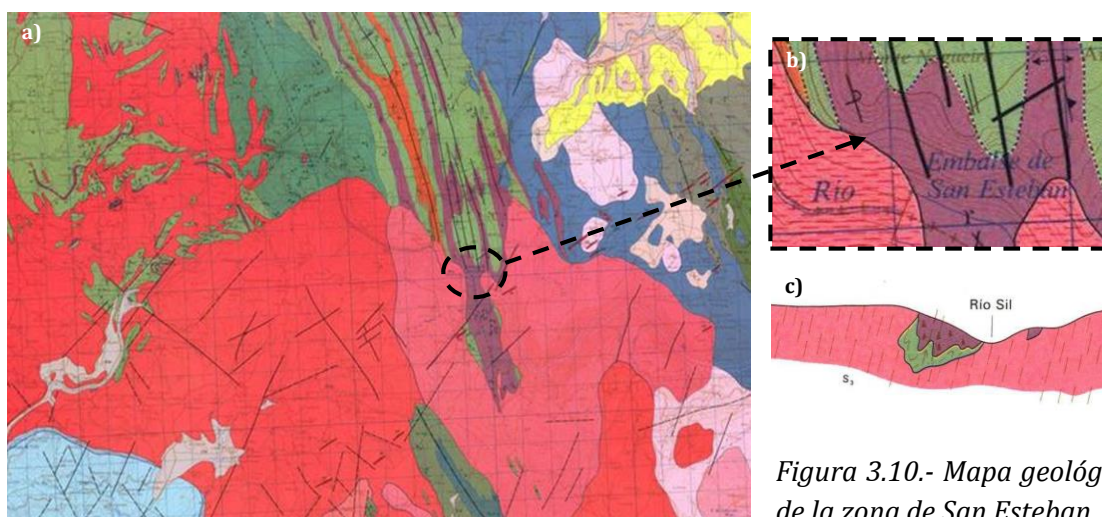


Figura 3.10.- Mapa geológico de la zona de San Esteban

La última hipótesis de diagnóstico planteada para explicar el comportamiento de esta presa (está siendo evaluada por la empresa propietaria) considera que existe un movimiento diferencial de la margen derecha de la presa con respecto a la zona central y



de la margen izquierda (ver figura 3.2) causado por la meteorización de los materiales graníticos del estribo derecho, favorecido por las fracturas y diaclasas que éstos presentan.

La deformación del terreno genera en la presa una torsión que provoca la aparición de las fisuras longitudinales que aparecen en los paramentos de ambos estribos (con inclinaciones diferentes según si están en el paramento de aguas arriba o de aguas abajo). De todas formas, las fisuras más marcadas son las que aparecen cerca de la margen derecha de la presa (ver figura 3.11), que es el más solicitado.



Figura 3.11.- Fisuras inclinadas; a) paramento aguas arriba; b) paramento aguas abajo

En el contexto de la aparición de fisuras orientadas en la presa, cabe incidir en que éstas no sólo pueden derivarse de problemáticas asociadas al propio terreno, particularmente en las zonas de estribos, sino también al efecto amplificador que causaría una acción concomitante causada por la expansión del hormigón.

Un ejemplo significativo de este efecto se encontraba en la presa de Lago Colombo, afectada por una reacción álcali-árido, donde apareció una fisura longitudinal (ver figura 3.12) que en veinte años (1990-2010), alcanzó los 100 metros de longitud y una profundidad de 4 m. En 2012, para recuperar las condiciones adecuadas de seguridad se realizaron dos nuevas juntas mediante cortes en el hormigón y se rellenó la fisura con un mortero especial (Sbarigia *et al.*, 2013).



Figura 3.12.- Esquema fisura horizontal paramento aguas abajo (Sbarigia *et al.*, 2013)

### 3.4.2.- Estructuras anejas

#### Objetivo

En esta etapa de la exploración física se deben analizar, si existen, los daños no estructurales presentes en las construcciones independientes a la presa que se encuentren en ella o en sus alrededores. El objetivo es valorar si el origen del daño puede ser el mismo que el que aparece en la presa.

#### Estrategia

Según Calavera (2005), el 37% de los fallos que se dan en las estructuras (principalmente de edificación) derivan de errores de proyecto, el 55,5% de errores en la ejecución o del tipo de materiales utilizados, mientras que solamente el 7,5% son causados por un incorrecto uso y/o mantenimiento de la estructura. En el ámbito de presas, según Aguado *et al.* (1996a), a nivel europeo los fallos derivados de errores de proyecto oscilan entre el 40 y 45%, los derivados de errores en la ejecución o del tipo de materiales empleados en la construcción oscilan entre el 40 y el 50%, y aquellos que son debidos a un uso incorrecto de la estructura son del orden del 10%.

Cada periodo temporal ha potenciado distintas técnicas constructivas, que se consolidan más o menos en el tiempo dependiendo de los resultados que consiguen. Del mismo modo, cada área geográfica tiende a potenciar la utilización de aquellas materias primas que se obtienen más fácilmente y que, normalmente, son las que se encuentran en mayor cantidad.

Si se suman estos dos condicionantes es relativamente fácil que la presas y las estructuras coetáneas que se encuentren en su entorno se hayan construido con técnicas similares y con materiales (cemento, áridos, agua...) muy parecidos o incluso idénticos. Si los daños detectados en estas estructuras son de carácter semejante a los que presenta la presa se puede valorar la posibilidad que el origen de todos sea el mismo y que, en consecuencia, el problema tenga su origen en el material o en el sistema de ejecución.

Por una razón u otra, existen una serie de daños que se presentan de forma habitual en las estructuras auxiliares. Entre estos se encuentran: coqueras, corrosión de armaduras, fisuras (longitudinales o en mapa), humedades, crecimiento biológico etc.

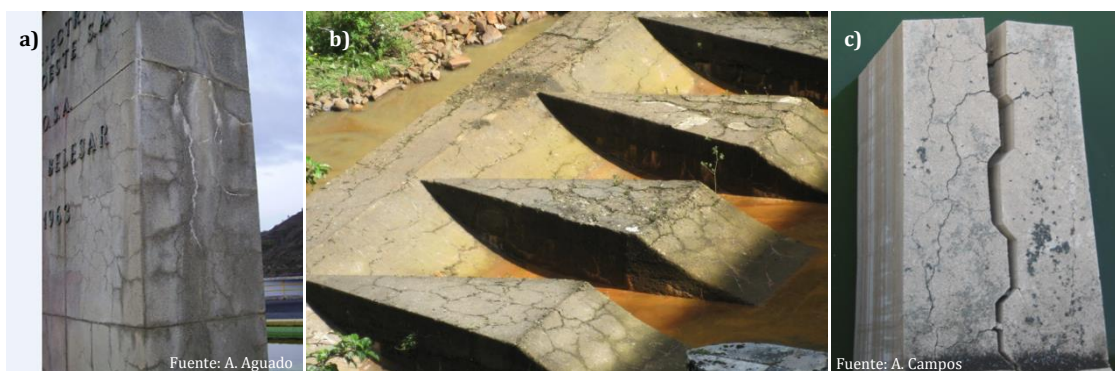
Tanto las coqueras como la corrosión de las armaduras (en este tipo de ambiente) son consecuencia, normalmente, de un defecto de puesta en obra. Este tipo de errores constructivos, en caso de repetirse en el cuerpo principal de la presa, no acostumbran a ser significativos.

Las fisuras, signo de daño más habitual, pueden deberse a varias razones, las aquí consideradas son las de carácter no estructural. A edades tempranas, la fisuras en mapa, tendencialmente, pueden estar causadas por un proceso de afogado (defecto de puesto en obra), que no debería comportar mayores problemas. Por otro lado, las fisuras

longitudinales pueden ser ocasionadas por una retracción inicial que normalmente aparece en elementos con espesores considerables que podrían llegar a seccionarse.

En cambio, la fisuración (estructural o no) que aparece en una fase avanzada de explotación normalmente es consecuencia de una reacción expansiva del hormigón. Lo más habitual, en estos casos, es que la fisuración sea en mapa, aunque también puede aparecer una fisuración longitudinal siempre que existan unas armaduras donde se alinean las fisuras.

En la figura 3.13 se presentan algunos ejemplos ilustrativos de estructuras anejas a la presa con una marcada fisuración que ayudó a determinar que el hormigón contenía áridos reactivos. Así, en la figura 3.13a se presenta la estructura conmemorativa de la inauguración de la presa de Belesar, donde se diagnosticó según Hoyo *et al.* (2008) y Herrador *et al.* (2009) una reacción álcali-sílice. En la figura 3.13b se puede ver la fisuración (en mapa y longitudinal) de los dientes de pie de presa (fuertemente armados) de la presa de Torán afectada por un ataque sulfático interno. Finalmente, en la figura 3.13c se presenta un elemento auxiliar del tajamar de la presa Torrejón-Tiétar con una marcada fisuración mapeada.



*Figura 3.13.- Fisuración enramada en estructuras anejas a las presas*

Las estructuras auxiliares normalmente están sometidas a unas condiciones de confinamiento relativamente favorables, además de presentar geometrías esbeltas, por lo que, en el caso de aparecer, la fisuras pueden manifestarse a edades más tempranas y de forma más significativa de lo que posiblemente lo hagan en la presa. De todas formas, su inexistencia en obras anejas no significa que no se desarrollen en la presa, ya que el contacto constante con el agua puede ser un factor principal en el desarrollo de este tipo de fenómenos, y puede que sin ella las estructuras auxiliares no las hayan desarrollado, o si lo han hecho, la velocidad sea menor.

### 3.4.3.- Cuerpo de presa

Esta etapa comprende el estudio de la presa, considerando tanto su vertiente exterior como interior.

#### 3.4.3.1.- Estudio del exterior de la presa

##### Objetivo

En esta actividad se pretenden detectar los signos patológicos que pueden presentarse en las zonas siguientes: coronación, paramentos y aliviaderos. Aunque no son los únicos, los principales signos que pueden manifestarse son: movimientos remanentes y la degradación del hormigón, que puede manifestarse en forma de roturas parciales, degradación superficial (pérdida de material, formas redondeadas...), fisuras (longitudinales y en mapa), roturas locales (formas vivas, no redondeadas), apertura de juntas de construcción, manchas (humedad o de productos de reacciones), filtraciones, etc.

##### Estrategia

En la zona de coronación, sobre todo en las presas de planta recta, en el caso de darse, es relativamente fácil detectar los movimientos remanentes, tanto horizontales como verticales, que son un claro reflejo del comportamiento anómalo que experimenta la presa o su cimentación. En las presas arco, la curvatura y la transmisión de cargas en el eje longitudinal dificultan su observación, aunque también pueden detectarse.

En el caso de que los movimientos sean muy notables se pueden detectar por la variación de la apertura de las juntas de hormigonado o por la desalineación de los bloques de hormigón. En la figura 3.14a, correspondiente a la presa de Mequinenza, se aprecia un movimiento en el plano horizontal de un bloque respecto al adyacente. En el caso que los movimientos sean pequeños, la mejor manera de detectarlos es mediante la desalineación que experimentan los elementos lineales esbeltos, como pueden ser raíles (ver figura 3.14b, correspondiente a la presa de San Esteban) o barandillas (ver figura 3.14c, correspondiente a la presa de Torrejón-Tiétar).

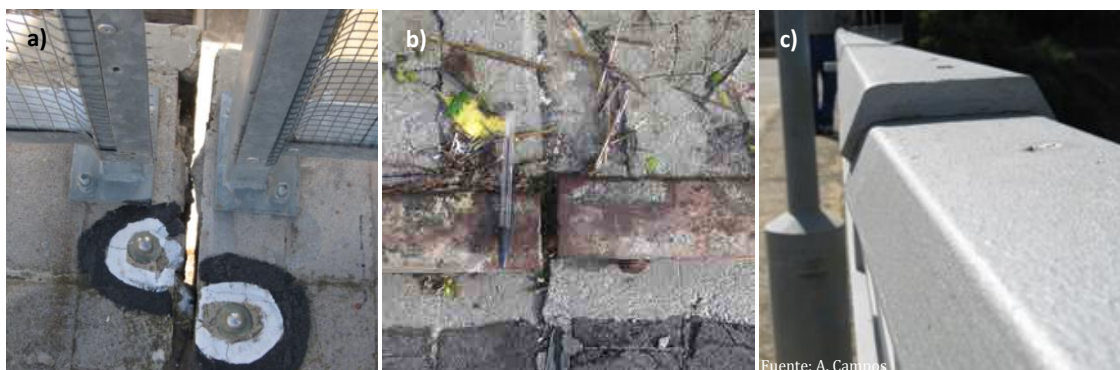


Figura 3.14.- Movimientos relativos observados en coronación

El técnico debe servirse para ratificar su observación de los datos recogidos por los sistemas de auscultación instalados en la estructura; datos que debería haber consultado en la etapa de estudio de la historia clínica (§3.3), como ya se comentó en su momento.

Por otro lado, destacar que en esta zona, al ser una de las zonas menos confinadas de la presa, la degradación del hormigón suele manifestarse en forma de fisuras (López, 1999), como se muestra en la figura 3.15. En la figura 3.15a, correspondiente a la presa de Torrejón-Tajo, se puede ver lo que se considera una fisuración enramada. En cambio en la figura 3.15b, correspondiente a la presa de Graus, se presenta lo que es considerado como una fisuración longitudinal. De ser posible, no solamente se debe determinar la tipología de la fisuración, sino también sus dimensiones (apertura, profundidad y longitud o superficie).

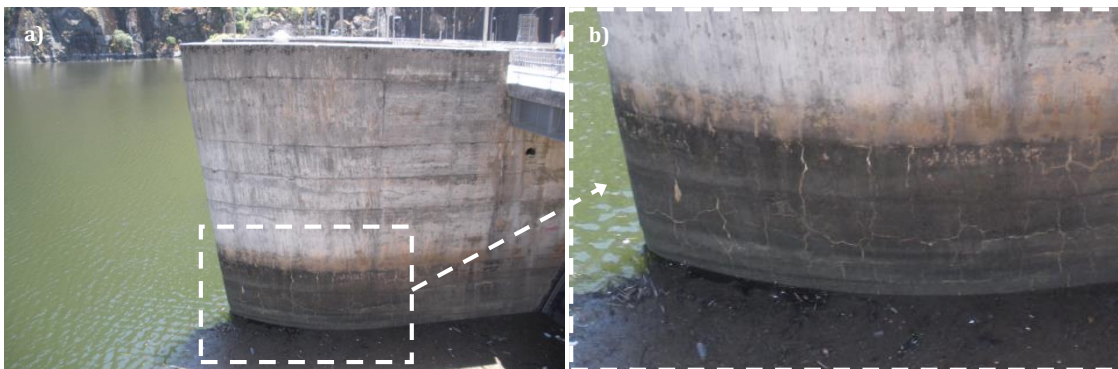


*Figura 3.15.- Fisuración en coronación*

Los paramentos y los aliviaderos son las zonas donde se pueden encontrar mayores extensiones de hormigón visibles. Además, éstas son la más expuestas a acciones exteriores (el paramento aguas abajo, lo está al agua; y el paramento aguas arriba y los aliviaderos, además de al agua, lo están a cualquier inclemencia meteorológica), por ello es donde se van a detectar los signos patológicos con mayor facilidad.

Se debe señalar que el estado del paramento aguas arriba es muy difícil de evaluar porque normalmente se encuentra cubierto de agua. En los casos en que ha habido un descenso de cota del nivel del embalse, la alternancia en su estado de humidificación permite que algunos daños se detecten de forma relativamente fácil, sobre todo las fisuras. A modo de ejemplo, en la figura 3.16, se presenta el paramento aguas abajo de la presa de Aldeadávila. En la zona húmeda de la imagen se aprecia con facilidad la fisuración enramada que éste presenta. La zona seca también presenta fisuras, pero éstas son muy difíciles de distinguir inicialmente sino es a corta distancia.

Es interesante recalcar el hecho de que la humedad superficial retenida en los labios de las fisuras remarca su existencia. Así, una acción simple como mojar la superficie de cualquier hormigón puede facilitar la visualización de pequeñas fisuras.



*Figura 3.16.- Fisuras en zona húmeda del paramento aguas arriba de la presa*

Por otro lado, el paramento aguas abajo y los aliviaderos son más fáciles de estudiar con detalle. En primer lugar, porque toda su superficie es accesible al ojo humano; y en segundo lugar, porque, en algunos casos, se puede acceder a ellos o bien desde alguna galería o bien desde la zona de los estribos.

Con el objetivo de mostrar algunos de los signos de daño que pueden detectarse en el paramento aguas abajo y/o aliviadero se presenta la casuística acontecida en distintas presas. En primer lugar se presentan dos imágenes de la presa de Graus. En la figura 3.17a, se puede ver una vista general del aliviadero y de la parte izquierda del cuerpo de presa, donde se observa una degradación general del hormigón. Destacan, sobre todo, las fisuras y alguna que otra mancha rojiza de óxido. En la figura 3.17b se puede ver un detalle de la fisuración enramada que presenta el murete lateral del aliviadero.



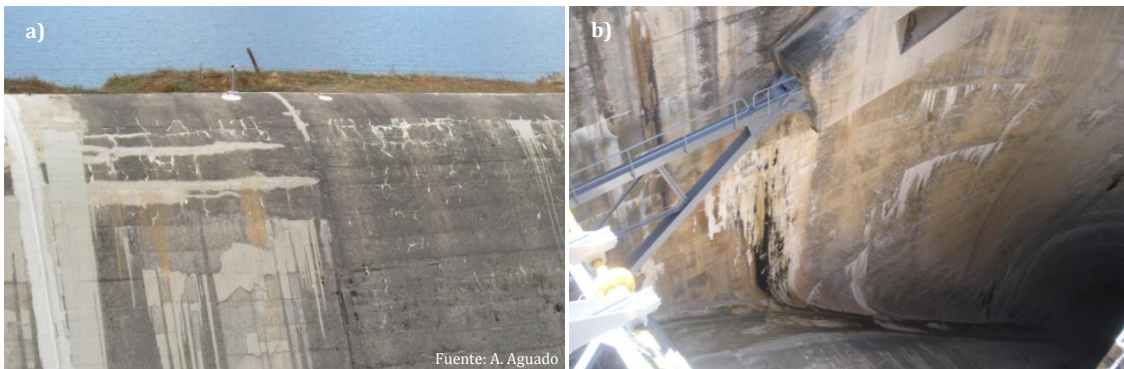
*Figura 3.17.- Signos de daño en paramento aguas abajo y aliviadero*

En la figura 3.18a se presenta la fisuración enramada que apareció en el paramento aguas abajo de la presa de la Molina (Suiza). Junto a la marcada fisuración enramada, consecuencia de una reacción expansiva, se puede ver el producto resultante de la reacción química. En la figura 3.18b, corresponde al aliviadero de la presa de Rumendo, donde además de una fisuración longitudinal, también se observa un intenso color ocre.



*Figura 3.18.- Signos de daño en paramento aguas abajo y aliviadero*

También los aliviaderos laterales pueden presentar signos patológicos, tal y como puede apreciarse en la figura 3.19. En estas imágenes, correspondientes a las presas de Portademouros (3.19a) y Aldeadávila (3.19b), pueden verse algunas fisuras y las manchas causadas en el hormigón por el material que supura a través de ellas.



*Figura 3.19.- Fisuras en aliviaderos laterales de hormigón*

Aunque sean las fisuras el principal signo que se manifiesta en los ejemplos anteriores, existen otras señales de deterioro. En la figura 3.20a se muestra una vista general del paramento aguas abajo de la presa de Ilse (previa a la rehabilitación hecha en el año 2011) donde se observa cierta desintegración de la superficie de hormigón provocada por la acción de ciclos hielo-deshielo. Por otra parte, en la figura 3.20b puede verse el paramento de la presa de Camarasa, afectada, según García (2004), por una reacción de desdolorización y por la disolución de la fase de CSH del cemento pórtland.

En la zona de la toma, algunas presas presentan una o varias pilas con un voladizo como soporte para algún elemento hidráulico. Durante esta etapa del proceso también se debe prestar especial atención a la unión de esta estructura con el cuerpo de la presa. En el caso de que exista un movimiento diferencial entre la pila y el cuerpo de presa se genera un estado tensional que muy probablemente acarree la aparición de unas fisuras inclinadas de corte directo. La dirección de la fisuración indicará que elemento se mueve más, si la presa o la pila, y hacia donde es el movimiento.

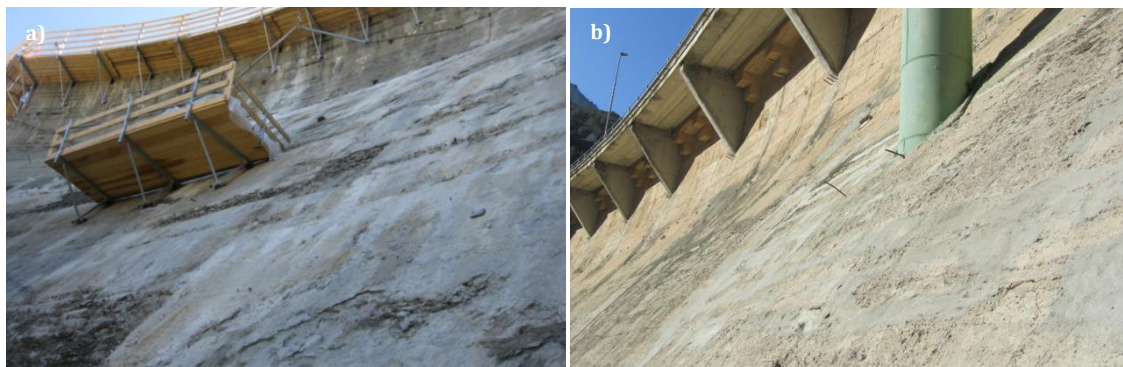


Figura 3.20.- Signos de daño en paramento aguas abajo y aliviadero

Para ilustrar esta posibilidad, se presenta la figura 3.21, adaptada de Buil *et al.* (2008), correspondiente a la presa de Mequinenza, donde puede verse una fisura de corte directo aparecida en una de las vigas del voladizo que une el cuerpo de presa con las pilas de la toma. Si la fisura es como la que se observa en la imagen, la única posibilidad válida es que el cuerpo de presa experimente un movimiento mayor que el de las pilas. La flecha en línea continua simboliza la tensión ocasionada en la viga cuando el cuerpo de presa se mueve hacia arriba, mientras que la flecha en línea a puntos simboliza la reacción que ejercen las pilas a este movimiento.



Figura 3.21.- Fisuración por corte directo; a) imagen general; b) y c) detalle fisura

El resultado de este estado tensional es la aparición de una fisura longitudinal, perpendicular a las dos trazas (marcada en línea a puntos en la figura 3.21b) como la que se aprecia en la imagen de detalle, figura 3.21c. Esto descarta una reacción expansiva, pues de ser así, el movimiento del elemento más esbelto y menos confinado (la pila) sería el más significativo, lo que redundaría en una fisura que sería perpendicular a la que existe, además posiblemente aparecería una fisuración enramada en todas las pilas.

A tenor de los signos, el equipo de la UPC dictaminó, Aguado *et al.* (2011), que el causante principal del movimiento de la presa de Mequinenza es la apertura de fisuras en el cuerpo de presa, localizadas en las juntas de construcción. Un movimiento que ha ido en aumento con la entrada de agua en las fisuras y la consecuente subpresión (Campos, 2012).



### 3.4.3.2.- Estudio del interior de la presa

#### Objetivo

Esta actividad comprende el estudio de la presa, si bien, en este caso desde su interior, siempre y cuando sea accesible, analizando tanto galerías como pozos. Algunos de los principales signos que pueden detectarse son: fisuras (por las que se pueden generar filtraciones de agua), manchas causadas por el arrastre de productos lixiviados, productos reactivos neoformados, deterioro superficial del hormigón, etc.

#### Estrategia

Las galerías permiten tener acceso al interior de la presa. Desde ellas es fácil observar el estado de la estructura, debiéndose revisar todos sus ramales. Zonas distanciadas por pocos metros pueden presentar signos de deterioro físico considerablemente distintos que pueden ser claves para el diagnóstico.

En la figura 3.22 se presentan tres imágenes de distintas galerías de la presa de Mequenza. La figura 3.22a y la figura 3.22b muestran distintos niveles de filtraciones. En ambos casos el agua que circula por la canaleta tiene un marcado tono rojizo, signo inequívoco del arrastre de óxidos de hierro. En cambio, el agua que corre por la canaleta de la galería de la figura 3.22c tiene una tonalidad blanquecina. Aun así, el elemento más significativo de la última imagen es el deterioro del hormigón, causado por la formación de thaumasita, Chinchón-Payá (2013), con incidencia reducida y sin repercusión estructural.



*Figura 3.22.- Estado de diferentes galerías de una misma presa*

Durante la inspección de las galerías el técnico debe saber cuál es su posición en todo momento. A fin de poder realizar un análisis minucioso del estado de la presa es necesario que se tenga localizado cuál es el sector de la galería que corresponde al paramento aguas arriba y cuál es el que corresponde a aguas abajo, además de saber qué bloque se está inspeccionando.

Si se localizan los signos espacialmente, además de determinar la correspondencia con los signos aparecidos en los paramentos, se podrán verificar a posteriori posibles particularidades constructivas, lo cual fue clave en el diagnóstico de la presa de Paso Nuevo. Ésta, en la cota 1339 m, presenta una galería con un ramal paralelo al eje del río

que da acceso al paramento aguas abajo. El ramal se encuentra dividido justo por su eje central por la junta vertical de hormigonado J9. El plano de hormigonado (figura 3.23a) revela que justo a esa altura la J9 separa un bloque hecho con hormigón expansivo y uno hecho con hormigón bueno.

En la figura 3.23b puede verse el ramal de la galería en cuestión. Se observa que la parte derecha se encuentra en muy buen estado (figura 3.23c), y en cambio la zona de la izquierda (donde se encuentra el hormigón expansivo según el plano de hormigonado) presenta un estado de deterioro superficial considerable (figura 3.23d). Detectar esta realidad permitió verificar que las observaciones teóricas y prácticas coincidían, y así, se corroboró que la causa principal de deterioro era una reacción expansiva del hormigón.

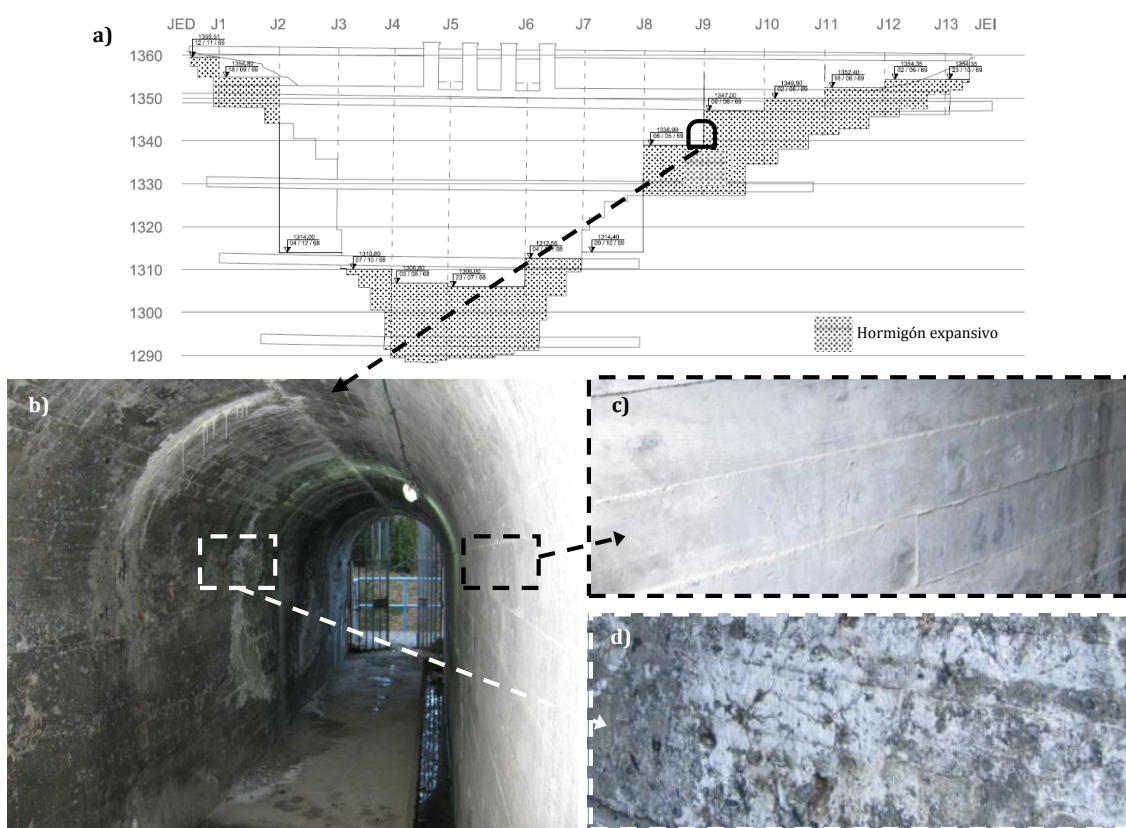


Figura 3.23.- Ramal de galería con hormigones en estado de conservación muy diferente

Las fisuras aparecen, de forma sistemática, en las galerías superiores. Su aspecto suele ser marcado y con una orientación preferencial. Puede darse el caso de que la fisuración sea rectilínea, extendiéndose solamente a lo largo de una sola cara de la galería (ver figura 3.24a correspondiente a la presa de Isola; Otto, 2007); o que sea oblicua, lo que significa que suele comenzar en el hastial de uno de los paramentos para ir cambiando su posición hasta finalizar, si la galería es lo suficientemente larga, en el hastial del paramento opuesto (ver figura 3.24b correspondiente a la presa de Paso Nuevo, Pardo *et al.*, 2011). La fisuración oblicua, normalmente, viene inducida por el movimiento diferencial entre bloques acompañado por un fenómeno de arrastre en las juntas verticales.

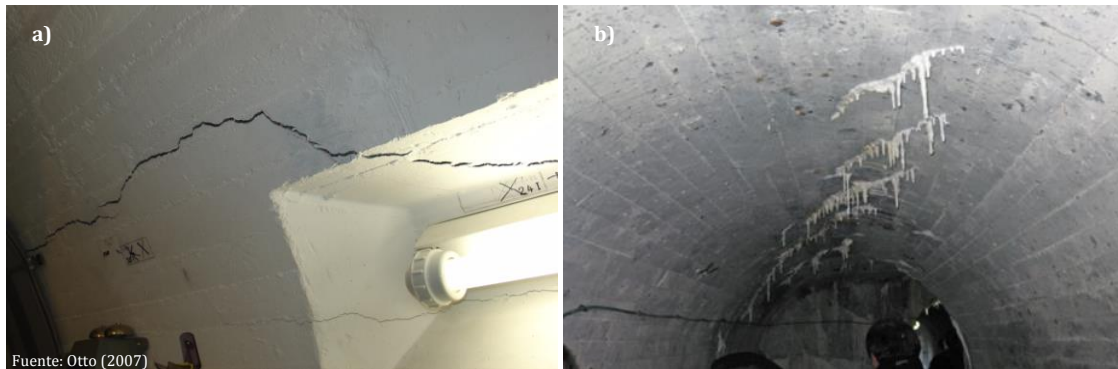


Figura 3.24.- Fisuración en galerías: a) rectilínea (Otto, 2007); b) oblicua

Finalmente, recalcar que se debe revisar el estado de los pozos donde se instalan los péndulos, bien sea desde las galerías, bien desde coronación. Este examen es el único sistema disponible (exceptuando costosas campañas de extracción de testigos) para poder saber cuál es el estado que presenta el hormigón en la zona central de un bloque. Para ilustrar la relevancia de la información que se puede obtener, se presenta la figura 3.25. En ella puede verse el pozo del péndulo 2 de la presa de Graus; en la primera imagen, de 1991, no se observa fisuración, mientras que en la segunda (2009) sí que se aprecia una marcada fisuración, lo que significa una evolución del daño entre esos años, llegando a dificultar la apertura de la tapa en 2014.

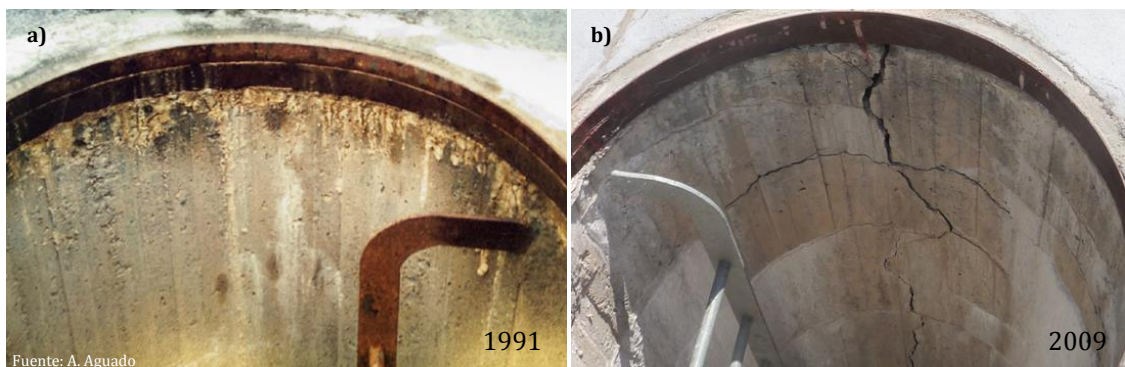


Figura 3.25.- Evolución de fisuras en un pozo de péndulo: a) 1991; b) 2009

#### 3.4.4.- Elementos móviles

##### Objetivo

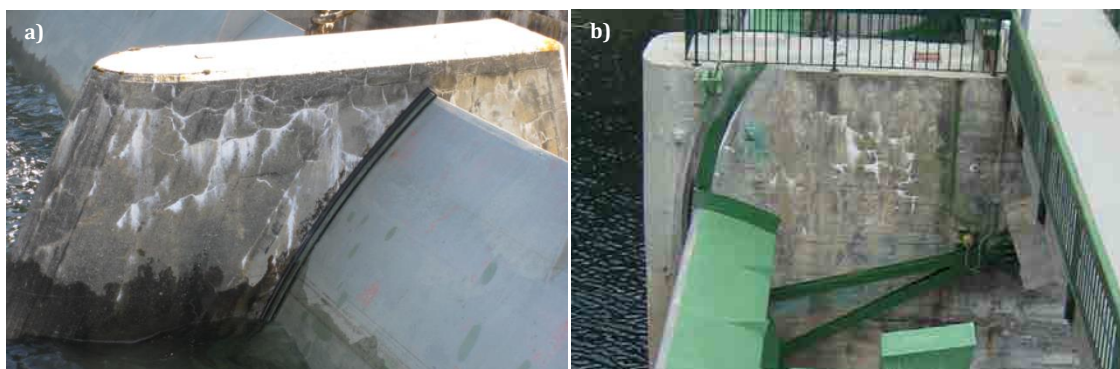
Este apartado pretende remarcar la importancia que tiene la inspección de los elementos móviles u órganos afines a la presa, que básicamente son: compuertas y turbinas.

##### Estrategia

En este tipo de instrumentos se debe prestar especial atención a atascos y cambios en la geometría de sus aperturas. Algunos problemas de operación en determinados equipamientos instalados en la presa pueden indicar una alteración del volumen del

hormigón adyacente. Uno de los indicativos más claros, en este sentido, es la detección de una dificultad creciente en la maniobra de apertura y cierre de las compuertas. Las condiciones de diseño y de exposición hacen que el hormigón sea propenso al desarrollo de patologías que generan alteraciones en su disposición. Los indicios más comunes, aparte de la fisuración, son el estrechamiento de las ranuras donde corren las compuertas y cambios en la alineación de sus ejes.

En la figura 3.26a, a modo de ejemplo, se presenta el muro de sustentación de la compuerta de Isola, y en la figura 3.26b el hormigón fisurado del tajamar donde se sustenta la compuerta de la presa de Tavascán. En Isola no se ha registrado ningún problema en su movimiento ordinario, aun así, es importante mantener un control regular, pues el estado del hormigón hace pensar que se podrían dar en un futuro. En Tavascán, en cambio, ante la aparición de problemas para maniobrar con las compuertas, se realizaron unos trabajos de rehabilitación que consistieron en la instalación de unos anclajes para limitar la capacidad expansiva del hormigón.



*Figura 3.26.- Fisuras en estructuras de compuerta*

No se puede olvidar que uno de los mayores problemas que se pueden presentar en una presa es el acodamiento de una o varias compuertas. La imposibilidad de abrirlas en el momento que las condiciones hidráulicas así lo requirieran podría llegar a producir una catástrofe de consecuencias incalculables.

También deben controlarse las turbinas, aunque en este caso más que por un problema de seguridad, sea para evitar la pérdida de rendimiento de la instalación. El técnico debe estar atento a posibles pérdidas de alineación de los ejes, al contacto de las partes móviles con el hormigón cercano y al aumento de la vibración y del ruido, signos causados, mayoritariamente, por una reacción expansiva del hormigón.

En la central de Pont de Rei, el bloque de hormigón que rodea la turbina sufre una expansión del hormigón, mayor en el lado libre que en el lado embebido en otro elemento estructural. Esta expansión generó una fisura (remarcada en la en la figura 3.27a) que tuvo que sellarse y anclarse mediante unos pernos (ver figura 3.27b) para evitar que el movimiento diferencial entre un lado y otro causara la desalineación del eje de la turbina y su consecuente pérdida de rendimiento.

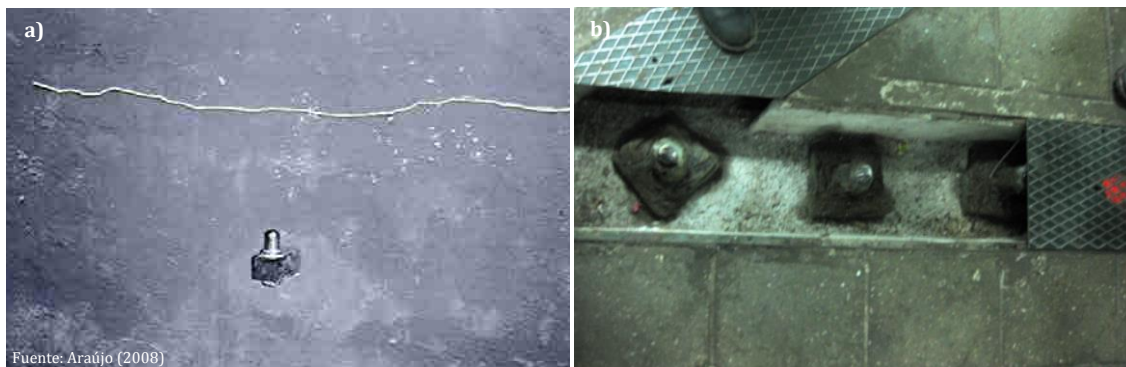


Figura 3.27.- Turbina de Pont de Rei: a) fisura (Araújo, 2008); b) pernos de anclaje

### 3.4.5.- Informe del examen físico

Desde que se realiza el examen físico de una presa hasta que se redacta el informe con el primer dictamen puede transcurrir cierto tiempo. En cualquier caso, y sobre todo, para evitar la pérdida de información, se recomienda realizar un informe sencillo referente a la inspección de campo, resaltando los elementos más destacados de la misma.

El documento, como mínimo, debe constar, de las siguientes partes:

- Antecedentes: apartado dedicado básicamente a presentar las principales características técnicas de la presa, su ubicación, el objetivo de la inspección, la fecha y el equipo que la realizó.
- Resultado inspección: reseña detallada de todos los datos recogidos durante el examen físico a la presa. El texto se acompaña de las fotografías más representativas tomadas durante la visita con las explicaciones y aclaraciones necesarias para contextualizarlas.
- Lista de actuaciones: enumeración tanto de las muestras recogidas como de las medidas realizadas durante la visita
- Conclusiones preliminares: descripción clara de la primera valoración que hace el equipo técnico encargado del diagnóstico del estado de la presa.

### 3.5.- TRABAJOS DE GABINETE

Finalizada toda actividad concerniente al examen físico de la estructura con los trabajos de gabinete, continua el proceso que debe llevar al técnico a esclarecer sus dudas respecto al origen del daño. Este apartado se centra en el tratamiento de los datos de auscultación registrados. Aunque no en todas las presas se dispone de históricos con una perspectiva temporal suficiente, el eje de este trabajo serán los datos referentes a los movimientos de nivelación y colimación. En algunos casos, si se estima necesario, se pueden utilizar también las medidas registradas por los péndulos (directos o invertidos) o por los extensómetros de varilla.

El apartado pretende relacionar los movimientos con los signos observados. A tal fin se va a comprobar, en primer lugar, si el comportamiento anómalo de la estructura es generalizado o puntual; y, en segundo lugar, se va intentar predecir la evolución de los movimientos.

### 3.5.1.- ¿El comportamiento anómalo es generalizado o está localizado?

#### Objetivo

Para dictaminar el origen de los daños es positivo saber si la presa se comporta toda del mismo modo o si en cambio solamente se ve afectada una parte de ella. Si el comportamiento es uniforme y los daños se reparten por toda la estructura, difícilmente ésta se vea afectada por una acción externa (casi siempre tienen un carácter local o poco generalizado), y por tanto el origen de los daños debe buscarse en el seno de la propia obra. Si en cambio, los daños se concentran en una zona localizada y, además, esta presenta unos movimientos marcadamente diferenciados del resto de la estructura, probablemente la causa sea externa.

#### Estrategia

Con la intención de dar respuesta a la pregunta de si el problema que padece la presa es generalizado o localizado, se presenta un método (aun entendiéndose que se puedan desarrollar otros igual de válidos) que realiza dos paralelismos entre los movimientos remanentes registrados y la geometría de los bloques de la presa. El primero es entre los movimientos de colimación (C) y la esbeltez de los bloques ( $j=h^2/b_{eq}$ ), y el segundo, entre los movimientos de nivelación (N) y la altura de los bloques (h). En el caso de que exista una correlación evidente entre movimientos y geometría, se puede concluir que el problema es generalizado. Si, por el contrario, la correlación no existe, se trata, probablemente, algún problema puntual.

Estas relaciones se obtienen de realizar un análisis geométrico simplificado de las deformaciones compatibles que pueden darse en un bloque. Los movimientos tanto de nivelación como de colimación pueden expresarse en función de los parámetros geométricos de la estructura y de las deformaciones específicas de los paramentos (suponiendo una distribución lineal compatible en el interior del bloque).

Así, si se considera que el bloque de una presa está empotrado en el suelo (comportamiento tipo ménsula) y se impone un gradiente de deformaciones constante a lo largo de su altura, los movimientos en coronación pueden definirse según las ecuaciones ec.3.1 y ec.3.2. En el anexo 3, basado en Martínez Roig *et al.* (1991), se presenta el proceso de obtención de las relaciones que permiten obtener estas ecuaciones.

$$N = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} h \quad [ec. 3.1]$$

$$C = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot \frac{h^2}{b_{eq}} \quad [ec. 3.2]$$

donde:  $\varepsilon_1$  = deformación paramento aguas abajo

$\varepsilon_2$  = deformación paramento aguas arriba

$h$  = altura del bloque

$b_{eq}$  = base equivalente del bloque =  $\frac{(b_m - b_M)}{\frac{b_m}{(b_m - b_M)} \cdot \ln\left(\frac{b_m}{b_M}\right) - 1}$

$b_M$  = base mayor del bloque

$b_m$  = base menor del bloque

Para poder realizar este análisis deben acometerse las siguientes tareas:

- Seleccionar algunos bloques (mínimo 3) representativos de la presa de los que se tenga registro de movimientos.
- Determinar las características geométricas de los bloques: Altura =  $h$ , Base =  $b_{eq}$ , Esbeltez =  $j = h^2/b_{eq}$ .
- Normalizar los movimientos, tanto de nivelación como de colimación, de todos los bloques, con los valores del bloque que mayores movimientos registra.
- Normalizar la altura y esbeltez de todos los bloques con la altura y la esbeltez del bloque que mayores movimientos registra.
- Confrontar en una gráfica los valores normalizados de las alturas con los de las nivelaciones de cada uno de los bloques seleccionados.
- Confrontar en una gráfica los valores normalizados de esbeltez y colimación de cada uno de los bloques seleccionados.

La base teórica de esta relación fue propuesta en base a unos trabajos realizados por Aguado *et al.* (1988) donde se estudiaron las posibles causas que influyen en el anómalo comportamiento de la presa de Graus. Martínez Roig *et al.* (1991) utilizó la relación entre los movimientos de colimación y la esbeltez de los bloques para verificar que los diferentes movimientos de cada bloque de esta presa eran fruto de una acción similar en todos ellos, debida a la expansión del hormigón. En este caso, para no complicar los cálculos, se consideró  $b_{eq} = 2\tau b_M$ , con  $\tau=1$ , lo que no es correcto, aunque puede aceptarse como primera aproximación.

Transcurridos más de veinte años, y con los datos de los movimientos actualizados, se vuelve a aplicar, a modo de ejemplo, esta metodología a la presa de Graus (ver figura 3.28), para verificar si la hipótesis planteada en su momento sigue siendo válida. En este caso, se verifica, además de la correlación existente entre los movimientos de colimación y la esbeltez de los bloques, la correlación entre los movimientos de nivelación y su altura.

En la presa de Graus, los movimientos de colimación y nivelación se miden en 6 bases, aunque para este estudio solamente se han cogido los datos de cinco de ellas: C2-N2, C3-N3, C4-N4, C5-N5 y C6-N6; correspondientes a los bloques: B6, B5, B4, B3 y B2,

respectivamente. En la tabla 3.5 se presentan las características geométricas de estos bloques y los movimientos registrados, así como el valor de las relaciones necesarias para realizar la representación gráfica, que se denotan por estar ensombrecidas sus casillas con un azul muy suave.

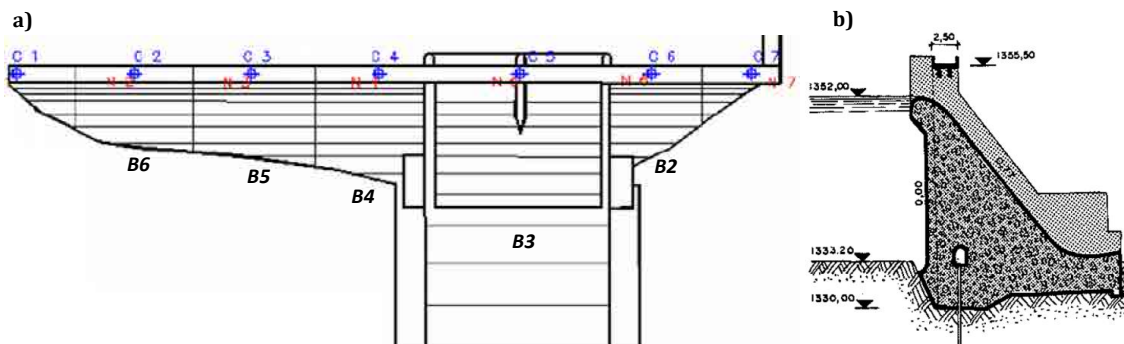


Figura 3.28.- Presa de Graus: a) planta; b) perfil transversal

Base	Bloque	h(m)	b <sub>M</sub> (m)	b <sub>eq</sub> (m)	j=h <sup>2</sup> /b <sub>eq</sub>	C (mm)	N (mm)	j/j <sub>5</sub>	C/C <sub>5</sub>	h/h <sub>4</sub>	N/N <sub>4</sub>
N6-C6	2	18,60	19,40	26,26	13,17	100,10	82,35	0,49	0,46	0,86	0,88
N5-C5	3	25,20	21,40	28,89	21,98	165,30	77,96	0,83	0,76	0,96	0,93
N4-C4	4	26,00	19,04	26,26	25,74	216,60	87,79	0,97	0,99	1,00	1,00
N3-C3	5	21,40	11,22	17,31	26,45	216,90	87,12	1	1,00	0,82	0,99
N2-C2	6	15,50	8,96	14,61	16,44	153,50	68,73	0,62	0,71	0,59	0,78
<i>b<sub>m</sub> = 4,5m para todos los bloques</i>											
<i>X/X<sub>t</sub> = Variable X del bloque i, normalizada con la variable X del bloque t</i>											

Tabla 3.5.- Datos necesarios para el estudio de relaciones

En la figura 3.29 se presentan las gráficas con la confrontación de valores normalizados de esbeltez-colimación y altura-nivelación. Como puede observarse fácilmente en las dos gráficas existe una correlación entre los movimientos y la geometría de los bloques.

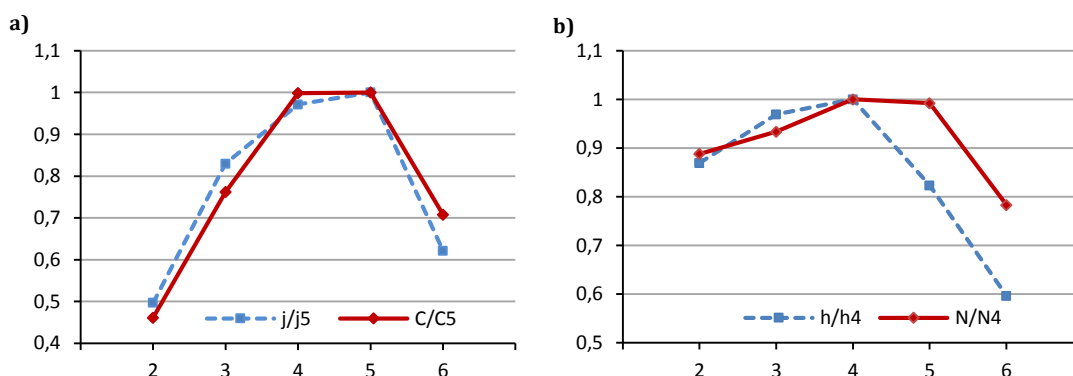


Figura 3.29.- Correlación; a) esbeltez-colimación; b) altura-nivelación



La conclusión que puede sacarse de estos gráficos es que la afectación que padecen los bloques es independiente de su ubicación y que la diferencia de valores medidos responde únicamente a la diferencia geométrica de estos. Quedando corroborada, por esta vía, la hipótesis de que el origen del comportamiento de la estructura tiene un carácter general y afecta a toda la presa por igual.

Como contraejemplo, se presenta el caso de la presa de San Esteban (ver figura 3.30), donde se ha aplicado la metodología y se ha determinado que el problema tiene un carácter localizado. En esta presa, los movimientos de nivelación y colimación solamente se registran en 3 puntos, bases A, B y C, correspondientes a los bloques 3I, 0 y 3D. Aunque es un número justo de bases, la calidad del estudio no queda afectada, pues se consideran sus datos suficientemente representativos, al encontrarse las bases repartidas de forma equilibrada a lo largo de la coronación.

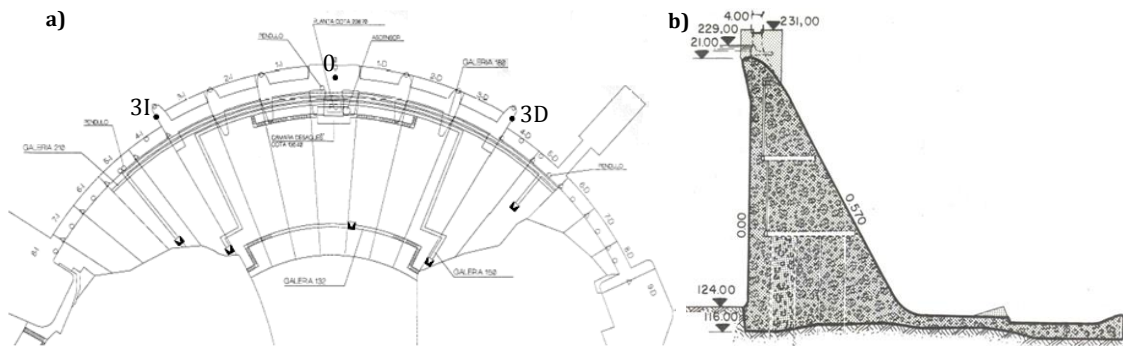


Figura 3.30.- Presa de San Esteban: a) planta; b) perfil transversal

En la tabla 3.6 se presentan las características geométricas de los bloques, los movimientos registrados, así como el valor de las relaciones necesarias para realizar la representación gráfica, que se denotan por estar ensombrecidas con un azul muy suave.

Base	Bloque	h(m)	$b_M$ (m)	$b_{eq}$ (m)	$j=h^2/b_{eq}$	C (mm)	N (mm)	$j/j_5$	C/C <sub>5</sub>	h/h <sub>4</sub>	N/N <sub>4</sub>
A	3I	107,0	67,50	80,51	142,20	33,04	117,16	1	1	1	1
B	0	107,0	67,50	80,51	142,20	25,40	108,85	1	0,76	1	0,92
C	3D	107,0	67,50	80,51	142,20	24,55	76,23	1	0,74	1	0,65
$b_m = 6m$ para todos los bloques											
$X/X_i =$ Variable X del bloque i, normalizada con la variable X del bloque t											

Tabla 3.6.- Datos necesarios para el estudio de relaciones

Nótese que los tres bloques tienen las mismas características geométricas, por tanto para que exista correlación deberían presentar movimientos relativamente similares. Los movimientos, en cambio, son notablemente diferentes lo que indica que no puede existir correlación.

En la figura 3.31 se presentan las gráficas con la confrontación de valores normalizados de altura-nivelación y esbeltez-colimación. Como se apuntaba al ver los datos de la tabla, no existe correlación alguna entre la geometría y los movimientos

medidos. El bloque 3I, que se encuentra en la margen derecha, es el que mayor movimiento registra tanto en nivelación como en coronación. Este estudio, por tanto, apunta a que el fenómeno que causa la alternación del comportamiento es externo, dando consistencia a los argumentos planteados en los apartados 3.3.1 y 3.4.1.1.

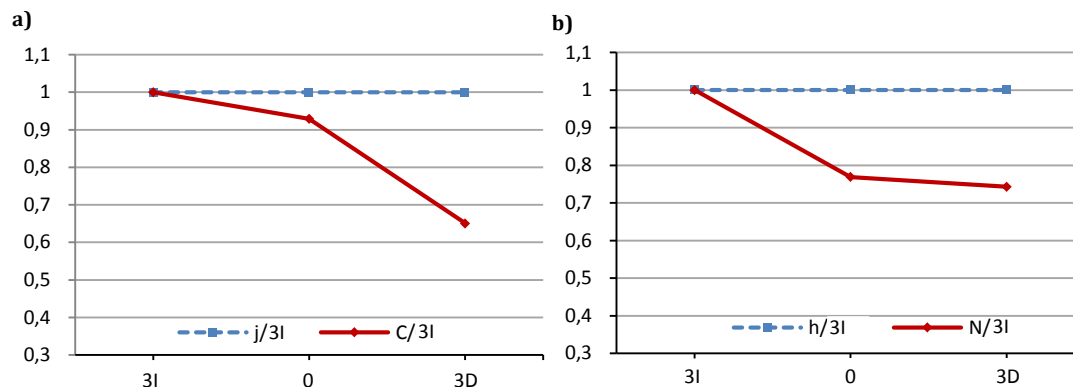


Figura 3.31.- Correlación; a) esbeltez-colimación; b) altura-nivelación

Como se ha visto en los dos ejemplos presentados, cuando se dispone de la representación gráfica es relativamente fácil observar si el movimiento de los bloques está vinculado a sus características geométricas o no. Es importante tener en cuenta que cuanto mayores sean los valores medidos (en valor absoluto) más fácil será descifrar el comportamiento. Los valores pequeños pueden distorsionar el razonamiento porque se pueden ver afectados por el vaivén estacional.

Hasta la fecha, este procedimiento se ha aplicado en muy pocas presas (diagnósticos de Graus, Paso Nuevo, San Esteban y Urrúnaga) aunque es muy válido para tratar de forma rápida y sencilla los movimientos de todo tipo de patología y presa.

### 3.5.2.- Interpretación de los movimientos y predicción de su evolución

#### Objetivo

El objetivo que persigue esta tarea es conocer “*el timing*” que sigue el proceso patológico y hacer una predicción de cuál va a ser su evolución. A tal fin se intenta ajustar una curva  $z$  a los movimientos registrados. De esta manera se puede determinar de forma aproximada la magnitud máxima que pueden alcanzar los movimientos y el momento en que esto puede suceder. Es condición indispensable que el proceso patológico sea evolutivo y no tenga un carácter puntual, temporalmente hablando.

#### Estrategia

Si el registro de movimientos dispone de una serie de datos considerable, cuanto más larga sea la serie de registros mejor, el técnico puede plantearse utilizar un modelo analítico propuesto por Aguado *et al.* (1998), que se sirve de una función exponencial, ecuación 3.3, para ajustar una ecuación matemática que represente satisfactoriamente el movimiento anormal de las estructuras. La base de este modelo surgió para estudiar los

movimientos remanentes observados en coronación de presas de gravedad afectadas por reacciones sulfáticas. Ahora, se plantea utilizarlo para analizar los movimientos de cualquier tipología de presa, independientemente del origen de los daños.

$$z = A + B \left( 1 - e^{-\left(\frac{t}{C}\right)^p} \right) \quad [\text{ec. 3.3}]$$

donde: A = valor de la ordenada en el origen

B = rango de variación de la curva en ordenadas

t = tiempo

C = valor de la abscisa para el cual se produce el punto de inflexión en caso de curvas con valores de p mayor que 1

p = parámetro que da la forma de la curva

En la figura 3.32 (Araújo, 2008) se muestran las características de la ecuación 3.3. Los parámetros A, B, C y p se obtienen gracias a un ajuste estadístico por mínimos cuadrados. El parámetro A permite estimar los movimientos acontecidos en el caso de que el registro de los mismos se iniciara con posterioridad a la puesta en servicio de la presa. El B, por su parte, establece el máximo movimiento esperado. Y, finalmente, el C es el punto de inflexión de la curva en el eje de abscisas, es decir, representa el momento en que cambia la tendencia de los movimientos. El parámetro p es el factor que determina la pendiente de la curva en el punto de inflexión, además de definir si la curva es cóncava, convexa, lineal o tiene una forma de S.

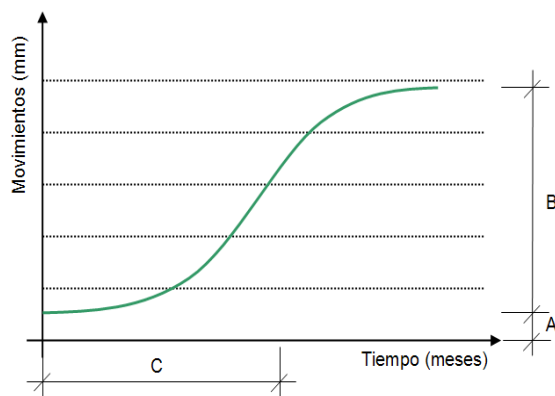


Figura 3.32.- Características de la curva exponencial dada por la expresión ec. 3.3

En el caso de conseguir encontrar una curva que ajuste bastante bien los movimientos registrados (índice de correlación mayor a 0,9), se puede obtener un orden de magnitud razonable de la evolución en tiempo y extensión que estos van a tener. Estas predicciones, que deben entenderse como tales y no asimilarse como dogmas, permiten que los técnicos organicen los trabajos de rehabilitación o mantenimiento con una ligera noción de aquello que les espera en el espacio temporal más inmediato.

A modo de ejemplo, se muestran los ajustes realizados para la presa de Graus (ver figura 3.33). El ajuste de los movimientos de colimación se realiza considerándose que el punto de inflexión se encuentra a trescientos cincuenta meses. En cambio, el ajuste de los movimientos de nivelación se realiza considerando que el punto de inflexión se encuentra a cuatrocientos meses.

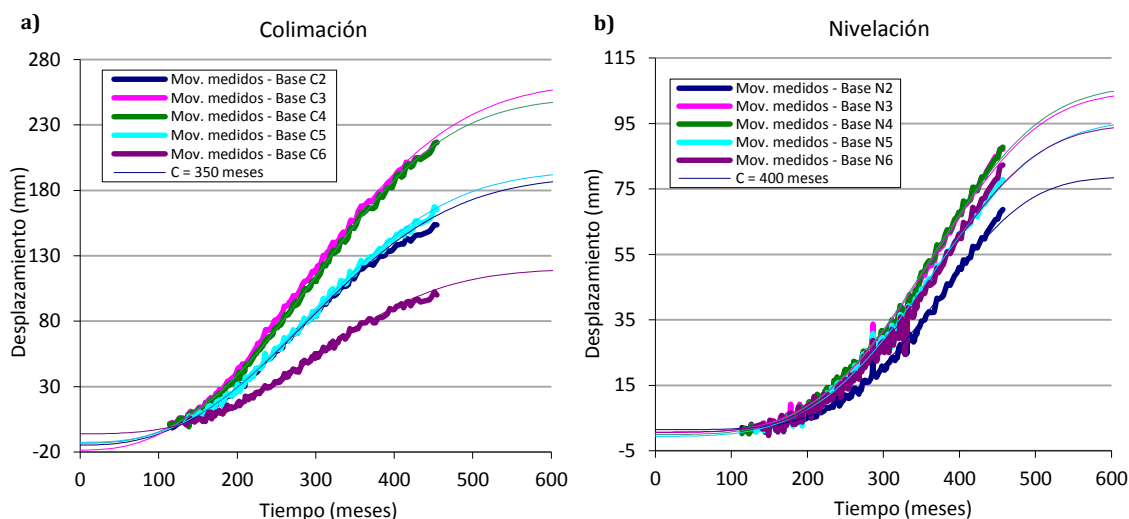


Figura 3.33.- Movimientos ajustados: a) colimación; b) nivelación

La diferencia de cincuenta meses (dos años y dos meses) entre los puntos de inflexión no se puede considerar relevante. Se debe tener presente que ante unas series tan largas de datos, dos años no son significativos, sobre todo si se tiene en cuenta que los valores surgen de aproximaciones estadísticas. No obstante, esa diferencia puede ser signo de otros factores, que, evidentemente, deben investigarse.

Gracias a estas gráficas se puede saber que la tendencia de los movimientos de Graus va a seguir siendo alcista al menos durante algunos años (diez aproximadamente). Aunque el cambio de diagnóstico formulado en esta presa (ver §3.2) puede modificar las previsiones iniciales, las dos gráficas anteriores apuntan que el movimiento máximo de colimación va a encontrarse cercano a los 250 mm y que el movimiento máximo de nivelación va a estar por encima de los 100 mm.

## 3.6.- 1ª HIPÓTESIS DE DIAGNÓSTICO

### 3.6.1.- Etiología del daño y dictamen

#### Objetivo

Para dar por finalizada la primera fase del estudio se debe identificar el origen del daño y así poder definir la 1ª Hipótesis de Diagnóstico. Este apartado pretende ayudar al ingeniero (sobre todo al inexperto) a gestionar de manera correcta toda la información que se ha aglutinado en las distintas etapas, con la voluntad de que pueda alcanzar su objetivo de forma eficiente.

### Estrategia

Tal y como ya se explicó en el capítulo 2, las acciones que pueden causar los daños más significativos en una presa de hormigón son: reacciones expansivas, ataque por ácidos, erosión por abrasión, erosión por cavitación, ciclos hielo-deshielo, efectos térmicos, acciones (deformación) del macizo rocoso, y la subpresión.

En principio, el resto de acciones que podrían afectar a estas estructuras, o bien son acciones de proyecto (peso propio, empuje hidrostático, empuje/impacto del hielo...), o bien son acciones causadas por fenómenos extraordinarios que se alejan de la explotación ordinaria de la estructura (sismo, oleaje extraordinario...), por lo que no se han tenido en cuenta en este apartado.

Para poder ayudar al técnico a identificar cual puede ser la causa del daño, se presenta un cuadro sinóptico, figura 3.34, que le va a guiar en su razonamiento a partir de la identificación de los daños más relevantes, que son:

- Fisuración (mapeada y longitudinal)
- Movimientos remanentes
- Degradación superficial del hormigón

En base a la argumentación desarrollada a lo largo del capítulo, el cuadro desgrana, a partir de los signos principales de daño, una serie de conceptos y preguntas que conducen al técnico hasta determinar una acción patológica. A priori, ésta es la que mejor concuerda con los signos observados y por tanto va ser considerada la causa principal de la disfunción estructural. Este cuadro, obviamente, no recoge toda la casuística ni tampoco todos los tipos de afecciones que puede padecer una presa de hormigón, pero trata de recoger aquellos fenómenos que se consideran más significativos.

Para facilitar su entendimiento se aconseja seguir el cuadro de izquierda a derecha. Es decir en el caso que si exista “fisuración” en la presa, se debe intentar avanzar hacia abajo a partir de ese concepto, y no a partir de “movimientos remanentes” ni “degradación superficial del hormigón”.

Además de valorar los signos según el cuadro sinóptico, se deben valorar las condiciones en las que estos aparecieron. Un condicionante fundamental es el momento de aparición, pues como se ha explicado a lo largo del texto hay patologías que necesitan de cierto tiempo para manifestarse (por ejemplo las reacciones expansivas), mientras que otras pueden hacerlo cuando se inicia la explotación de la estructura (por ejemplo las acciones térmicas).

No se puede olvidar que existen patologías secundarias que pueden causar defectos múltiples de grado variable. Aunque no exista relación entre las patologías principal y secundarias, la aparición conjunta de signos puede confundir al técnico a la hora de seguir el cuadro sinóptico y por tanto en el establecimiento de un dictamen.

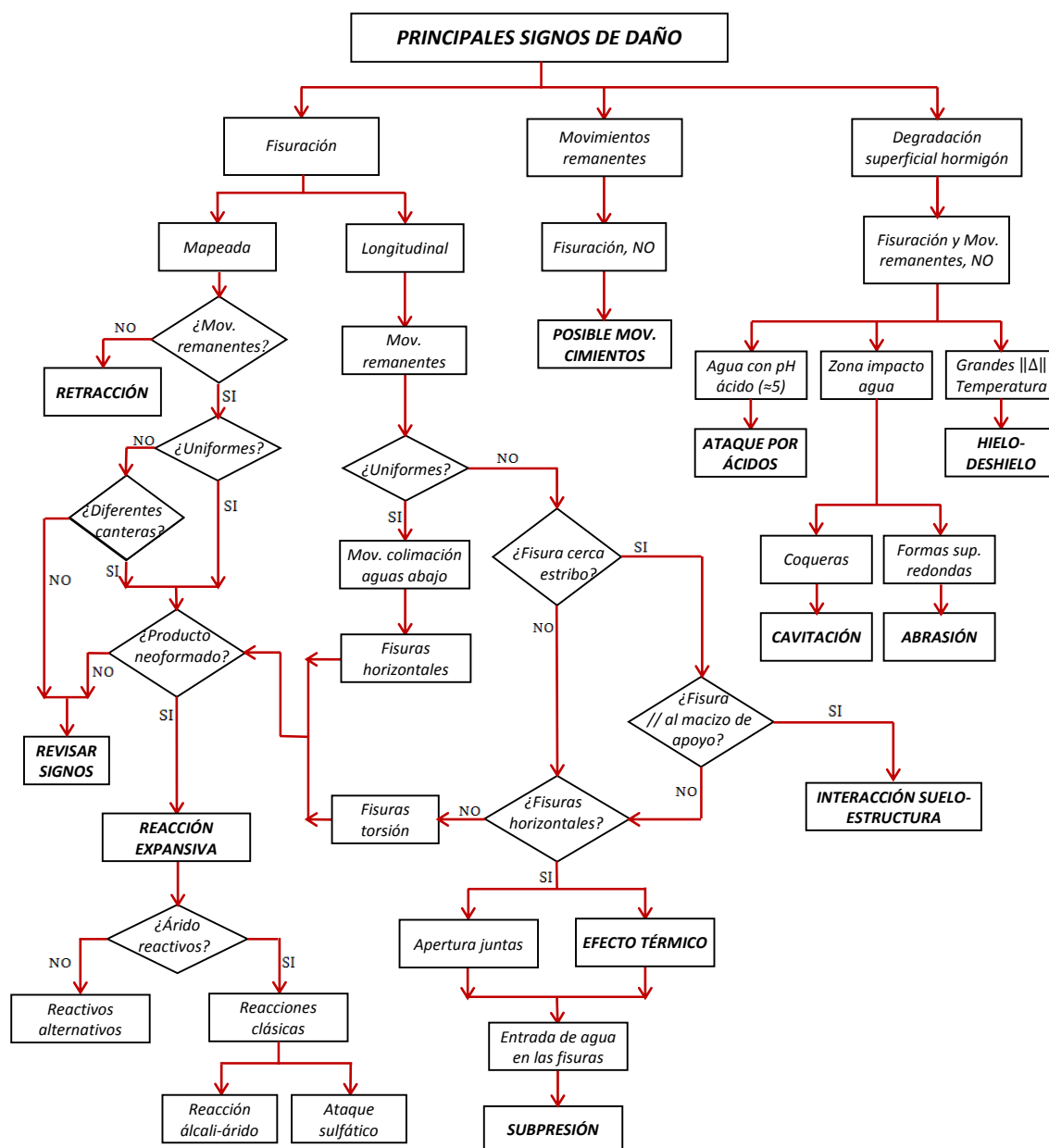


Figura 3.34.- Cuadro sinóptico de ayuda al diagnóstico

### 3.6.2.- Modelo estructural simple

#### Objetivo

Quando se ha definido la 1ª Hipótesis de Diagnóstico, dependiendo de la patología que se sospeche que afecta a la presa, se puede plantear la realización de un modelo estructural lineal simple donde implementar un régimen de acciones consecuentes con la hipótesis. El objetivo es valorar la validez conceptual de la hipótesis, analizando si el comportamiento del modelo se puede asimilar al de la estructura real.

Los modelos simples presentan la gran ventaja de que acortan, sustancialmente, el tiempo de implementación y razonamiento con respecto a sistemas más complejos. En ningún caso se pretende que reproduzcan exactamente los parámetros ni geométricos ni estructurales de la presa. Tampoco pretenden substituir los modelos complejos realizados, por ejemplo, con el método de los elementos finitos, que constituyen uno de los ejes fundamentales de la segunda fase de estudio (ver figura 3.1).

### Estrategia

Toda presa de gravedad y contrafuertes puede asemejarse a un bloque de referencia y ser analizada con modelos 2D, si se tiene la precaución de entender que las conclusiones están sujetas a las cargas que pueden aportar los bloques adyacentes (Ruggeri, 2003). Los numerosos estudios en 2D realizados para estudiar el comportamiento de este tipo de estructuras son la prueba de la bondad de sus resultados (Cervera *et al.*, 1995; Huang y Pietruszczak, 1999; Mansouri *et al.*, 2011; Ali *et al.*, 2012; y Khosravi y Heydari, 2013; entre muchos otros).

Aunque los modelos simples a utilizar pueden ser muchos, en este trabajo se ha optado por representar las presas mediante un sistema de dos barras empotradas. De esta manera, resolviendo un ejercicio clásico de resistencia de materiales mediante el método matricial del equilibrio (véase anexo 4) puede evaluarse, de manera sencilla, el comportamiento de la estructura. Las acciones que se aplican al sistema de barras deben reproducir de la mejor manera posible la hipótesis de diagnóstico. Para hacerlo se pueden introducir acciones internas o externas a cada una de las barras, según sea el caso.

Cada una de las barras del modelo viene a representar un paramento. La barra que representa el paramento aguas bajo se sitúa sobre la traza de teórica que marcan los drenes, y la otra barra resigue el perfil del paramento aguas abajo. En la figura 3.35a se presenta, a modo de ejemplo, el modelo que podría utilizarse para el estudio de la presa de Graus. El objetivo de estos modelos es evaluar el movimiento que experimenta el punto de unión de ambas barras (marcado en rojo en la figura 3.35b), entendido como un punto cualquiera de la coronación de la presa.

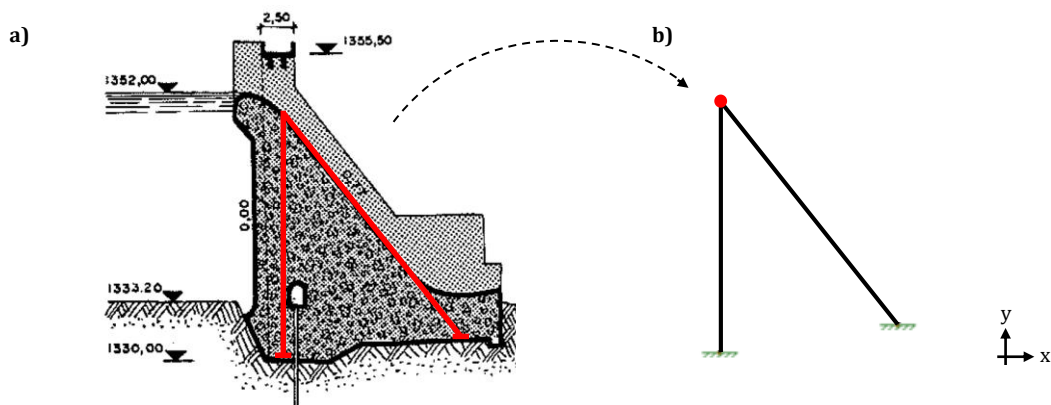


Figura 3.35.- a) Simplificación estructural de Graus; b) Estructura de dos barras a resolver

Una de las claves del modelo se encuentra en determinar las características físicas y geométricas que completan la definición de las barras y que van a plasmar las diferencias constructivas de ambos paramentos. Los parámetros a determinar para cada barra son: el módulo de deformación del hormigón ( $E$ ), longitud de la barra, el ángulo interno de las barras con la horizontal, el momento de inercia y el área. El módulo de deformación de la barra viene predeterminado por las características del material que constituye la zona próxima al paramento.

El ángulo que forman las barras con la horizontal y su longitud se pueden determinar fácilmente a partir de la figura 3.35. Para determinar el área de la barra y su momento de inercia, claves en la diferenciación conceptual de ambos paramentos, se ha decidido utilizar la planta de un bloque característico, que se divide en dos fragmentos, uno representativo de cada paramento, tal y como puede verse en la figura 3.36.

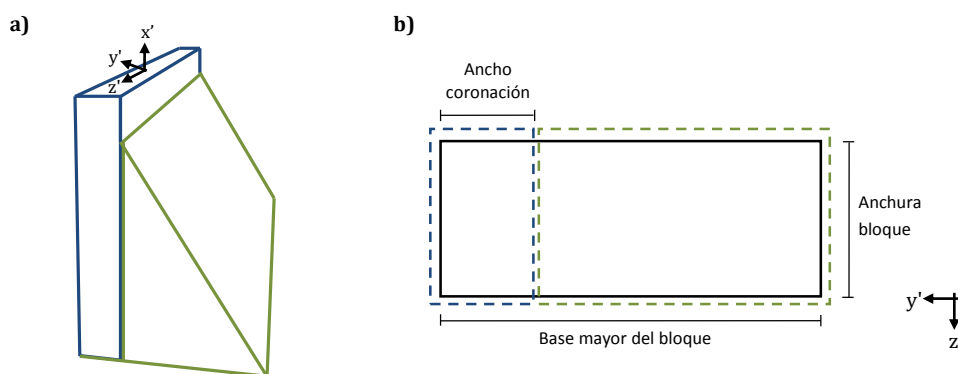


Figura 3.36.- Simplificación utilizada para el cálculo del momento de inercia y el área

Es notorio que el paramento aguas abajo está fisurado, disminuyéndose por tanto su rigidez. Para tomar en consideración este hecho relevante se reduce el momento de inercia de este paramento un 15%. Para la presa de Graus, las características físicas de las barras del modelo son las que se presentan en la tabla 3.7. El módulo de deformación se ha obtenido de Campos (2012).

Magnitud barra	A. Arriba	A. Abajo
E (GPa)	$E_r = 20,00$	$E_b = 20,00$
Longitud (m)	$L_r = 25$	$L_b = 26$
Ángulo con horizontal (rad)	$\alpha = \pi/2$	$\beta = 0,88$
Momento de Inercia ( $m^4$ )	$I_r = 6857.86$	$I_b = 34033.98$
Área ( $m^2$ )	$A_r = 94.08$	$A_b = 441$

Tabla 3.7.- Características geométricas y físicas de las barras del modelo

Cuando se han determinado las características físicas de las barras del modelo solamente se les deben aplicar unas acciones que sean consecuentes con el diagnóstico. Como ya se ha comentado al inicio del capítulo, el equipo del trabajo de la UPC dictaminó



en 2011 que la presa de Graus se ve afectada por dos reacciones expansivas, un ataque sulfúrico interno (ASI) y una reacción álcali árido (RAA).

Para simular la expansión se aplica una fuerza axial ( $N_A$ ) constante sobre toda la superficie de la barra, que se obtiene, según la ecuación 3.4, de multiplicar una deformación unitaria impuesta, el módulo de deformación del hormigón y el área de la sección. En este tipo de modelos simplificados sólo se introduce como acción las deformaciones uniformes en cada paramento (barra) sin considerar las acciones directas como el peso propio y el empuje hidrostático, ni las acciones indirectas de tipo térmico.

$$\epsilon = N_A / (E \cdot A) \longrightarrow N_A = \epsilon \cdot E \cdot A \quad [ec. 3.4]$$

donde:  $\epsilon$  es la deformación unitaria causada por la expansión (mm/m)

$E$  es el módulo de deformación del hormigón (GPa)

$A$  es el área de la sección (m<sup>2</sup>)

En la presa de Graus, la deformación unitaria impuesta en el paramento aguas arriba es  $\epsilon_r = 1,6$  mm/m, y la impuesta en el paramento aguas abajo es  $\epsilon_b = 5$  mm/m, valores utilizados en el modelo lineal de elementos finitos de Campos (2012), considerado de referencia dada su relevancia. La diferencia de deformación entre ambos paramentos se fundamenta en el hecho de que el paramento aguas arriba solamente está afectado por la RAA, mientras que el de aguas abajo, donde se dispone de oxígeno atmosférico, está afectado también por la ASI, que es notablemente más virulenta que la RAA.

El cálculo se realiza con el método matricial del equilibrio (presentado en el anexo 4 e implementado en una rutina de Matlab). Esta metodología de cálculo utiliza las relaciones esfuerzos-movimientos, combinando las diversas ecuaciones de las barras en un sistema de ecuaciones acción-movimiento de la estructura (Suárez y Codina, 1995).

En la tabla 3.8 se presenta el movimiento de un bloque de referencia, de características similares a los bloques 3 y 4 de la presa, que se compara con los valores calculados en estos bloques por el modelo lineal 3D de Campos (2012) y con los movimientos medidos por el sistema de auscultación. Como puede verse, el modelo reproduce bastante bien el movimiento de colimación medido en el bloque 3, mientras que se aleja notablemente de las medidas registradas en el bloque 4. Lo mismo que sucede al modelo de Campos (2012). El movimiento vertical calculado es notablemente inferior a los medidos en ambos bloques y a los calculados por Campos (2012).

	Modelo simple	Modelo lineal 3D Campos (2012)		Sistema auscultación	
	$\epsilon_r = 5$ mm/m $\epsilon_b = 1,62$ mm/m	Bloque 3	Bloque 4	Bloque 3	Bloque 4
Movimiento (mm)	x = -162,70	x = -144,02	x = -165,3	x = -165,30	x = -216,60
	y = 36,90	y = 52,98	y = 65,55	y = 77,96	y = 87,79

Tabla 3.8.- Resultados de la aplicación de las dos hipótesis en el modelo

Los resultados son comparables con el modelo lineal de Campos (2012) y, aunque no son excelentes, permiten observar que se da un notable movimiento horizontal que es de un orden de magnitud mayor que el vertical. Con los resultados del modelo simple se hubiera podido afirmar que la hipótesis quedaba validada conceptualmente. Campos (2012), para mejorar sus resultados, desarrolla un modelo no-lineal que toma en consideración el movimiento que aportan en la realidad las fisuras abiertas en los paramentos, básicamente el de aguas abajo, aperturas que no se consideran explícitamente en los modelos lineales y que se agrandan con el efecto de la subpresión.

Teniendo en cuenta la calidad de la información obtenida con el modelo simple y el esfuerzo conceptual y computacional, que son mínimos, es razonable desarrollar este tipo de procedimientos para contrastar la primera hipótesis de diagnóstico cuando se estudia el daño en una presa de planta recta.

Las presas bóveda merecen mención especial. Por su complejidad estructural, normalmente se estudian con modelos 3D. Esto hace que sea muy difícil encontrar un modelo simple y útil para su estudio.

En cualquier caso, un resultado positivo no es condición suficiente para determinar fehacientemente que los daños de la estructura son causados por una determinada patología. El proceso diagnóstico debe demostrar que existe relación causa-efecto entre la patología, el comportamiento estructural y los daños manifestados. De no existir esta relación causa-efecto se considerará que la patología es secundaria y que coexiste con otra que es la causante principal de los daños.

### 3.6.3.- Informe de diagnóstico

Determinado el origen de los daños, el equipo técnico debe realizar un informe con el dictamen diagnóstico para comunicar de forma oficial al ente que gestiona la estructura cual es y el porqué de la 1ª Hipótesis de Diagnóstico.

El documento, como mínimo, debe constar de las siguientes partes:

- Introducción: breve descripción que enmarca el trabajo, donde se especifica quien lo encarga y cuál es su objeto.
- Antecedentes: resumen de las principales características técnicas de la presa, donde se detallan las particularidades que hayan podido marcar su construcción o explotación.
- Documentación recibida: breve descripción de la información previa, oral y escrita, disponible por el equipo técnico. La información escrita se puede adjuntar en un anejo al informe.
- Resultado inspección: reseña detallada del *Informe del Examen Físico*, donde además de todos los datos recogidos durante el examen físico a la presa y de las fotografías que los acompañan, se adjuntan las primeras conclusiones que se extrajeron.

- Estudio del caso: apartado dedicado a justificar el razonamiento y motivos por el cual el equipo técnico es capaz de definir un diagnóstico. Se especifican todos aquellos detalles que se consideren de interés para el cliente.
- Conclusiones: explicación clara y concisa de la 1ª Hipótesis de Diagnóstico, basada en las especificaciones del apartado anterior.
- Recomendaciones y plan de actuación: el informe se puede cerrar con la enumeración de una serie de recomendaciones que deberían guiar los trabajos de laboratorio y estudios numéricos que son objeto de la segunda fase del proceso diagnóstico. En el supuesto caso de que las conclusiones del dictamen sean suficientemente concluyentes este apartado debe servir para proponer un tratamiento que permita corregir los daños presentes en la estructura.

Si el gestor comprende y acepta la 1ª Hipótesis de Diagnóstico se debe dar inicio, o bien a la segunda fase del proceso diagnóstico, o bien al tratamiento corrector en el caso que se decida que el diagnóstico es firme y exista cierta urgencia para reparar el daño.

## CAPÍTULO 4

# CONTRASTACIÓN DEL MODELO DE DIAGNÓSTICO: PRESA DE URRÚNAGA

### 4.1.- INTRODUCCIÓN

En el capítulo 3 se ha presentado una metodología enfocada a determinar la 1ª Hipótesis de Diagnóstico cuando se detecta un daño en una presa. En el presente capítulo se implementa esta metodología de diagnóstico en la presa de Urrúnaga (ver figura 4.1), propiedad de la empresa Iberdrola Generación, quien a través del Proyecto Horex propició esta investigación.



*Figura 4.1.- Vista general de la presa (Gil, 2009)*

La presa de Urrúnaga, a lo largo de los años, ha sido objeto de diversas actuaciones de conservación y mantenimiento, sin que se haya detenido la evolución de los daños. Es necesario, por tanto, definir una nueva línea de acción, basada en un diagnóstico claro, para intentar subsanar el problema existente.

El principal objetivo de este capítulo es contrastar la validez y efectividad de la metodología de diagnóstico presentada en el capítulo 3 mediante su aplicación a una estructura real. Esta voluntad hace que se implemente en la presa de Urrúnaga, aprovechándose la oportunidad para intentar dilucidar el origen de los daños que presenta la presa.

El capítulo recoge todos los trabajos realizados, si bien lo hace de forma sucinta, para conseguir que el propio capítulo sea un trabajo cerrado en sí mismo con el único propósito de facilitar la comprensión al lector.

El capítulo, perteneciente al segundo bloque de este trabajo (§1.4), se divide en siete grandes apartados que reproducen, de forma prácticamente idéntica, la estructura del capítulo 3.

- Estudio de la historia “clínica” (§4.2)
- Inspección de campo (§4.3)
- Análisis de muestras (§4.4)
- Trabajos de gabinete (§4.5)
- 1ª Hipótesis de Diagnóstico (§4.6)
- Ensayos de laboratorio (§4.7)
- Conclusiones generales (§4.8)

El apartado (§4.7) queda fuera de la metodología propuesta, aun así se ha incorporado en este caso de estudio porque puede ayudar al lector a comprender la validez de la 1ª Hipótesis de Diagnóstico que se presenta en el apartado anterior (§4.6).

## **4.2.- ESTUDIO DE LA HISTORIA “CLÍNICA”**

### **4.2.1.- Documentación histórica**

Este apartado, además de contextualizar la investigación, pretende recopilar toda la información referente a la “vida” de la presa que pueda ser determinante a la hora de establecer el diagnóstico.

#### 4.2.1.1.- Datos generales

Urrúnaga, situada sobre el río Santa Engracia, en el término municipal de Villareal de Álava (Álava), es una presa de contrafuertes con sección en A con una altura máxima desde cimientos de 31 m y un desarrollo en coronación de 487,4 m, creando un embalse de 72 hm<sup>3</sup> con una superficie de 869 ha (ver tanto la planta como la sección transversal de la figura 4.2). Está dividida en bloques y la recorren 2 galerías longitudinales. El aliviadero lo componen cinco vanos (ver figura 4.1.) cerrados por compuertas. El vertido se efectúa, sobre el paramento, a un cuenco amortiguador. Con el nivel normal de embalse la descarga se eleva a 344 m<sup>3</sup>/s.

En la figura 4.2c se presenta una vista de la presa desde paramento de aguas arriba poco antes de comenzar el llenado del embalse. En ella se puede observar las formas cilíndricas de los contrafuertes y el aliviadero sin las compuertas.

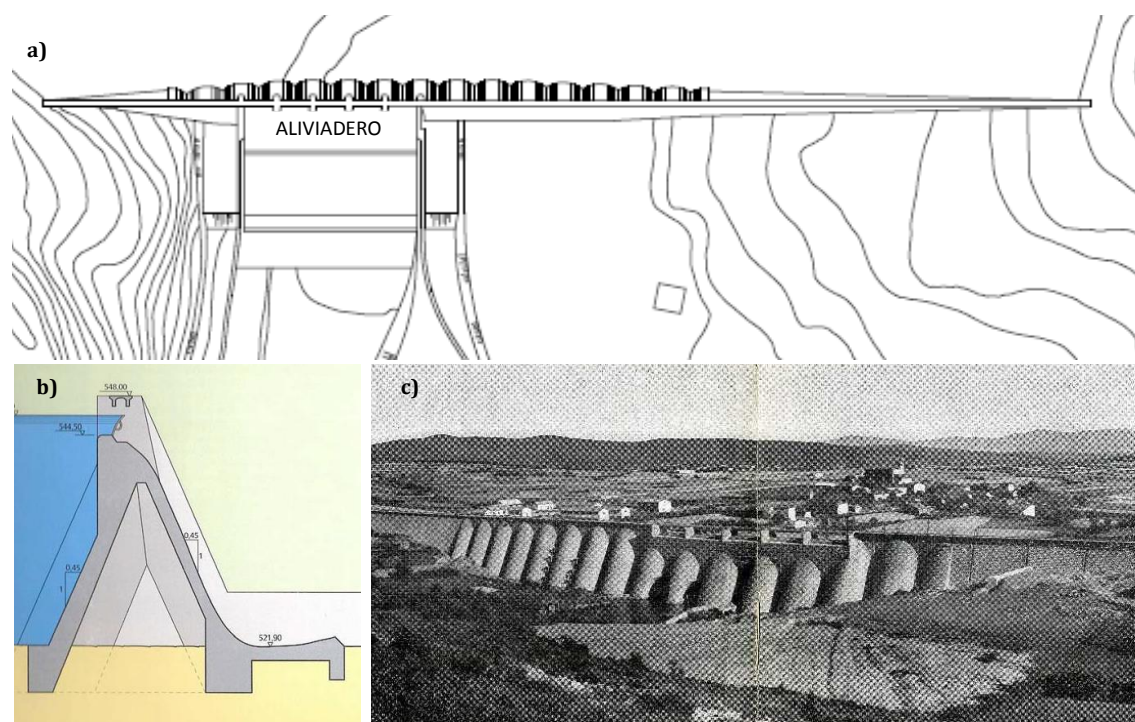


Figura 4.2.- La presa (Gil, 2009): a) planta; b) sección; c) paramento de aguas arriba

La construcción se finalizó en 1955. La finalidad de obra era abastecer de agua a los grandes núcleos urbanos de Vitoria-Gasteiz y Bilbao, por un lado, y proporcionar energía eléctrica a través del salto subterráneo de Barazar, por otro. En la figura 4.3a puede verse la configuración general del aprovechamiento en planta, mientras que en la figura 4.3b se presenta un alzado esquemático del mismo. En ambas imágenes se puede ver el embalse de Ullíbarri, que se encuentra comunicado mediante un túnel reversible con el de Urrúnaga.

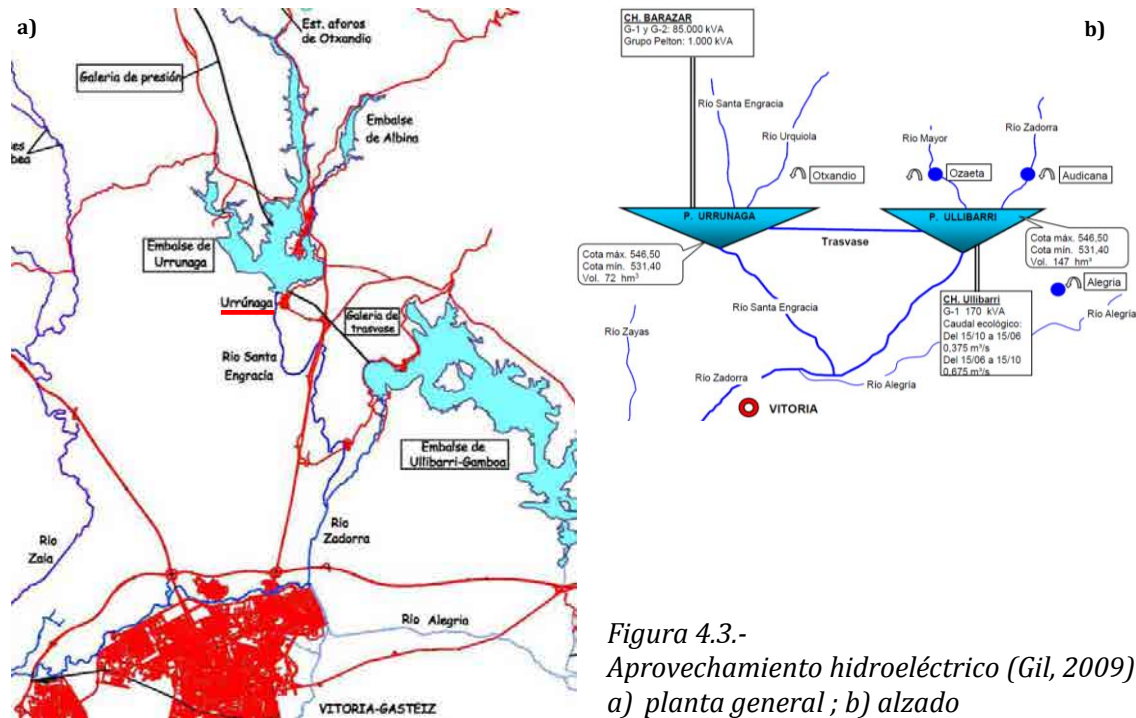


Figura 4.3.-  
Aprovechamiento hidroeléctrico (Gil, 2009):  
a) planta general ; b) alzado

A modo de resumen, en la tabla 4.1 se presentan los datos técnicos de esta presa que se encuentran en el Inventario de presas españolas del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2014).

Características	Datos	Características	Datos
Año de terminación	1955	Altura	31
Río	Santa Engracia	Longitud de coronación (m):	487
Término Municipal	Villa Real de Álava (Álava)	Volumen de presa ( $10^3$ m <sup>3</sup> ):	82
Propietario actual	Iberdrola Generación	Volumen del embalse (hm <sup>3</sup> ):	72
Constructor	Arregui S.A.	Superficie del embalse (ha):	869
Proyectista	A. del Águila	Destino:	H/A
Tipo	Contrafuertes	Capacidad Aliviadero (m <sup>3</sup> /s):	631,5

Tabla 4.1.- Características de la presa y del embalse

#### 4.2.1.2.- Informes técnicos

Iberdrola ha encargado numerosos estudios referentes a la presa de Urrúnaga. Los más relevantes para el caso de estudio, según la propia compañía, son dos, un informe del CEDEX (1996) y otro de Iberdrola Ingeniería (2002). En la tabla 4.2 se presentan las conclusiones más relevantes de ambos informes.

Institución	Temática	Conclusiones Relevantes
CEDEX (1996)	Hormigón	<p>El árido es de machaqueo, esencialmente calcáreo de carácter bioclástico, ligeramente margoso y con abundante materia orgánica.</p> <p>Se detecta la presencia de yeso en algunas muestras, etringita en otras, en alguna aparece portlandita y etringita.</p> <p>Hay buena adherencia entre la pasta y el árido, hay bastante microfisuración.</p>
Iberdrola Ingeniería (2002)	Fisuras	<p>Se confirma la fisuración evolutiva con fenómenos de expansión.</p> <p>Las fisuras aguas arriba tienden a estabilizarse no llegando hasta el paramento pero si a las juntas entre bloques, las fisuras hacia aguas abajo se inclinan hacia el cimiento y pueden llegar al paramento.</p> <p>La estructura puede resistir el empuje hidrostático con un nivel de fisuración elevado.</p>

*Tabla 4.2.- Detalles de los informes técnicos sobre Urrúnaga*

De ambos informes se desprende que existe un proceso de fisuración evolutivo, atribuido en el segundo estudio a un fenómeno expansivo. En cierta medida esto concuerda con el hecho de que aparezca yeso y etringita en distintas muestras, pues ambas son productos de reacciones expansivas causadas por áridos reactivos.

#### 4.2.1.3.- Actuaciones realizadas en la presa

Con la voluntad de mantener y conservar la estructura en las mejores condiciones posibles se han realizado intervenciones en dos épocas distintas. La primera en 1966, al poco de la puesta en carga de la presa (9 años después); y la segunda a principios del siglo XXI. Todas las actuaciones intentan actuar contra las fisuras que aparecen en el cuerpo de presa, para reforzar la estabilidad del conjunto.

En la tabla 4.3 se hace un resumen muy escueto de las distintas actuaciones realizadas, además de presentar el año en que se llevaron a cabo. Los principales destinatarios de estas actuaciones son los contrafuertes de la zona central de la presa.



Año	Actuación
1966	Se añadió un tapón de hormigón a los contrafuertes 15 y 16 (ambos fisurados), y se realizaron inyecciones en sus juntas de construcción. Refuerzo estructural con 11 anclajes en el contrafuerte 15 y 9 anclajes en el contrafuerte 16.
2002	Inyección con resina epoxy de los contrafuertes 15 y 16.
2005	Inyección de una fractura en el contrafuerte 14, causada por la apertura de una junta de hormigonado y una grieta de expansión de hormigón.
2006	Inyección de retomas entre los contrafuertes 13 y 14.

*Tabla 4.3.- Detalles de las actuaciones de mantenimiento realizadas en Urrúnaga*

#### 4.2.2.- Datos de auscultación

El estudio de los datos de auscultación se centra en el análisis de los registros del comportamiento de las fisuras y de la evolución de los movimientos de nivelación y colimación. Aunque existen medidas referentes a: nivel de embalse, pluviometría, filtraciones y temperatura ambiente, del agua y del interior de los patios, estos datos no se valoran en este caso al considerarse poco discriminantes para la elaboración de una opinión cara al diagnóstico.

##### 4.2.2.1.- Evolución fisuras

Los primeros datos del sistema de auscultación corresponden a 1967, momento en el que se instalaron doce medidores tridireccionales para controlar la evolución del comportamiento de las fisuras aparecidas de los contrafuertes 15 y 16 que habían sido objeto de una actuación el año anterior. Con el paso de los años, se pueden advertir comportamientos distintos según la zona donde se presentan las fisuras. En la figura 4.4 se señalan en rojo (línea discontinua) los medidores que registran crecientes aperturas de fisuras, y en verde (línea a puntos) los que registran fisuras que o bien se cierran o bien se han estabilizado.

Los medidores J-02, J-04 y J-06, colocados en 1967, explican que, aguas arriba, las fisuras han ido creciendo sin parar. El ritmo no es muy alto pero desde que se abrieron han tenido un comportamiento muy regular y constante. En cualquier caso, el comportamiento no es totalmente uniforme en todos los bloques. Así, las fisuras del contrafuerte C-15 se habían abierto, en 2009, el doble que las fisuras del C-16. Además de los medidores existentes, se añadieron dos, el J-13 en el contrafuerte C-15, y el J-14 en contrafuerte C-14, que también reflejaban la tendencia a la apertura de las juntas en ese paramento, a pesar de ser registros de corta edad.

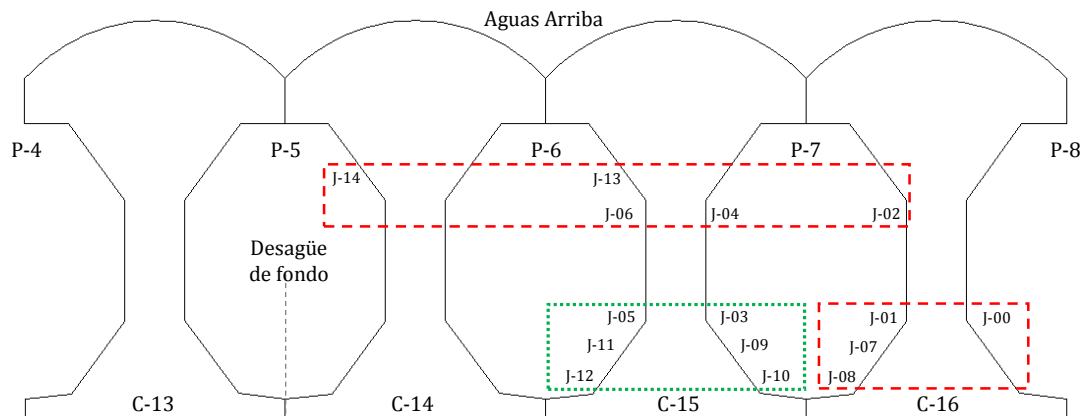


Figura 4.4.- En rojo fisuras que se abren, en verde fisuras que se estabilizan o se cierran

El comportamiento aguas abajo, en cambio, no es homogéneo en los dos contrafuertes auscultados. El contrafuerte C-16 consta de tres medidores desde 1976. El J-01 refleja que las fisuras se han ido abriendo de forma más o menos regular y continua, con una cinética relativamente baja, así, en 2009 la apertura no llegaba a 3 mm. En cambio, los medidores J-07 y J-08 reflejan que en 2005 se alteró un poco la dinámica en la apertura de juntas de este contrafuerte, pues la apertura se aceleró. Es de reseñar que las aperturas de estos medidores en el año 2009 eran de 1,5 mm y 0,4 mm respectivamente. Magnitudes que no eran significativas comparadas con las registradas en los medidores situados en el paramento aguas arriba del contrafuerte C-15.

En el contrafuerte C-15 la situación aguas abajo es diferente a todos los casos presentados hasta el momento. Las fisuras no se abrían, las registradas por J-03 y J-05 (ver figura 4.4) se habían estabilizado, y las medidas por J-09, J-10, J-11 y J-12 se estaban cerrando.

Además, en 1993 se instalaron 19 medidores unidireccionales, la apertura máxima se registraba en el medidor J-G009 y tenía una magnitud de 0,95 mm, en una fisura situada en el paramento aguas arriba del contrafuerte C-15. Los valores registrados por este tipo de medidores indicaban que la actividad de estas fisuras es existente, pero de una magnitud escasa si se comparan con la registrada por los medidores tridireccionales.

#### 4.2.2.2.- Movimientos de nivelación y colimación

Aunque la presa es del año 1955, los movimientos de nivelación y colimación no se midieron hasta 1983. Desde esa fecha se hace un registro exhaustivo de los movimientos de nivelación (21 bases de medida) y colimación (14 bases de medida). Para poder interpretar los movimientos con mayor facilidad, y a partir de los datos facilitados por Iberdrola, se han realizado los gráficos de las figuras 6.5 y 6.6, correspondientes, respectivamente, a los movimientos de nivelación y colimación, centrándose el estudio en los de nivelación por su marcada mayor magnitud.

Ante la imposibilidad de representar en un solo gráfico todas las bases, en la figura 4.5 se han seleccionado 6 bases representativas del comportamiento de la presa. Para

los movimientos de colimación se han seleccionado las bases que se encontraban en los mismos bloques que aquellas bases de nivelación seleccionadas, al no tener par la base N-20, solamente se han representado los registros de 5 bases.

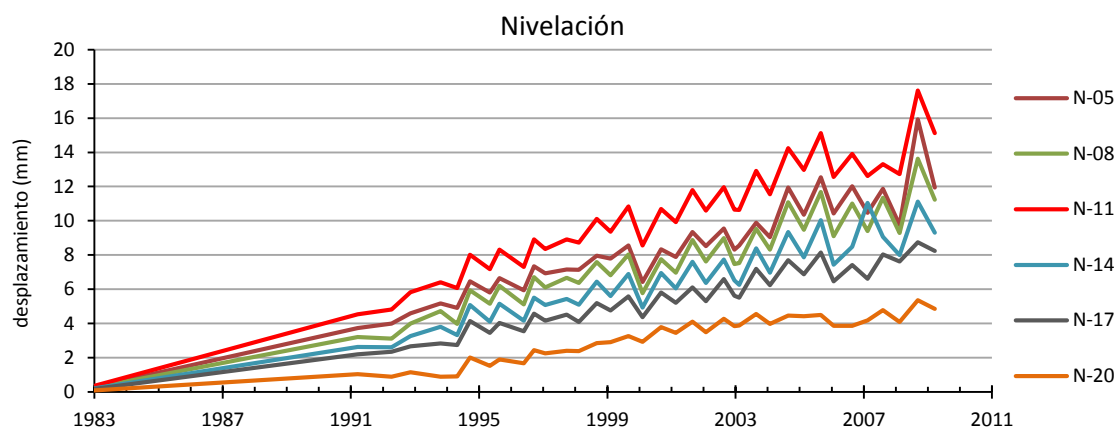


Figura 4.5.- Diagramas históricos de nivelación

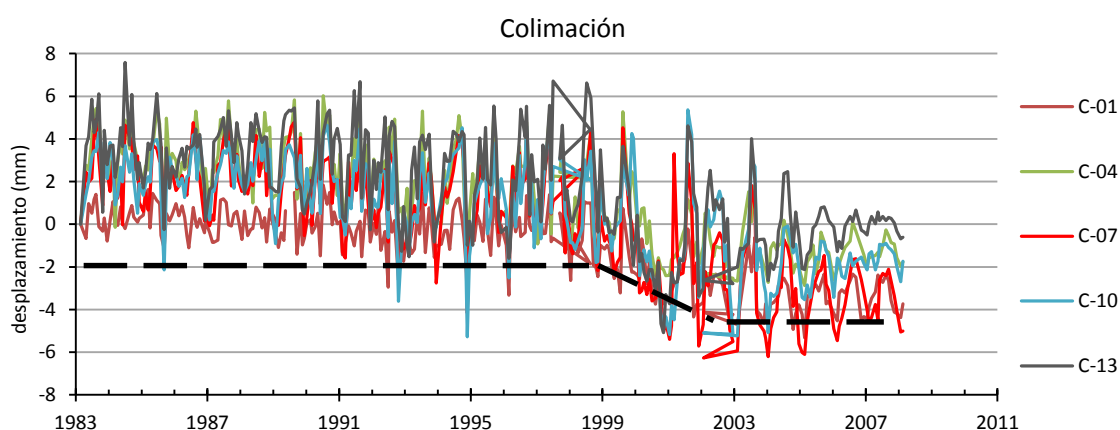


Figura 4.6.- Diagramas históricos de colimación (la línea discontinua marca la tendencia)

Nivelación. Observando los datos de la figura 4.5 se puede apreciar con facilidad que la presa tiene tendencia a moverse hacia arriba en el plano vertical. Los movimientos remanentes van en aumento a medida que pasa el tiempo, aunque su magnitud es reducida. El máximo movimiento en alzado era en 2009 de casi 18 mm y se manifestaba en la referencia N-11, bloque XII, contrafuerte 16, lo mismo que sucedía en la base N-10, bloque XI, contrafuerte 15 (aunque no se haya representado). En el contrafuerte 15 se ubicaron los portillos de desagüe frente a avenidas en la etapa de construcción, generando una particularidad constructiva que quizás ha fomentado que, tanto este contrafuerte como el 16, hayan sido objeto de numerosas actuaciones para solventar los reiterados problemas que han presentado, tal y como se ha explicado en el apartado anterior.

Las bases N-5 y N-6 también registraban un último movimiento de pico elevado, aunque en la zona de descenso la diferencia se acentúa con el registro de la base N-11, asimilándose a la base N-8, tal y como se ha dado a lo largo del histórico de medidas. Esta

tendencia se consolidó en las medidas del año 2010, según la información facilitada en referencia únicamente a estas bases, necesaria para desarrollar el apartado 6.5.1.

Colimación. Pocas son las conclusiones que se pueden extraer del registro de movimientos en el plano horizontal, y menos si se hace una representación conjunta como la de la figura 4.6, debido a que la magnitud de los mismos es muy similar y a la vez muy pequeña. Los valores oscilan alrededor del cero, un vaivén que es fruto principalmente de las condiciones climáticas, al mantenerse el nivel de embalse muy estable en su conjunto.

Aun así, el gráfico permite ver que hasta el año 2000 la tendencia de la gran mayoría de bloques era moverse hacia aguas arriba. Los movimientos más significativos se dieron en los registros efectuados durante los primeros años y nunca alcanzaron un valor acumulado de 8 mm. Las bases que más se movieron fueron las situadas en los bloques: V, XI y XIV.

La tendencia cambió a partir del año 2000; si bien existió algún movimiento hacia aguas arriba en los primeros años de la década, desde ese momento la presa tiende a moverse ligeramente hacia aguas abajo, pero manteniendo un ligero movimiento de vaivén alrededor del cero. Donde no existe esta oscilación respecto al cero, y en consecuencia se acentúa el movimiento hacia aguas abajo, es en las referencias C2, C-3 y C-7, bloques XXII, XX y XII respectivamente. En la base C-7 (corresponde al contrafuerte 16 que tiene particularidades constructivas), en 2008, el movimiento registrado era de 4 mm, habiendo llegado a ser de algo más de 6 mm. De todas formas, el movimiento máximo hacia aguas abajo, que fue de 7 mm, se dio en la base C-2 en el año 2002.

Los valores de todos los movimientos, tanto hacia aguas arriba como hacia aguas abajo, son pequeños en comparación a los medidos en presas donde ya se ha diagnosticado una expansión de hormigón. Los movimientos registrados en la presa de Paso Nuevo son por ejemplo de entre 45 y 50 mm (Espinós *et al.*, 2010), más o menos como en la presa de Beauharnois, Canadá, donde los movimientos en el plano horizontal son de entre 50 y 60 mm (Gocevsky, 1995), por no hacer referencia a otras presas donde se puede hablar de más de 100 mm de movimiento en planta.

Como reflexión final, recordar que los datos analizados tienen corta perspectiva histórica al no alcanzar los 30 años, en cambio, la presa tiene prácticamente el doble de edad.

### 4.3.- INSPECCIÓN DE CAMPO

En el presente apartado se detallan los aspectos más relevantes del examen físico efectuado a la presa de Urrúnaga. La visita, realizada el día 17 de noviembre de 2009, fue coordinada por D. Arturo Gil, Director de Generación Hidráulica de Iberdrola y Presidente del Comité Técnico de Seguridad de Presas del Comité Nacional Español de Grandes Presas.

### 4.3.1.- Formaciones geológicas

#### 4.3.1.1.- Cantera

Problemas logísticos impidieron que se pudiera visitar la cantera de donde se extrajeron los áridos para la construcción. La información oral transmitida por parte de los responsables de explotación de la presa fue que los áridos se extrajeron de la cantera de Landa. Situada a poca distancia de la presa, es aún visitable, por tanto podría ser inspeccionada en caso de necesidad. Según IHOBE (2005) los áridos de dicha explotación son calizas arrecifales, lo que significa que los áridos tienen un alto contenido en carbonato cálcico.

#### 4.3.1.2.- Estribos

La presa de Úrrunaga tiene dos particularidades constructivas que impiden la visualización del contacto entre la roca y el hormigón en la zona de estribos. De un lado la presa está recubierta de mampuestos por lo que desde el exterior no hay zonas con hormigón visible tal y como puede verse en la figura 4.7, correspondiente a un detalle del estribo de la margen izquierda de la presa. Del otro, las galerías solamente alcanzan el perímetro comprendido por los contrafuertes, por lo que no se abren paso hasta la zona de contacto con la roca.



*Figura 4.7.- Estribo de la presa*

La única posibilidad, por tanto, de valorar una posible interacción terreno-estructura es mediante el estudio teórico de los mapas geológicos. En este caso, la Hoja 112 Mapa Geológico del Instituto Geológico y Minero de España (1971), presentada en la figura 4.8, correspondiente a Vitoria, indica que la presa está construida sobre materiales cretácicos, concretamente sobre margas compactas muy apizarradas.

En el mismo plano puede apreciarse que no existen zonas de falla en el entorno próximo de las presas, por lo que difícilmente puede existir una interacción entre los estribos y la estructura, siendo esto un indicio de que las causas del comportamiento anómalo deben buscarse en el hormigón empleado en la construcción.

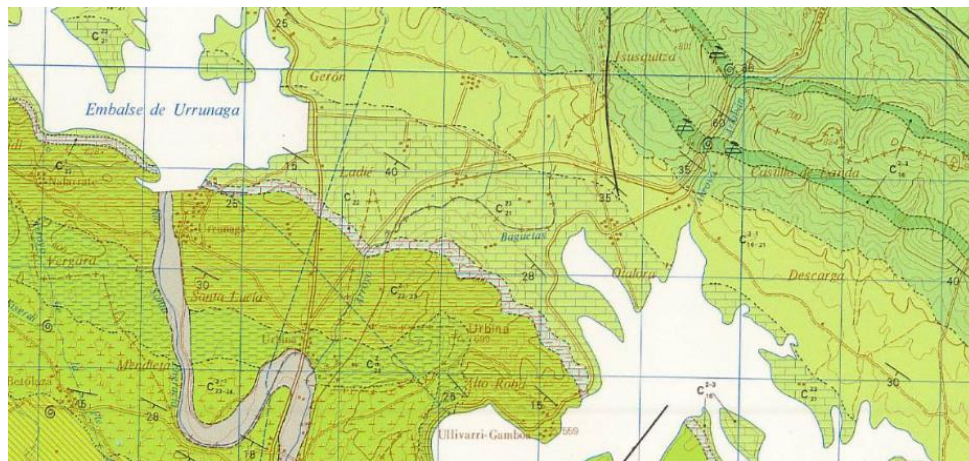


Figura 4.8.- Hoja 112 del Mapa Geológico de España 1:50.000, Vitoria

#### 4.3.2.- Estructuras anejas

Entre las obras del entorno construidas en la misma época que la presa, y realizadas, muy probablemente, con el mismo tipo de árido, se encuentra un edificio auxiliar situado en coronación, en la margen izquierda, próximo al camino de entrada a la presa. El hormigón de esta estructura esbelta (ver figura 4.9a y 4.9b), con solicitaciones externas, aparece en buenas condiciones, lo que implicaría que no padece expansiones significativas. Los únicos daños evidenciados son un inicio de corrosión en algunas armaduras con fisuración según la armadura (ver figura 4.9c), aunque no reviste mayor importancia.



Figura 4.9.- Estructura auxiliar sin signos de daño relevantes

La ausencia de fisuración enramada (característica de la expansión del hormigón) puede ser un indicio favorable de que la cuantía de expansión, de existir, no es muy significativa (contando con la hipótesis de que el hormigón de la estructura es el mismo que el de la presa). Por otro lado, si bien el edificio no está en contacto con el agua del embalse, hay que recordar que es una zona con alta pluviometría, por lo que estas superficies deberían estar sometidas a un elevado número de ciclos seco-húmedo, con aporte de oxígeno por el agua de lluvia. Esta situación prácticamente descarta que las posibles expansiones que puedan existir tengan su origen en un ataque sulfático interno, pues si así fuera el edificio estaría claramente fisurado.

### 4.3.3.- Cuerpo de presa

Esta etapa comprende el estudio de la presa, considerando tanto su vertiente exterior como interior.

#### 4.3.3.1.- Estudio del exterior de la presa

La presa de Urrúnaga se caracteriza, como ya se ha comentado, por tener los paramentos cubiertos de mampostería por lo que resulta muy difícil ver el estado del hormigón, de ahí que sea importante estudiar bien las pocas zonas con hormigón visible.

La inspección del cuerpo de presa reveló el movimiento diferencial existente entre algunos bloques, signo inequívoco de un comportamiento anómalo de la estructura. En la figura 4.10 se muestra el movimiento diferencial en el plano vertical entre bloques adyacentes, reflejado en los mampuestos de los muretes de protección. La magnitud de los movimientos es suficientemente significativa como para que pueda observarse a simple vista.

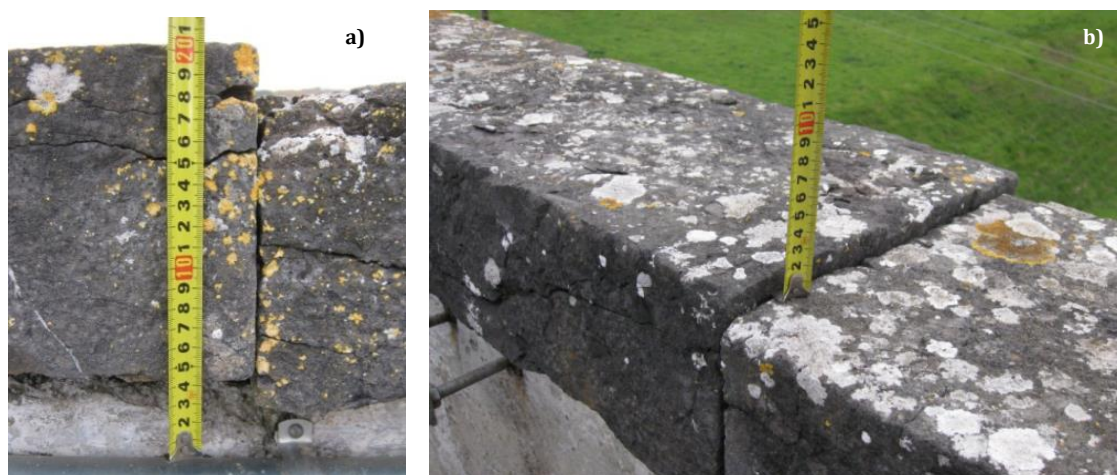


Figura 4.10.- Movimientos relativos entre bloques (paramento aguas abajo)

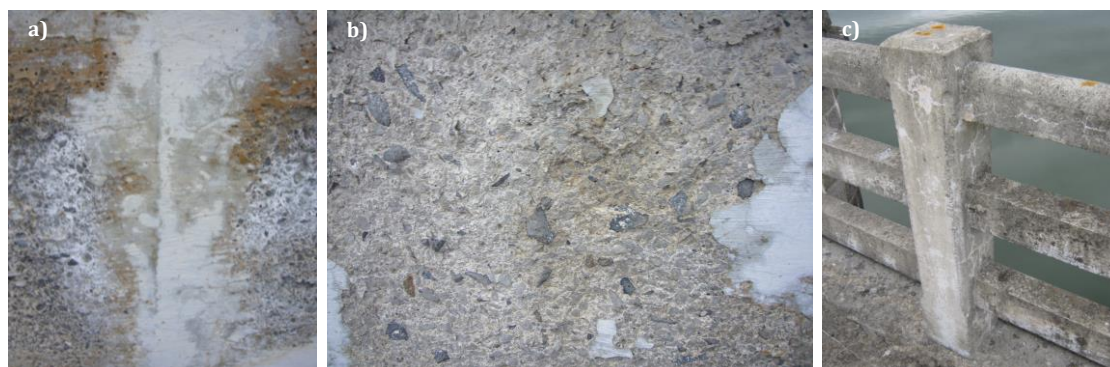
En el paramento aguas arriba, el muro-barandilla no tiene recubrimiento en algunos tramos, tal y como puede verse en la vista general de la figura 4.11a. La parte exterior, donde no da el sol, se encuentra en buenas condiciones (detalle figura 4.11b), mientras que en la parte interior, con alta exposición al sol, se pueden ver signos de un mayor grado de deterioro, tal como se muestra en la figura 4.11c. De todas formas, estas manifestaciones de daño no suponen un problema estructural.

En la figura 4.12 se presentan algunos detalles de este muro-barandilla. En primer lugar en la figura 4.12a se muestra un punto del murete en el que ha saltado gran parte de la capa exterior de finos, pudiéndose ver una coloración blanquecina que podría reflejar la existencia de cal libre, habitual en los cementos empleados en presas en aquella época (Calleja, 1980).



*Figura 4.11.- Estado de conservación del muro-barandilla*

En la figura 4.12b, correspondiente a otro tramo, se observa el hormigón visto del murete de protección; el estado del mismo es satisfactorio, con áridos calizos procedentes de machaqueo. Finalmente, en la figura 4.12c se presenta la barandilla que se encuentra en el punto en el que el muro finaliza. Ésta presenta signos de fisuración, tanto mapeada (poco significativa) como longitudinal.



*Figura 4.12.- Detalle del estado de conservación del muro-barandilla*

Aguas abajo no existen zonas donde el hormigón quede a la vista del ojo humano, (ver figuras 4.1 y 4.13) resultando realmente difícil intuir el estado de su degradación. En cualquier caso, no se reflejan zonas generalizadas con humedades, si bien existen restos de arrastres antiguos, siendo fácilmente identificables unas manchas blancas, que como en el resto de casos, son probablemente manchas de carbonato cálcico.

A parte de estos restos blanquecinos, en este paramento hay dos detalles que conviene señalar. En primer lugar, en el bloque XIV aparece una mancha de color marrón, figura 4.14a y 4.14b, producto de las filtraciones que se dan a través de una fisura que no ha podido ser sellada.



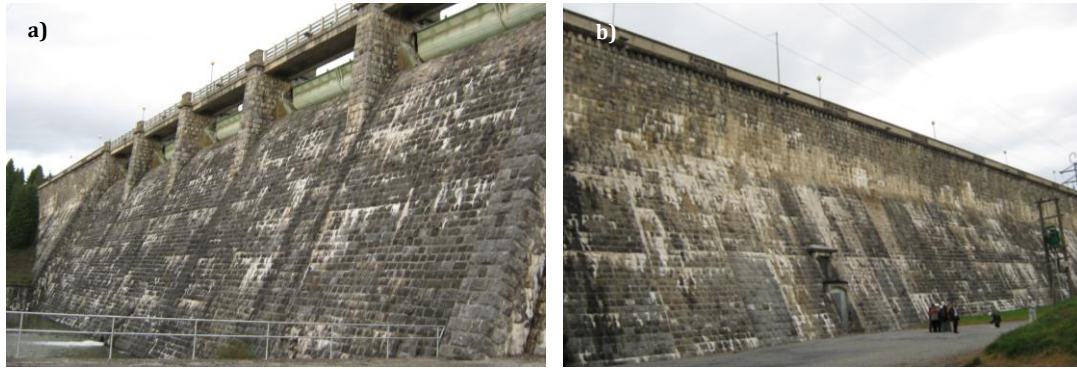


Figura 4.13.- Vista general del paramento aguas abajo: a) aliviadero; b) bloques centrales

En segundo lugar cabe destacar la existencia de unos ribetes blancos en la zona de contacto entre el mortero y los mampuestos (ver figura 4.14c) cuyo origen puede ser o bien cal libre que por los arrastres del agua se refleja en el labio de contacto, o bien algún gel fruto de una reacción álcali-árido, si bien se entiende que esta opción es poco probable por la morfología de la cantera.

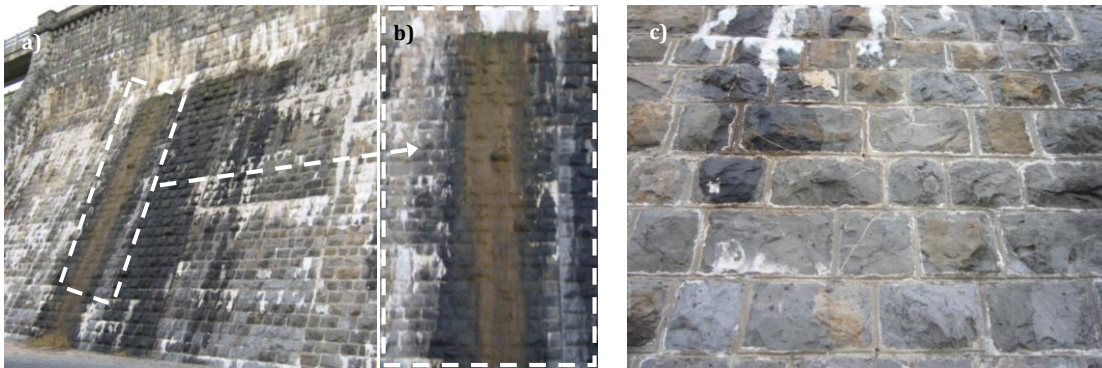


Figura 4.14.- a) y b) Mancha filtraciones; c) Ribetes en el contacto mortero-mampuesto

#### 4.3.3.2.- Estudio del interior de la presa

Dada la particularidad constructiva, el perfil en A no es muy habitual, el interior de la presa queda constituido por dos galerías. La inferior, que la componen las cámaras formadas por los contrafuertes, y unos corredores que las unen; y la superior, de corte clásico, que transcurre por debajo de la cota del aliviadero.

En la galería inferior aparecen repetidas manchas de color marrón-ocre en el hormigón, mayoritariamente en el paramento aguas arriba de la presa, siendo más significativas en las juntas de hormigonado, tal y como puede verse en la figura 4.15a.

De todas maneras, las manchas que resaltan de forma más notoria son las causadas por el carbonato cálcico (ver figura 4.15b y 4.15c). Éstas son resultado de la reacción del agua con la cal libre del cemento y se manifiestan en forma de estalactitas y goterones abundantes. La necesidad de agua hace que mayoritariamente estas manchas aparezcan en el paramento de aguas arriba, en permanente contacto con ella, tal y como se observa en la figura 4.15c. Además, los regueros de cal libre permiten identificar con cierta

facilidad muchas de las fisuras longitudinales que han aparecido en la presa, aunque la mayoría de las filtraciones se producen en las juntas.



Figura 4.15.- Productos de reacciones: a) óxidos de hierro (ocres); b) y c) carbonato cálcico

El carbonato cálcico también puede observarse en el interior de un antiguo testigo (figura 4.16a), situado en una de las lamas de la sección transversal de los contrafuertes. En él también se observa una fisura inclinada, que se resalta en la figura con una línea discontinua. Llama la atención que el carbonato cálcico no se sitúa en la zona de fisuras, lo cual puede significar dos cosas, o bien que las fisuras se han abierto después del arrastre del carbonato, o bien que el agua ha circulado preferentemente por las juntas de hormigonado, vías de mayor permeabilidad. En la figura 4.16b se puede ver la fisura que existe en el interior de otro antiguo testigo; en este caso se resalta la traza teórica de la fisura. Por su orientación, su aparición es causada por el movimiento de la presa hacia aguas abajo. Aparte del carbonato cálcico y de las fisuras inclinadas, que se aprecian sistemáticamente en los testigos de patios diferentes, cabe señalar que el hormigón presenta un aspecto muy satisfactorio.

Las fisuras inclinadas también aparecen, con la misma orientación, en los corredores de transición entre patios. De la misma manera, aparecen fisuras en el interior de los patios. Una reiteración de signos idénticos a lo largo de todo el cuerpo de presa, como el que se da en este caso, significa que en un principio el problema es de carácter global, y no local.

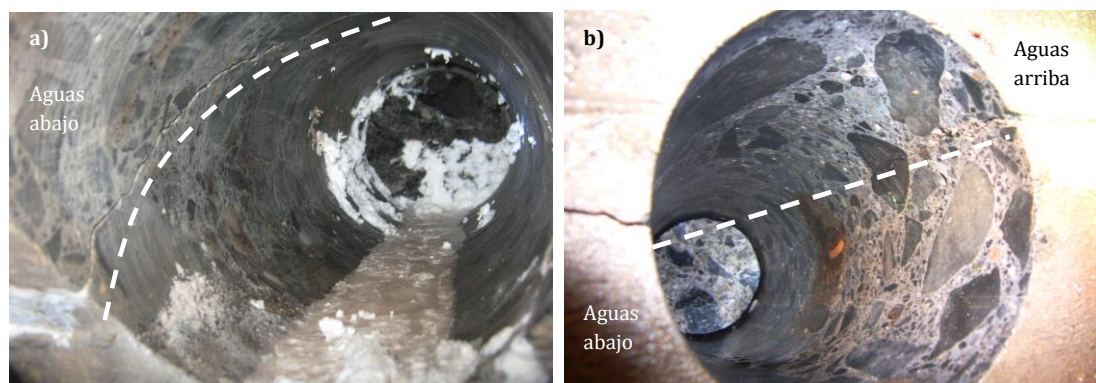


Figura 4.16.- Estado huella testigos extraídos del alma de los contrafuertes

Aparte de la fisuración longitudinal aparece, también, una fisuración mapeada, que puede verse puntualmente en la galería inferior, en la zona baja de los patios. En la figura 4.17 se muestran dos imágenes de estas fisuras selladas. Estas fisuras no siguen patrón alguno y parecen de poca profundidad y ancho de fisura.

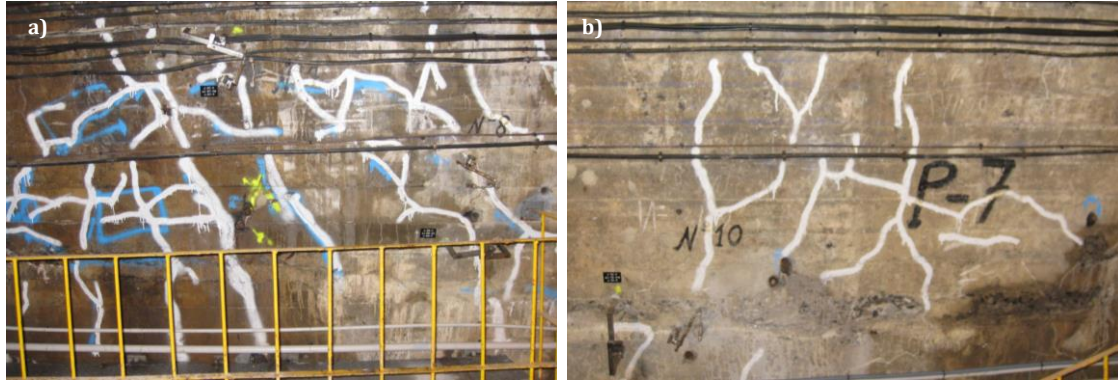


Figura 4.17.- Fisuración mapeada

#### 4.3.4.- Elementos móviles

La inspección de campo se cierra con la revisión de los elementos móviles, en este caso, las compuertas instaladas en los cinco vanos del aliviadero, donde existen dos tramos donde se puede ver relativamente bien el hormigón. El primer tramo, que se puede ver en la figura 4.18, corresponde a la parte más alta de pared lateral de los contrafuertes con compuertas, precisamente en la zona donde están colocadas las guías que se usan para cerrar dichas compuertas. En estas zonas sistemáticamente aparece una marcada fisuración enramada que supura un producto que parece carbonato cálcico.

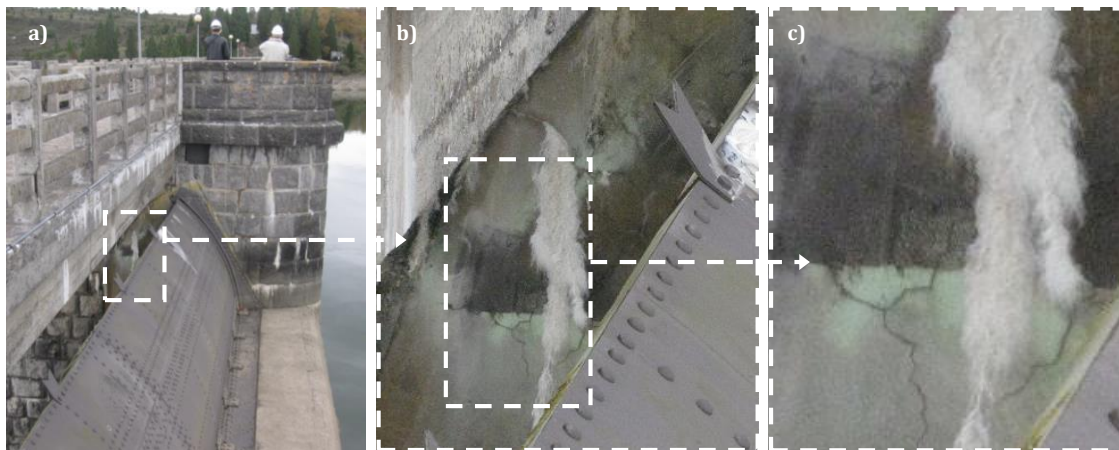


Figura 4.18.- Fisuración enramada en la zona de compuertas: a) general; b) y c) detalles

El segundo tramo de hormigón que se puede ver, figura 4.19, es el que queda en la parte superior de los aliviaderos. También en estos tramos aparece sistemáticamente una fisuración enramada. En estas fisuras se puede apreciar, además, con facilidad, un cambio de coloración en las zonas próximas al labio de fisura, que podrían reflejar la existencia de

el gel que se produce en las reacciones expansivas, tal y como puede verse en el detalle de la figura 4.19b.

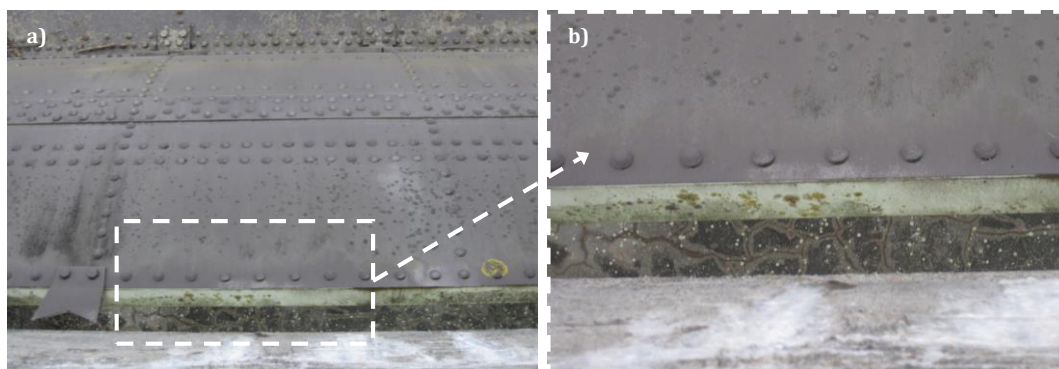


Figura 4.19.- Fisuración enramada en el aliviadero: a) vista en planta; b) detalle

#### 4.4.- ANÁLISIS DE MUESTRAS

A lo largo de la visita se tomaran 12 muestras, detalladas en la tabla 4.4. Con todas ellas se realizó un ensayo de difracción de rayos X para determinar el tipo de fases cristalinas que las constituyen. El objetivo era aportar mayor información acerca de los aspectos que se consideraron más relevantes durante la inspección de campo. En la tabla se marcan en negrita las muestras de las que se presentan los resultados. Los análisis se realizaron en la Universidad de Alicante, hasta donde se desplazó el doctorando.

Muestra	Murete exterior (zona coronación)	Muestra	Interior de la presa
1	Eflorescencias blancas	7	<b>Estalactitas de color blanco</b>
2	Trozo mampuesto fisurado	8	Estalactitas de color ocre
3	<b>Trozos de hormigón</b>	9	Cristales aciculares en suelo
4	<b>Trozos de hormigón</b>	10	Trozo hormigón sala máquinas
5	Mampuesto oxidado	11	Exudaciones blancas
6	Veta blanca hormigón	12	Trozo hormigón pozo

Tabla 4.4.- Ubicación de las distintas muestras tomadas durante la visita

Tanto la muestra nº3 como la nº4 (ver figura 4.20a) corresponden a un trozo de hormigón del muro de coronación. Los picos de los difractogramas de ambos trozos de hormigón (figura 4.20b y 4.20c respectivamente) indican que la calcita es el compuesto dominante y no se observan, en ningún caso, productos formados tras un ataque sulfático o una reacción álcali-árido.

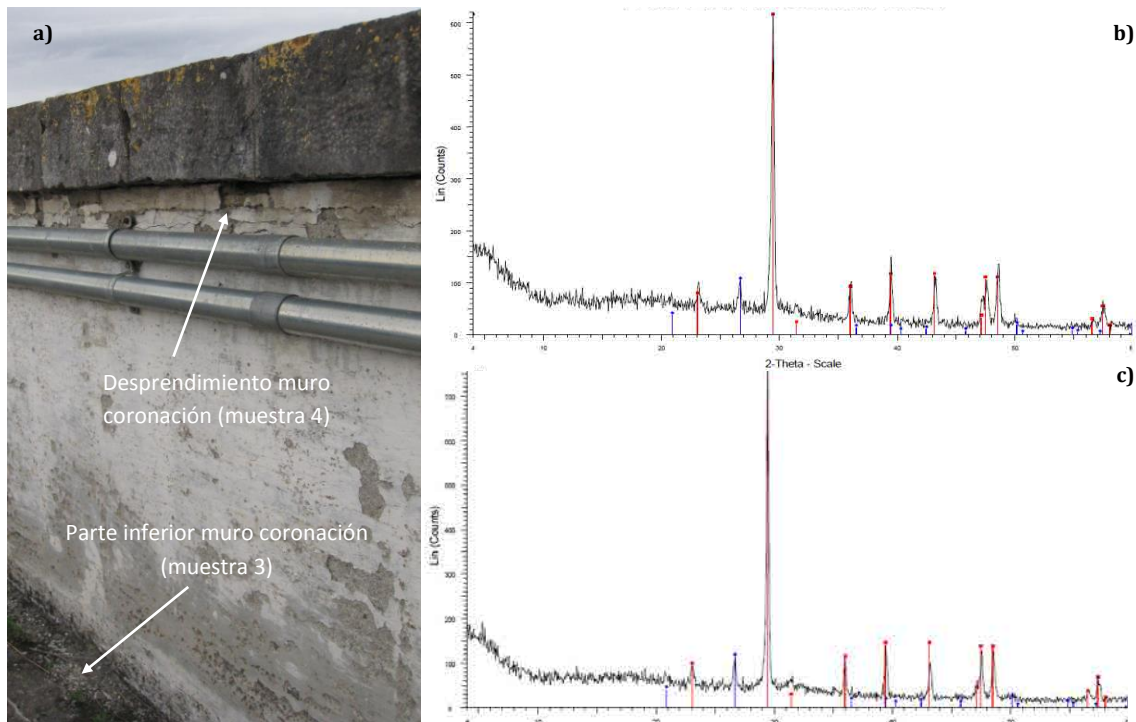


Figura 4.20.- a) Muestras murete de coronación; Difractogramas muestras 3 (b) y 4 (c)

La muestra nº7 corresponde a una de las múltiples estalactitas que se presentan, como se ha podido constatar en el apartado anterior, en el interior de la presa. Su difractograma, presentado en la figura 4.21, indica que la muestra está constituida principalmente de carbonato cálcico.

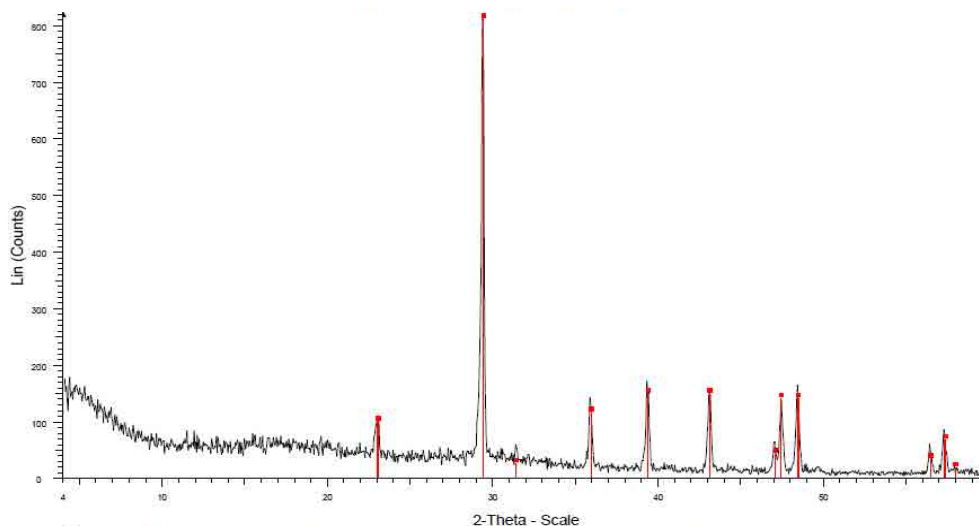


Figura 4.21.- Difractograma de la muestra nº 7

Exceptuando las dos primeras muestras, los difractogramas del resto indican, a través de la intensidad de sus picos, que el componente principal de las muestras es la calcita pura ( $\text{CaCO}_3$ ). Incluso el difractograma de la estalactita ocre muestra la preponderancia del carbonato cálcico, aunque incorpora una ligera cantidad de óxido de hierro.

Durante la visita se recogió también una muestra de agua del estanque ubicado en el interior de las galerías de la presa. En la tabla 4.5 se presenta el resultado obtenido del análisis químico. Destaca la baja concentración de iones agresivos al hormigón en límites muy por debajo de los asumidos para ser considerada un agua agresiva.

Analito	Concentr. (mg/l)	Analito	Concentr. (mg/l)	Analito	Concentr. (mg/l)	Analito	Concentr. (mg/l)
Ag	0,206	Co	0	Mn	0	Tl	0
Al	0	Cr	0	K	14,3	Zn	0
B	1,36	Cu	0	Fe	0	F <sup>-</sup>	0,23
Ba	0	Ga	0	Na	11,1	Cl <sup>-</sup>	0,48
Bi	0	In	0	Ni	0	Br <sup>-</sup>	0,04
Ca	29	Li	0	Pb	0	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5,81
Cd	0	Mg	3,01	Sr	0,13	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	23,99

Tabla 4.5.- Análisis químico del agua de la presa

Según Mason (1989) para considerar que un agua se encuentra atacada por sulfatos debería presentar una concentración mínima de ion sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) de 200-600 mg/l. Para que el ataque se considerase fuerte esta concentración de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> tendría que ser superior a los 3000 mg/l.

#### 4.5.- TRABAJOS DE GABINETE

Una vez desarrollada la inspección de campo en la presa, y en paralelo a los primeros estudios de laboratorio, se dio inicio a los trabajos de gabinete, centrados básicamente en dos objetivos:

- Determinar si el comportamiento anómalo de la estructura es generalizado (como apuntan los signos) o puntual.
- Intentar predecir la evolución de los movimientos, aún a sabiendas de que el histórico de registro es pequeño.

##### 4.5.1.- ¿El comportamiento anómalo es generalizado o está localizado?

Los signos de daño que presenta la estructura, tal y como se ha visto en el apartado dedicado a la inspección de campo (§4.4), son similares en toda la estructura, lo que parece indicar que esta presa padece algún problema general. Para ahondar en esta línea argumental, en este apartado se va comprobar si existe o no correlación entre los movimientos remanentes de nivelación (N) y la altura de los bloques (h), y entre los movimientos de colimación (C) y la esbeltez de los bloques ( $j=h^2/b_{eq}$ ). Las relaciones se obtienen tras realizar un análisis geométrico simplificado de las deformaciones compatibles que pueden darse en un bloque, según la metodología que se presentó en §3.5.1.

Para el estudio de esta presa se escogieron 4 bloques representativos: V, XII, XVIII y XXIV, situados en planta según se detalla en la figura 4.22. El primero pertenece a una zona cercana al estribo de la margen derecha, el segundo y el tercero pertenecen a la parte central del cuerpo de presa, y el cuarto pertenece al estribo situado en la margen izquierda.

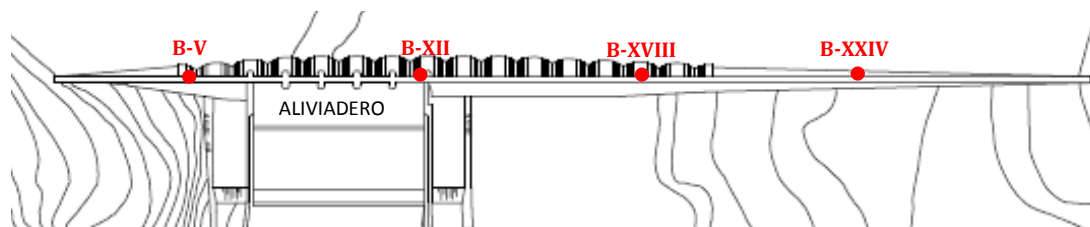


Figura 4.22.- Planta de la presa con los bloques utilizados para el estudio señalado

Las características geométricas de los bloques son muy similares, pues presentan, tal y como puede verse en la figura 4.23, un perfil similar, aunque los tamaños son distintos.

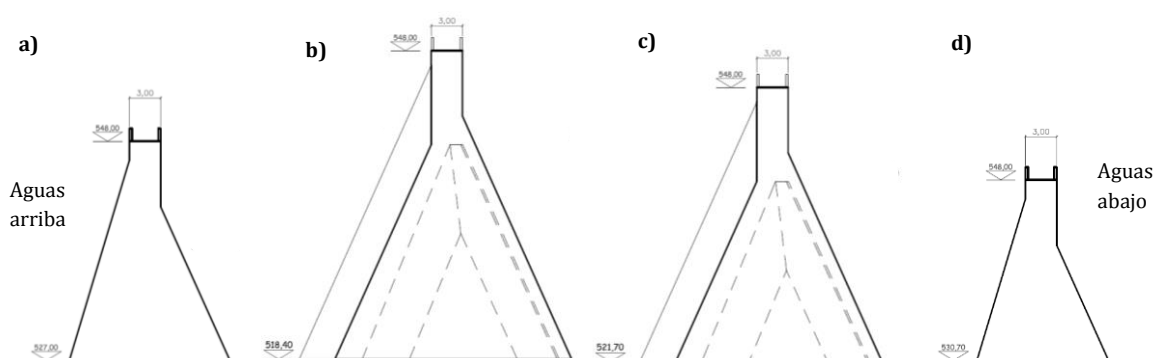


Figura 4.23.- Perfiles transversales bloques nº: a) V; b) XII; c) XVIII; d) XXIV

En la tabla 4.6 se presentan las características geométricas de los bloques estudiados, los movimientos remanentes registrados y las relaciones normalizadas necesarias para realizar las representaciones gráficas; éstas últimas se denotan por estar ensombrecidas sus casillas con un color azul muy suave. En cada uno de los bloques escogidos se ubica una base de nivelación (N) y una de colimación (C) con una numeración independiente.

Base	Bloque	h(m)	b <sub>M</sub> (m)	b <sub>eq</sub> (m)	j=h <sup>2</sup> /b <sub>eq</sub>	N (mm)	C (mm)	h/h <sub>12</sub>	N/N <sub>12</sub>	j/j <sub>12</sub>	C/C <sub>12</sub>
N5-C13	V	21,00	14,70	21,3	20,70	13,62	-1,17	0,70	0,79	0,68	0,24
N11-C7	XII	29,60	21,50	29,00	30,21	17,01	-4,82	1,00	1,00	1,00	1,00
N14-C4	XVIII	26,30	18,70	25,88	26,73	12,40	-4,07	0,88	0,72	0,88	0,84
N17-C1	XXIV	17,30	12,00	18,22	16,43	9,34	-2,83	0,58	0,54	0,54	0,58
$b_m = 4,5m$ para todos los bloques $X/X_i =$ Variable $X$ del bloque $i$ , normalizada con la variable $X$ del bloque $t$											

Tabla 4.6.- Datos necesarios para el estudio

Nótese que el bloque que mayor movimiento registra es el número XII, bloque de mayor altura y, en consecuencia, también de mayor base. Este hecho hace posible que exista una posible correlación entre geometría y movimientos. Nótese, también, que los movimientos de colimación, aun siendo negativos (la presa se mueve hacia aguas abajo), dan una relación normalizada positiva.

En la figura 4.24a y 4.24b se presentan las gráficas con la confrontación de los valores normalizados. En la 4.24a se contraponen los valores medidos de nivelación (año 2010) con las alturas de los bloques. En la figura 4.24b se contraponen los valores medidos de colimación (año 2010) con la esbeltez de dichos bloques.

Como puede observarse en las dos gráficas (es algo más evidente en la primera) existe una correlación entre los movimientos y la geometría de los bloques. La conclusión que puede sacarse de estos gráficos es que la afectación que padecen los bloques es independiente de su ubicación, y que la diferencia de valores medidos responde únicamente a la diferencia geométrica de estos. Por tanto, la patología que presenta la estructura tiene un carácter general y afecta a toda la presa por igual.

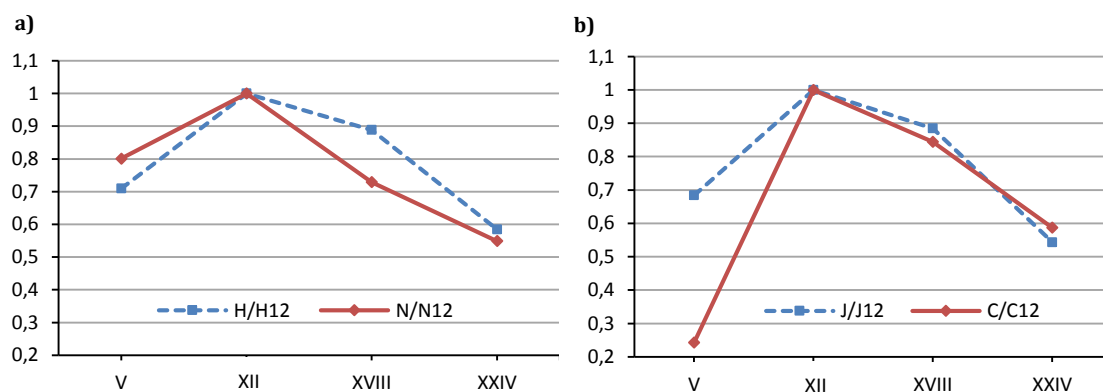


Figura 4.24.-Relaciones presa de Urrúnaga; a) altura-nivelación; b) esbeltez-alineación

Mediante este estudio se descarta que pueda existir un problema de interacción suelo-estructura en la zona donde la presa queda estribada. También se descarta que la cimentación sea la causante del mismo, porque en ese caso todos los bloques experimentarían un movimiento similar, independientemente de su geometría. Así pues, en principio, el problema debería tener su origen en el hormigón.

#### 4.5.2.- Interpretación de los movimientos y predicción de su evolución

El daño que ocasiona los movimientos en la presa está activo, lo cual hace que éstos no dejen de aumentar con el paso del tiempo. El objetivo de este apartado es obtener una estimación tanto de su posible magnitud máxima como del momento en que ésta se alcanzará, mediante el ajuste de los movimientos según el modelo matemático de Aguado *et al.* (1998) presentado en la ecuación 3.3. Aunque sería óptimo disponer de un histórico de datos que sea de al menos cuarenta años (480 meses), el estudio puede realizarse con una serie mucho más corta como la disponible en este caso de estudio, donde, como ya se avanzó, el histórico no llega a alcanzar los treinta años.



El ajuste se realizó con el registro disponible de los movimientos de nivelación (el vaivén alrededor del cero de los de movimientos de colimación imposibilitan este trabajo), tanto con la finalidad de intentar determinar la fase en la que se encuentra la patología, como para tratar de acotar el orden de magnitud del movimiento máximo en el plano vertical. En la figura 4.25 se presenta el ajuste de los movimientos de los 4 bloques (V, XII, XVIII y XXIV) seleccionados para realizar el estudio del apartado anterior. En los cuatro casos se han efectuado cinco ajustes, pensándose que el punto de inflexión del movimiento podría alcanzarse en a los 550, 600, 650, 700 o 750 meses.

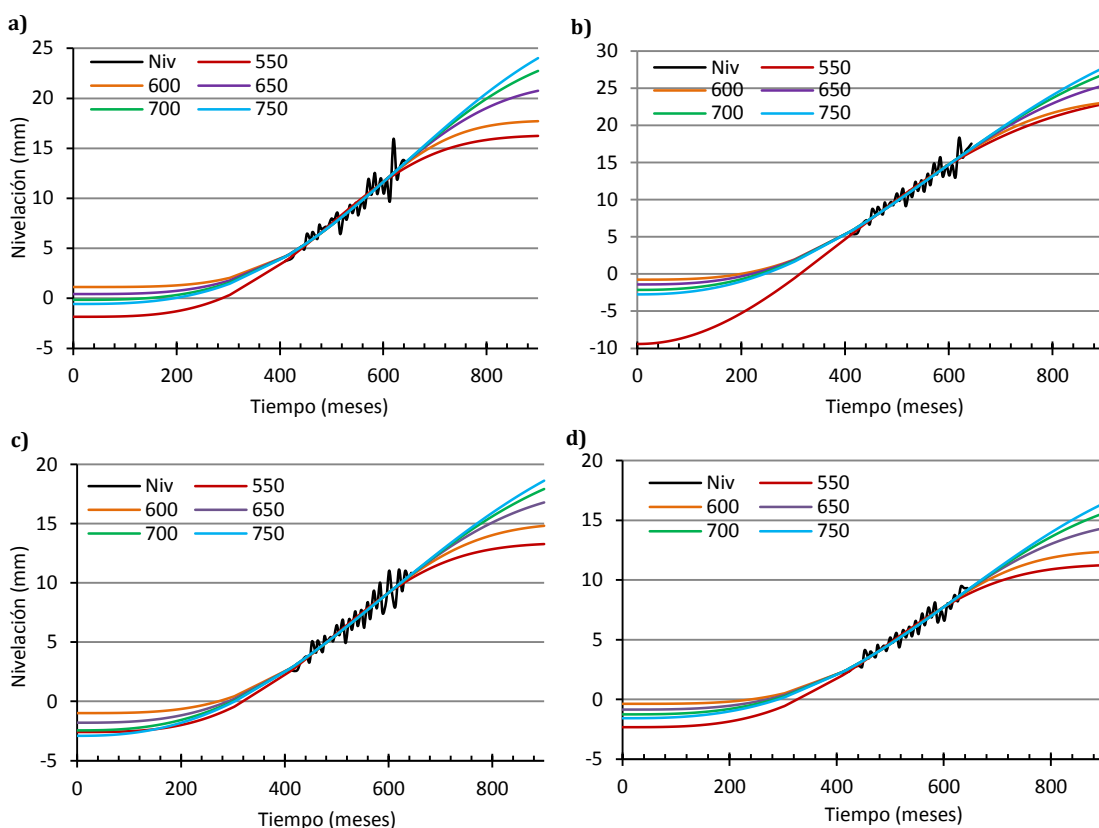


Figura 4.25.- Ajustes nivelación bloques: a) V; b) XII; c) XVIII; d) XXIV

Los 4 gráficos no pueden aportar demasiada información acerca del movimiento máximo. Lo ideal hubiera sido que uno de los cinco ajustes hubiera destacado como el mejor para los cuatro bloques. El problema es que los movimientos registrados ocupan la parte central de la “S” donde los distintos ajustes se unen formando una sola línea, con lo cual resulta muy difícil poder sacar alguna interpretación al respecto. La única valoración que puede extraerse es que los movimientos van a seguir creciendo, pues el proceso aún no ha alcanzado la fase de estabilización. De todas formas estas consideraciones deben tomarse con muchas reservas por la reducida cantidad de datos disponibles con los que se ha realizado el estudio.

### 4.6.- 1ª HIPÓTESIS DE DIAGNÓSTICO

#### 4.6.1.- Etiología del daño y dictamen

El 1er diagnóstico surge de valorar de forma sistemática los signos detectados y estudiados hasta el momento. A tal fin, se utiliza el cuadro sinóptico de la figura 4.26, presentado anteriormente en §3.6.1, con una pequeña modificación del tramo final realizada *ad hoc* para este caso de estudio. Para facilitar su interpretación se marca en línea continua el camino que, a través de los signos patológicos, conduce hasta el diagnóstico que se puede dictaminar, aunque de forma cautelar.

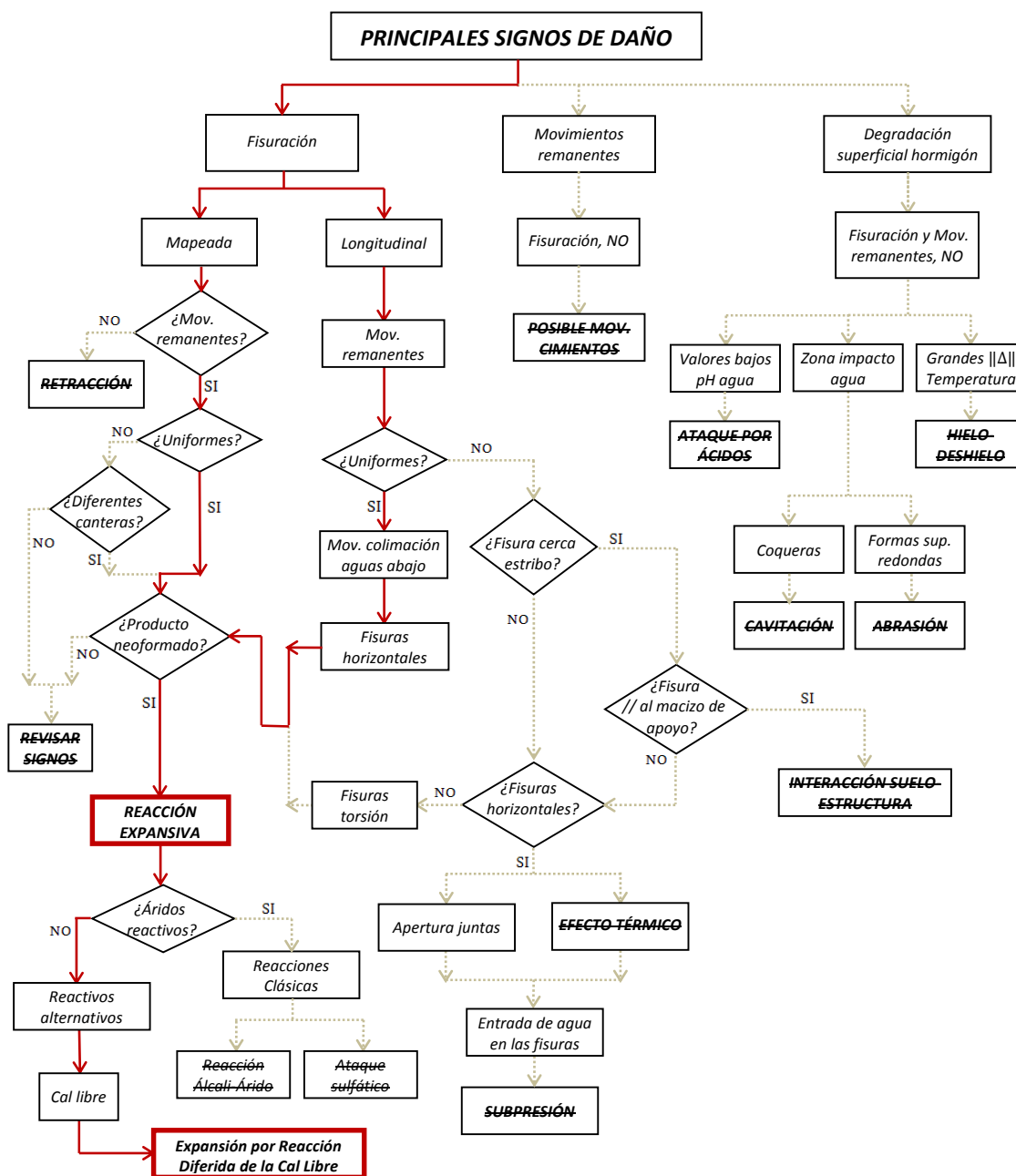


Figura 4.26.- Cuadro sinóptico de ayuda al diagnóstico

Todos los trabajos desarrollados hasta el momento apuntan a que la presa padece un problema interno que se manifiesta de forma general y con un grado moderado. La magnitud de los movimientos, tanto los de nivelación como los de colimación, hace que se deba descartar una reacción expansiva generada por un ataque sulfático (AS), una reacción que, con una velocidad alta, sin duda, hubiera generado movimientos mucho más grandes. Además, serían evidentes los productos de las reacciones de oxidación.

Tampoco parece ser que la expansión tenga su origen en una reacción álcali-árido (RAA). En primer lugar porque no parece que haya sílice reactiva en la cantera de Landa. Las deformaciones son pequeñas incluso para este tipo de expansión, además no se constata la aparición del clásico gel resultante de este tipo de reacciones expansivas. Recuérdese el óptimo estado del hormigón en la zona donde ya se han extraído testigos.

Ante tales signos, y habiéndose descartado la posibilidad de otras tipologías de reacciones expansivas, causadas por la reactividad de los áridos, se dictamina como 1º Hipótesis de Diagnóstico que:

*“El ligero incremento de volumen que padece el hormigón de Urrúnaga puede deberse a una reacción diferida de la cal libre (RDCL) inmersa en la masa del hormigón con el agua que se filtra por los mampuestos. Un fenómeno que se mantendrá activo mientras quede cal libre en el hormigón o hasta que se corte el acceso de agua mediante una impermeabilización”.*

Esta hipótesis se justifica de acuerdo a los siguientes puntos:

- Se observa importante cantidad de calcita neoformada cuyo origen se debe a la carbonatación del hidróxido cálcico.
- De acuerdo con Gonnerman *et al.* (1953) y Chatterji (1995) se puede afirmar que existe una expansión retardada por la hidratación tardía de la cal libre que contiene el cemento. Gonnerman *et al.* (1953) da por hecho, además, que esta expansión puede dilatarse durante años aun estando el hormigón saturado.
- La cantidad de cal libre en los cementos de los años 50 era elevada, el valor mínimo puede cifrarse, según Johansen (1977) y Calleja (1980), en un 5%. Esta cantidad era significativamente mayor que la que presentaban los cementos en etapas posteriores y, evidentemente, que la que presentan actualmente.
- Incluso estando el paramento aguas arriba de las presas en contacto constante con el agua, la difusión de agua no es ni instantánea, ni uniforme en toda la masa de hormigón, y depende de muchos factores, entre los que se encuentra el nivel de fisuración y la distribución de poros (ITCOLD, 2012). El agua entra lentamente en los bloques por las juntas horizontales de hormigonado, situadas cada 1,5-2 m de altura, vías preferentes por las que le resulta fácil avanzar. A medida que avanza por las juntas, el agua se infiltra, muy lentamente, en la masa de hormigón que queda por debajo, tal y como puede verse en la figura 4.27, necesitándose años, tal

y como indica Vallarino (1991), para que pueda considerarse la presa saturada, razón por la cual, también, se necesitan años para que toda la cal libre que se encuentra en el cemento entre en contacto con el agua y vaya reaccionado.

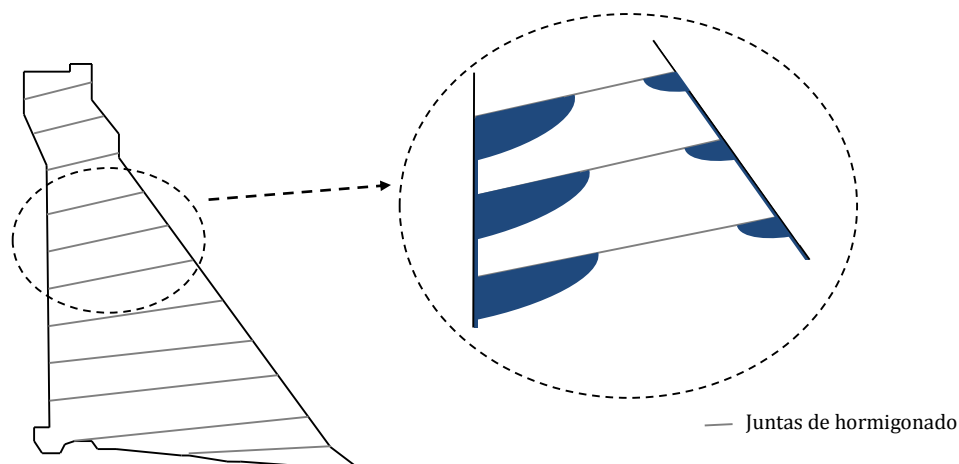


Figura 4.27.- Detalle de la penetración, por las juntas, del agua en el hormigón no saturado

- La presa de Urrúnaga es una presa de contrafuertes aligerada, su peso es claramente menor que el de una presa maciza, por lo que la acción del peso propio influye en menor medida a amortiguar el posible efecto de una pequeña expansión.
- La ubicación de la presa en una zona de alta pluviometría, junto con los mampuestos que recubren el paramento aguas abajo, hacen que el aporte de agua a dicho paramento sea significativa (mayor que en otras presas sin mampuestos u otras ubicaciones), aunque obviamente sea menor que en paramento de aguas arriba, donde cabe añadir el efecto del empuje hidrostático. Ello hace que aun existiendo deformaciones impuestas en ambos paramentos, sea algo mayor en el de aguas arriba.
- El mayor movimiento del paramento aguas arriba genera el giro de la presa hacia aguas abajo y da lugar a la fisuración horizontal que se puede ver en el alma de los contrafuertes.

En base a estos argumentos, en la figura 4.28 se presenta un esquema de la sección transversal de la presa. En él se muestra que la deformación unitaria es mayor en las superficies en contacto con el agua que en las superficies interiores que dan a los patios internos, dado que en dichas superficies la cantidad de agua es menor

La distribución de las deformaciones unitarias a nivel sección, o cuando menos en las cabezas de los contrafuertes, probablemente sea no lineal, aunque por las características de las mismas (pequeñas magnitudes), parece razonable considerar una hipótesis lineal.

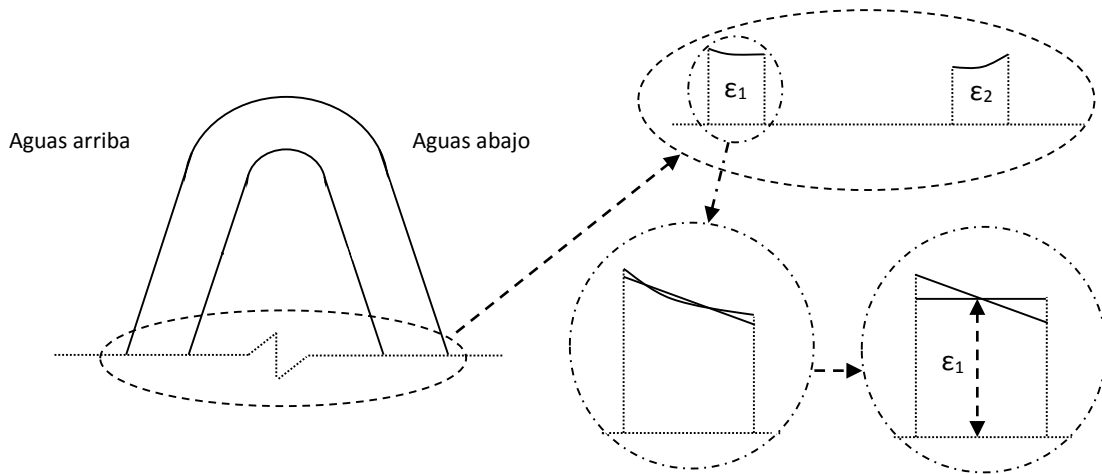


Figura 4.28.- Modelización de la hipótesis del comportamiento

#### 4.6.2.- Estimación de la deformación volumétrica

Según la hipótesis establecida, la expansión del hormigón se produce por el incremento de volumen que experimenta la cal libre al hidratarse y transformarse, primero en hidróxido de calcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , y después en carbonato cálcico,  $\text{CaCO}_3$ , tal y como puede verse en la figura 4.29. Al conservarse la masa, la expansión se ocasiona por la diferencia de volumen que existe entre el  $\text{CaO}$  (inicial) y el  $\text{CaCO}_3$  (final).

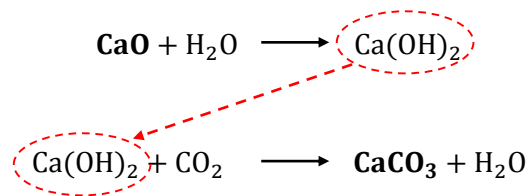


Figura 4.29.- Cadena de reacciones que dan lugar a la expansión del hormigón

Al no disponerse de expresiones analíticas concretas para el cálculo del incremento de volumen que estas dos reacciones encadenadas pueden ocasionar, se determina de forma aproximada la deformación volumétrica que puede suponer este proceso mediante la adaptación del planteamiento utilizado por Clifton y Pommersheim (1994) y Tixier y Mobasher (2003) para los casos de ataques sulfáticos. En estos trabajos se determina la diferencia entre el volumen de los reactivos y los productos de la reacción, teniendo en cuenta que parte del producto neoformado servirá para rellenar los poros que puedan encontrarse vacíos. En la ecuación 4.1 se presenta la adaptación realizada para el caso de la  $\text{CaO}$  libre.

$$\varepsilon_v = [\text{CaO}_{\text{libre}}] \cdot \frac{\Delta V}{V} \cdot (a^{\text{CaO}} \cdot m^{\text{CaO}}) - f\phi \quad [\text{ec. 4.1}]$$

donde:  $\varepsilon_v$  es la expansión volumétrica final

$[\text{CaO}_{\text{libre}}]$  es la concentración de cal libre que había en el cemento

$\frac{\Delta V}{V}$  es la variación de volumen entre reactivos y productos

- $a_{CaO}$  es el coeficiente estequiométrico que acompaña a la cal libre (aquí es 1)
- $m_{CaO}$  es el volumen molar de la cal libre, es decir 56,07 (g/cm<sup>3</sup>)
- $f$  es la porosidad del hormigón. Según Altarejos-García (2009) es del orden del 6% en el hormigón de una presa
- $\phi$  es la porción de porosidad que se rellena antes de generar expansión. Se puede considerar del orden del 5% según Tixier y Mobasher (2003)

Los procesos de clinkerización ajustados que se dan hoy en día en los hornos, han permitido limitar el contenido de cal libre en los cementos convencionales a valores que no exceden el 2 o 2,5% de la masa, porcentaje que en la mayoría de casos está incluso por debajo del 1%. Estos valores contrastan con los que presentaban los cementos hasta bien entrados los años 60 del siglo XX. Los resultados experimentales de Johansen (1977) demuestran que en el pasado se podía encontrar entre un 5 y un 15% de cal libre por kilogramo de cemento. Cantidad de cal libre que, en su límite inferior, concuerda con el porcentaje utilizado por Calleja (1980) para valorar la efectividad de los ensayos de autoclave a la hora de determinar la posible expansión de un cemento de presa.

Ante la falta de datos concretos referentes a la presa de Urrúnaga, para el cálculo aproximado que se pretende realizar en este trabajo, se ha considerado que el contenido de CaO libre era del 5%. Se ha escogido el límite inferior porque se entiende que los técnicos que dirigieron la construcción se asegurarían de utilizar el cemento con el menor contenido posible de CaO libre.

Para calcular la concentración de cal libre disipada hace falta estimar la dosificación de cemento. Una vez más, ante la falta de datos se recurre a la bibliografía de referencia. Díez-Cascón y Bueno (2001) exponen que en España las presas de la primera mitad del siglo XX que fueron construidas con juntas presentan hormigones con 150-300 kg/m<sup>3</sup> de cemento. En base a ello se ha escogido para el cálculo el valor medio de 225 kg/m<sup>3</sup> de cemento, valor más que razonable, teniendo en cuenta que la presa es aligerada y que su construcción se inició a finales de los años 40.

Con estos datos, y mediante las relaciones expuestas en la ecuación 4.2, se determina que la concentración de cal libre que podía haber en Urrúnaga se sitúa en el entorno de  $2,00 \cdot 10^{-4}$  mol/cm<sup>3</sup>.

$$[CaO_{libre}] = \frac{\%_{CaO_{libre}} \cdot D_{cemento}}{M_{CaO_{libre}}} = \frac{5(\%) \cdot 225 \left(\frac{kg}{m^3}\right)}{56,07 \left(\frac{g}{mol}\right)} = 2,00 \cdot 10^{-4} \text{ mol/cm}^3 \quad [ec. 4.2]$$

- donde:  $\%_{CaO_{libre}}$  es el porcentaje de cal libre que hay en el cemento
- $D_{cemento}$  es la dosificación del cemento en el hormigón de la presa
- $M_{CaO_{libre}}$  es la masa molar de la cal libre

El incremento de volumen ( $\Delta V/V$ ) que genera la hidratación y carbonatación de la cal libre es de 1,198, valor que se determina de forma sencilla a partir de la masa y densidad de los reactivos y productos de la reacción, según se indica en la ecuación 4.3.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V}{V} &= \frac{V_{\text{productos}} - V_{\text{reactivos}}}{V_{\text{reactivos}}} = \frac{V_{\text{CaCO}_3} - V_{\text{CaO}_{\text{libre}}}}{V_{\text{CaO}_{\text{libre}}}} = \frac{V_{\text{CaCO}_3} - V_{\text{CaO}_{\text{libre}}}}{V_{\text{CaO}_{\text{libre}}}} \\ &= \frac{\frac{100,086 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)}{2,711 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)} - \frac{56,07 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)}{3,34 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)}}{\frac{56,07 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)}{3,34 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)}} = 1,198 \end{aligned} \quad [\text{ec. 4.3}]$$

Con todos los datos necesarios, a partir de la ecuación 4.1, puede determinarse que la deformación volumétrica que puede causar la  $\text{CaO}_{\text{libre}}$  es igual a 0,001. Si se distribuye de forma isótropa esta deformación en las tres direcciones espaciales (x,y,z) se obtiene que la deformación lineal (expansión) aproximada que puede padecer la presa de Urrúnaga es igual a 0,33 mm/m (ecuación 4.4).

$$\begin{aligned} \varepsilon_v &= [\text{CaO}_{\text{libre}}] \cdot \frac{\Delta V}{V} \cdot (a^{\text{CaO}} \cdot m^{\text{CaO}}) - f\phi = 2,00 \cdot 10^{-4} \cdot 1,198 \cdot 1 \cdot 56,07 - 0,06 \cdot 0,05 \\ &= 0,001 \end{aligned} \quad [\text{ec. 4.1}]$$

$$\text{Expansión} = \frac{\varepsilon_v}{3} = \frac{0,001}{3} = 0,00033 \frac{\text{m}}{\text{m}} = 0,33 \frac{\text{mm}}{\text{m}} \quad [\text{ec. 4.4}]$$

#### 4.6.3.- Modelo estructural

Con el objetivo de verificar la validez física de la hipótesis inicial de diagnóstico se presenta un modelo estructural simplificado donde se aplican unas acciones consecuentes con ella.

##### 4.6.3.1.- Características del modelo

Para la presa de Urrúnaga, de tipología de contrafuertes aligerados, se propone un modelo representado por un solo bloque consistente en dos barras empotradas. Se considera que utilizar un solo bloque es suficientemente representativo porque todos tienen el mismo perfil y porque la extensa longitud de coronación reduce a la mínima expresión el posible efecto arco que padecerían los bloques centrales si se diera un empuje por parte de los estribos. La diferencia estructural de los paramentos se ve reflejada en el modelo mediante la inercia y el área de ambas barras.

Tal y como se explicó en el capítulo 3, el objetivo es calcular el movimiento que registra el punto de unión de las dos barras, que podría ser cualquier punto de la coronación de la presa.

Como en el caso de la presa de Graus, para simular la expansión se aplica una fuerza axial ( $N_A$ ) constante sobre toda la superficie de la barra, que se obtiene, según la ecuación 3.4 (ver §3.6.3). El cálculo se realiza con el método matricial del equilibrio implementado en la rutina de Matlab presentada en el Anexo 4.

La simplificación mediante dos barras de esta presa se presenta en la figura 4.30. En la 4.30a se observa que la inclinación de las barras corresponde a la inclinación de los paramentos, y en la 4.30b se resalta, en rojo, el punto objeto de estudio. Este modelo no pretende sustituir posibles trabajos de más detalle que puedan realizarse en la 2ª Fase de Diagnóstico (ver tabla 3.1 del capítulo anterior) con el método de elementos finitos.

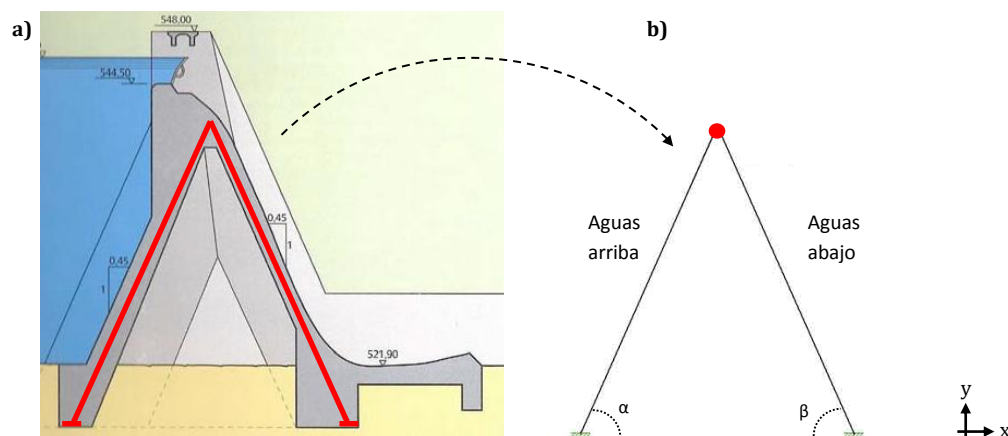


Figura 4.30.- a) Simplificación estructural de Urrúnaga; b) Estructura a resolver

Se escoge como referencia el bloque XVIII por ser, de los 4 bloques de los que se disponen de información detallada, el más representativo, al estar situado en la zona central de la presa y no haber padecido particularidades constructivas. A través de su perfil simplificado en dos barras (figura 4.30b) y del esquema de la planta (figura 4.31) puede determinarse las siguientes características físicas y geométricas de las barras: módulo de deformación del hormigón ( $E_c$ ), longitud de la barra, ángulo interno de la barra con la horizontal, momento de inercia y área, presentadas para cada uno de los paramentos en la tabla 4.7.

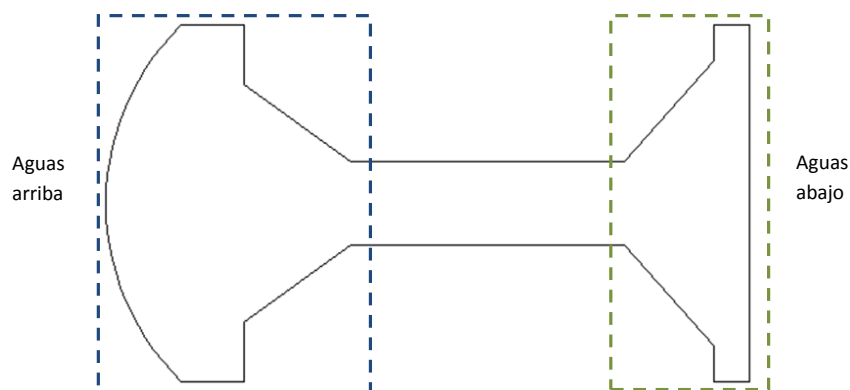


Figura 4.31.- Planta de un bloque utilizada para determinar las características de las barras



Magnitud barra	A. Arriba	A. Abajo
E (GPa)	$E_r = 30,00$	$E_b = 30,00$
Longitud (m)	$L_r = 28,9$	$L_b = 28,9$
Ángulo con horizontal (rad)	$\alpha = 1.14$	$\beta = 1.14$
Momento de Inercia (m <sup>4</sup> )	$I_r = 1929.74$	$I_b = 717.33$
Área (m <sup>2</sup> )	$A_r = 100,84$	$A_b = 50,95$

Tabla 4.7.- Características geométricas y físicas de las barras del modelo

#### 4.6.3.2.- Verificación de la hipótesis según el modelo presentado

Para dar mayor consistencia a la hipótesis establecida, mediante el modelo presentado van a resolverse dos casuísticas. En la primera (caso A) se considera que la humedad relativa de ambos paramentos es idéntica, lo que ocasiona que tanto el nivel de saturación de los poros como el nivel de hidratación de la cal libre sea idéntico en ambos paramentos. Para simular esta situación se impone en los dos paramentos una deformación idéntica  $\epsilon_r = \epsilon_b = 0,35$  mm/m, valor obtenido del apartado 4.6.2. Donde  $\epsilon_r$  es la deformación del paramento aguas arriba y  $\epsilon_b$  es la deformación del paramento aguas abajo.

En la segunda casuística (caso B), la que reproduce el estado que se entiende como el “real” de la estructura, se considera que la humedad relativa del paramento aguas arriba es mayor que la del paramento aguas abajo, por el simple hecho de estar en permanente contacto con el agua del embalse (de nivel prácticamente constante). La diferencia de humedad provoca que tanto el nivel de saturación como el de hidratación de cal libre sean algo mayores en el paramento aguas arriba que en el de aguas abajo, razón por la cual la deformación de dicho paramento es superior a la calculada en el apartado 4.6.2. Así, se impone la condición  $\epsilon_r > \epsilon_b$ , considerándose que la deformación aguas arriba es  $\epsilon_r = 0,40$  mm/m, mientras que la de aguas abajo se mantiene igual,  $\epsilon_b = 0,35$  mm/m.

En la tabla 4.8 se presenta el movimiento calculado por el modelo en ambas casuísticas. Además se adjunta el movimiento registrado en el bloque XVII para facilitar la comparación que pueda hacer el lector. La diferencia entre ambas simulaciones es pequeña (razonable teniendo en cuenta que la diferencia entre deformaciones también lo es), aunque el caso B revela unos resultados tanto en colimación (x) como, sobre todo, en nivelación (y) que son muy similares a los que se presentan en la realidad, lo que parece indicar que la hipótesis planteada está en la dirección correcta. Recuérdese que el movimiento considerado de referencia es el de nivelación, tanto por su magnitud, como por haber mostrado una tendencia constante a lo largo de todo el periodo de medición.

Para el caso B, el que reproduce la hipótesis de trabajo, se presenta en la figura 4.32 la deformada de las barras (no a escala), donde se puede ver gráficamente aquello que indican los números, que la presa se mueve en el plano vertical hacia arriba y en plano horizontal ligeramente hacia aguas abajo.

	Hipótesis de deformación		Movimiento bloque XVIII
	$\epsilon_r = 0,35 \text{ mm/m}$ $\epsilon_b = 0,35 \text{ mm/m}$	$\epsilon_r = 0,40 \text{ mm/m}$ $\epsilon_b = 0,35 \text{ mm/m}$	
Movimiento (mm)	x = 4,02	x = 5,64	x = 4,07
	y = 9,96	y = 10,75	y = 10,85

Tabla 4.8.- Resultados de la aplicación de las dos hipótesis en el modelo

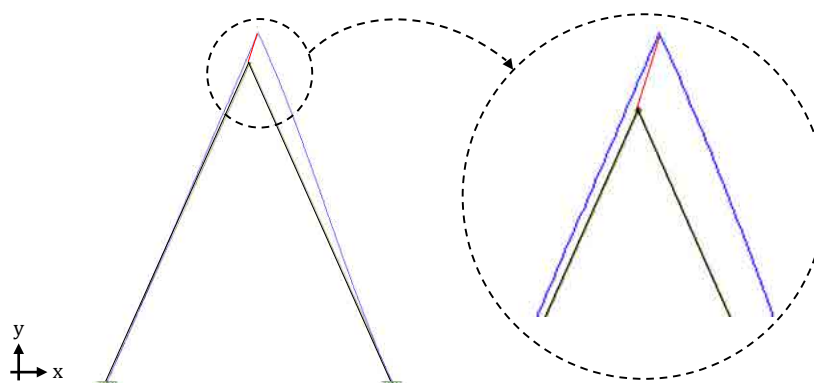


Figura 4.32.- Deformada de las barras caso B,  $\epsilon_r = 0,40 \text{ mm/m}$  y  $\epsilon_b = 0,35 \text{ mm/m}$

Los resultados obtenidos validan en primera instancia la 1ª Hipótesis de Diagnóstico que va a tratar de consolidarse con los ensayos de laboratorio.

#### 4.6.4.- Conclusiones y recomendaciones

De los diversos estudios desarrollados a lo largo de la 1ª fase de diagnóstico se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Existen unos movimientos remanentes continuados en el tiempo, especialmente en el plano vertical (nivelación), sin ser muy significativos en valor absoluto. El máximo movimiento de nivelación es de 17,01 mm, mientras que el de colimación es de 4,82 mm hacia aguas abajo.
- Las actuaciones realizadas han detenido las filtraciones, pero no la tendencia alcista de los movimientos.
- El comportamiento de la presa es homogéneo en todos sus bloques, en proporción a sus características geométricas.
- La presa presenta una ligera fisuración longitudinal y enramada.
- Se observa importante cantidad de calcita neoformada ( $\text{CaCO}_3$ ).

- El origen del daño puede deberse a las deformaciones causadas por el incremento de volumen que implica la reacción de la cal libre existente en el cemento (interior de la masa de hormigón) con el agua que primero se infiltra por las juntas de hormigonado y que con el paso de los años se infiltra en el resto de hormigón.
- Mientras quede cal libre por hidratar, tal y como ya se había apuntado, la presa puede que siga moviéndose como consecuencia de las deformaciones que se generan en su proceso de hidratación.
- El estado de conservación de la presa en 2009 era bueno, y no existía riesgo alguno. En esas circunstancias, y con los datos disponibles, no parece necesario realizar una intervención urgente para corregir el problema expansivo. Ello no impide que sea necesario asegurar el óptimo funcionamiento de los órganos de desagüe, afectados por cierta fisuración.
- Es aconsejable realizar un seguimiento detallado del comportamiento general de la presa, además de promover una campaña de extracción de testigos del cuerpo de presa y el desarrollo de un modelo numérico, ambos trabajos enfocados a verificar la 1ª hipótesis.

#### 4.7.- ENSAYOS DE LABORATORIO

Para dar consistencia a la argumentación desarrollada hasta el apartado anterior, y aunque directamente no es objeto de este trabajo, se presentan los resultados obtenidos mediante ensayos de laboratorio (2ª fase del proceso diagnóstico) realizados a una serie de testigos procedentes tanto de la cantera de Landa como del cuerpo de presa. La extracción de los mismos se realizó durante la ejecución de unos trabajos de acondicionamiento de la instalación.

Los análisis se realizaron en la Universidad de Alicante (UA), bajo la supervisión del Dr. Servando Chinchón, donde se mandaron la mitad de los testigos, el resto fueron al Instituto Eduardo Torroja (IETCC) para otros menesteres. Para la división de las muestras se empleó el siguiente criterio: la parte más superficial se dividió en dos mitades una para cada institución; también se enviaron a la UA una parte del centro y otra del final de cada sondeo.

##### 4.7.1.- Testigos cantera de Landa

El estudio detallado y práctico de la cantera de Landa pudo realizarse gracias a dos muestras de roca. En la figura 4.33 se presenta una de ellas, donde puede verse que se trata de calizas arrecifales cretácicas. La difracción de rayos X de ambas muestras revela que la mineralogía es calcita, y restos de cuarzo en cantidades muy pequeñas, tal y como puede verse en el difractograma presentado en la figura 4.34, correspondiente al testigo de la figura 4.33.

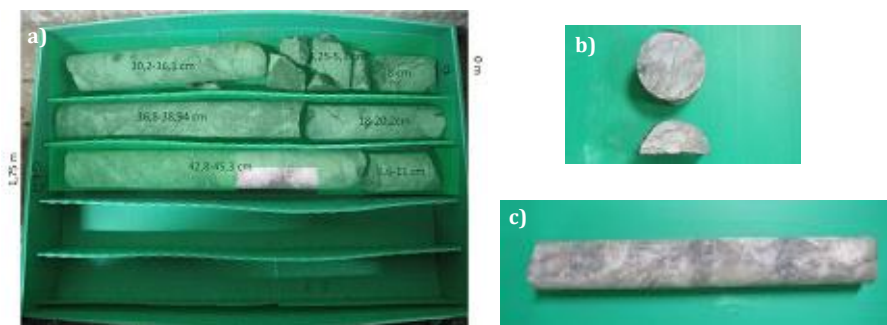


Figura 4.33.- Testigo de la roca de Landa: a) caja 1 (0-3m); b) y c) imágenes de detalle

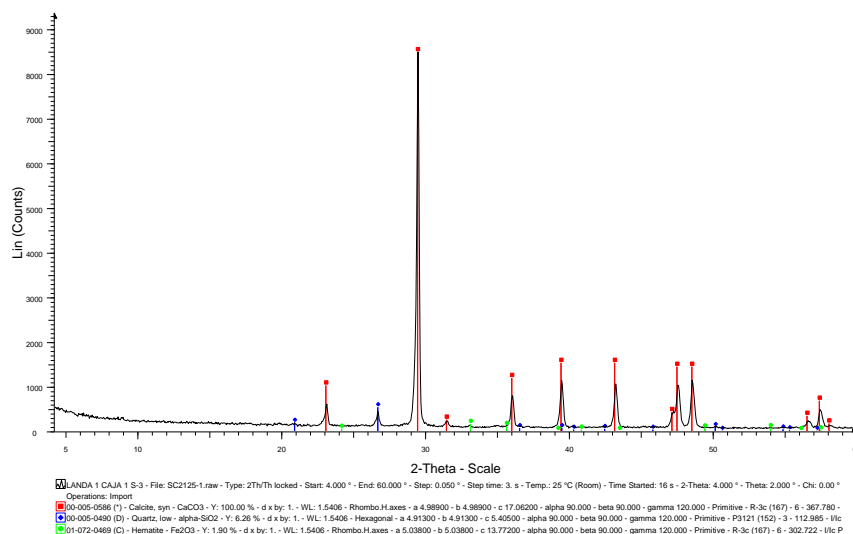


Figura 4.34.- Diffractograma correspondiente a la muestra figura 4.33

El análisis químico, cuyo resultado se presenta en la tabla 4.9, resuelve que la composición de ambas muestras es muy similar y que el componente principal de la roca es el CaO.

Óxido (en %)	Landa 1	Landa 2
MgO	0,356	0,466
SiO <sub>2</sub>	4,759	8,004
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,946	1,371
SO <sub>3</sub>	0,567	0,548
K <sub>2</sub> O	3,715	0,242
CaO	52,405	49,737
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,967	1,815
SrO	0,103	0,084
Pérdida al fuego	35,182	37,733

Tabla 4.9.- Composición química de las rocas

Estos resultados, además de ser coherentes con los obtenidos en las muestras tomadas durante la visita, confirman que no existen áridos reactivos en porcentajes suficientes como para que se desarrolle una reacción expansiva causada por el aumento de volumen de los áridos.

#### 4.7.2.- Testigos del cuerpo de presa

El análisis de los testigos de la presa se ha dividido en dos procedimientos: el clásico, consistente en difracción de rayos X, microscopia, tanto óptica como electrónica, y espectroscopia de energía dispersa de rayos; y el complementario, consistente en una tinción selectiva.

##### 4.7.2.1.- Ensayos clásicos

Los resultados de los 11 testigos extraídos de la presa de Urrúnaga son muy similares en lo esencial. Para dar continuidad al documento y no cargar el final de este capítulo con datos excesivos, solamente se presentan, a modo de ejemplo, los resultados de los ensayos realizados al sondeo del Contrafuerte 16 (ver figura 4.35), en el tramo más superficial, que va de 0 a 3 m, de un total de 9 m, extraídos con un ángulo de 24,4º con la vertical.

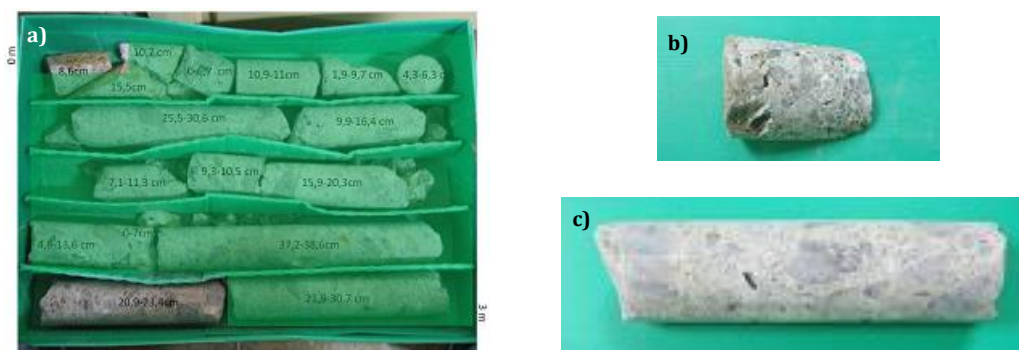


Figura 4.35.- Testigo del Contrafuerte 16: a) caja 1 (0-3m); b) y c) imágenes de detalle

En la figura 4.36a se puede ver una imagen de la muestra analizada, donde en azul se señala la zona donde se ha focalizado el estudio. En ella puede observarse un ligero tono ocre, que no ha suscitado particularidad alguna en los resultados obtenidos. En la figura 4.36b se presenta la imagen obtenida mediante una microscopia electrónica de barrido (MEB) que debe realizarse para poder obtener, a partir de la espectroscopia de energía dispersa de rayos X (EDX), la composición elemental de la muestra, que en este caso se presenta en la figura 4.37.

Tal y como puede verse el calcio (Ca) es el elemento que más presencia tienen en la muestra. Es cierto que según la tabla adjunta a dicho gráfico, dependiendo de cómo se haga la valoración, ganan peso representativo el oxígeno y el carbono, elementos que conforman el carbonato cálcico, lo que, sin duda, sigue validando la hipótesis de diagnóstico. En ningún caso se encuentran rastros de derivados del azufre o sílice.

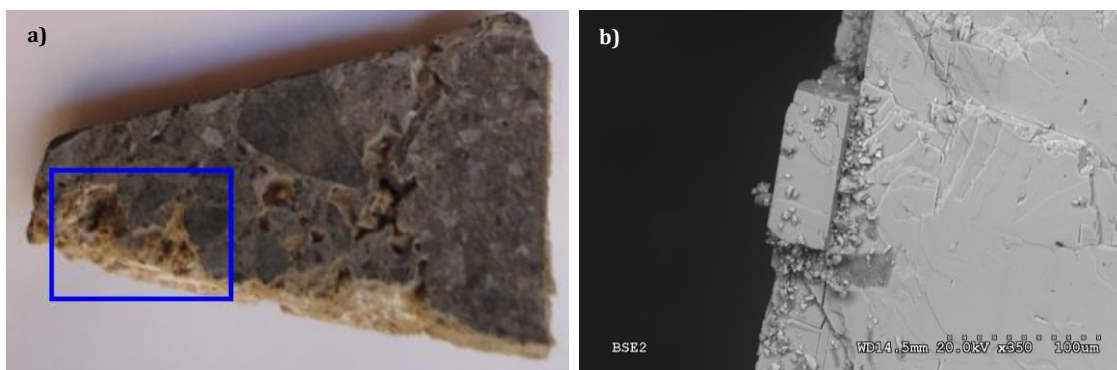


Figura 4.36.- a) Muestra de hormigón analizada; b) Aspecto de la muestra mediante MEB

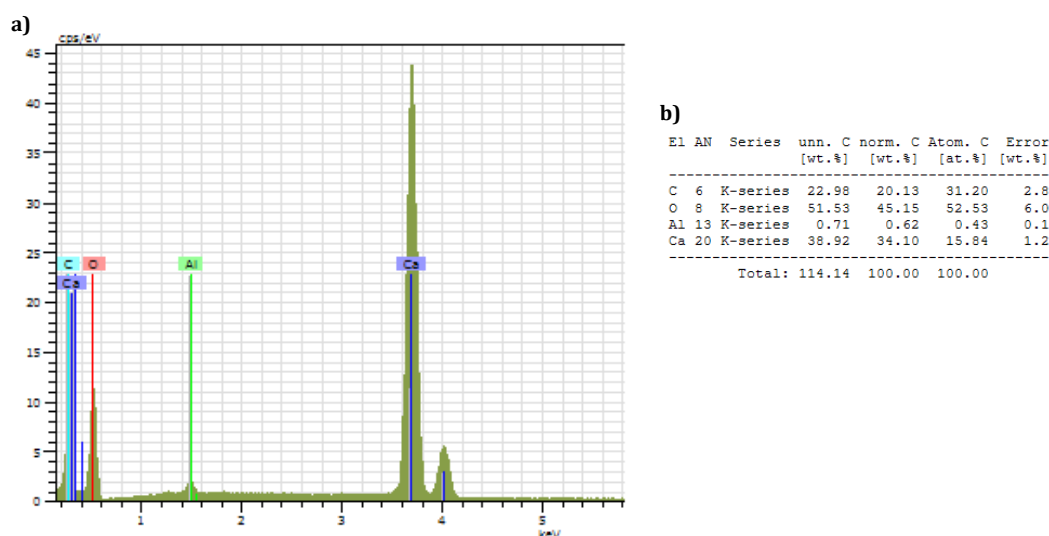


Figura 4.37.- a) Composición elemental obtenida por EDX; b) Tabla de resultados

Finalmente en la figura 4.38 se presenta el difractograma de la muestra estudiada. Como era de prever, por todo lo expuesto hasta el momento, el principal compuesto cristalino que puede identificarse es el carbonato cálcico, o calcita, tal y como se desprende de la leyenda del difractograma. En éste gráfico también puede detectarse una pequeña presencia de cuarzo al que, en un principio, no debe darse mayor importancia.

Las principales conclusiones que pueden extraerse de este estudio son:

- Los resultados obtenidos en el estudio de los distintos testigos son muy similares.
- No se encuentran productos resultantes de reacciones expansivas causadas por áridos reactivos.
- Las eflorescencias y concreciones encontradas en los testigos de hormigón son todas de carbonato cálcico.
- En los difractogramas del hormigón se ven ciertas reflexiones que significan que hay restos de cemento anhidro, cosa que sucede en mayor o menor cantidad en

todos los hormigones. Si queda cemento sin hidratar, y este contenía cal libre, es razonable pensar que puede quedar cal libre también por hidratar.

- Todas las conclusiones concuerdan con la 1ª Hipótesis de Diagnostico establecida.

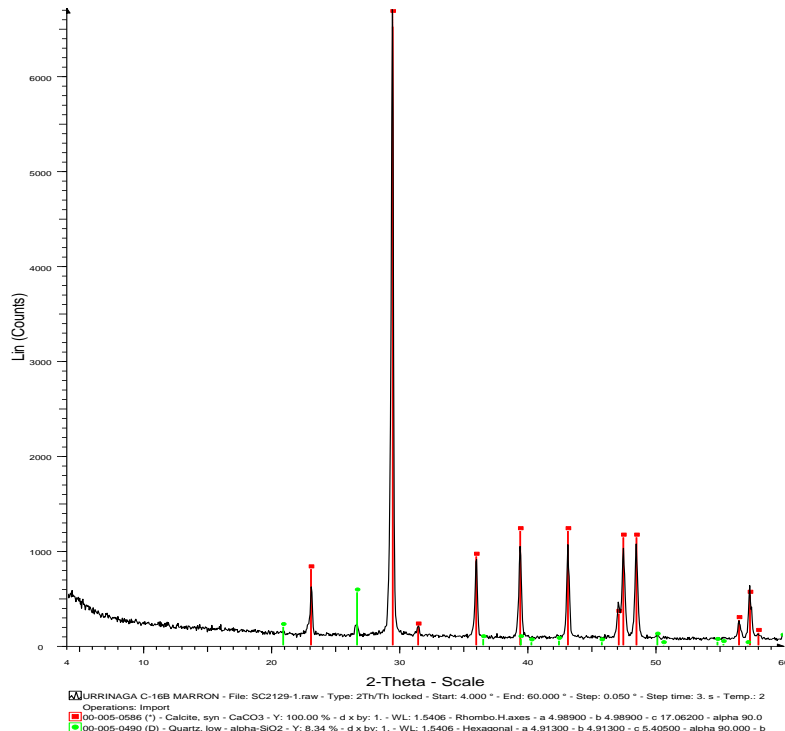


Figura 4.38.- Difractograma de la muestra de la figura 4.35

#### 4.7.2.2.- Ensayo complementario: tinción selectiva

Para complementar los ensayos realizados a los testigos y para acabar de contrastar la línea argumental de la 1ª hipótesis, se impregnó un testigo partido en dos mitades con fenolftaleína para ver cómo se teñía, tal y como puede verse en la figura 4.38.

De este simple ejercicio, que puede considerarse representativo del conjunto de la presa, porque, como se ha dicho, la composición del hormigón es muy similar, pueden extraerse las siguientes reflexiones:

- La cantidad de reserva alcalina ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) es notable. El aspecto es similar al de un hormigón joven poco poroso, con una dosificación generosa de cemento CEM I.
- No se ven terrones gruesos de CaO (cal libre) que se hubieran notado y que por ejemplo podrían haber dado lugar a la rotura del hormigón. Esto parece indicar que la cal libre procede del cemento.

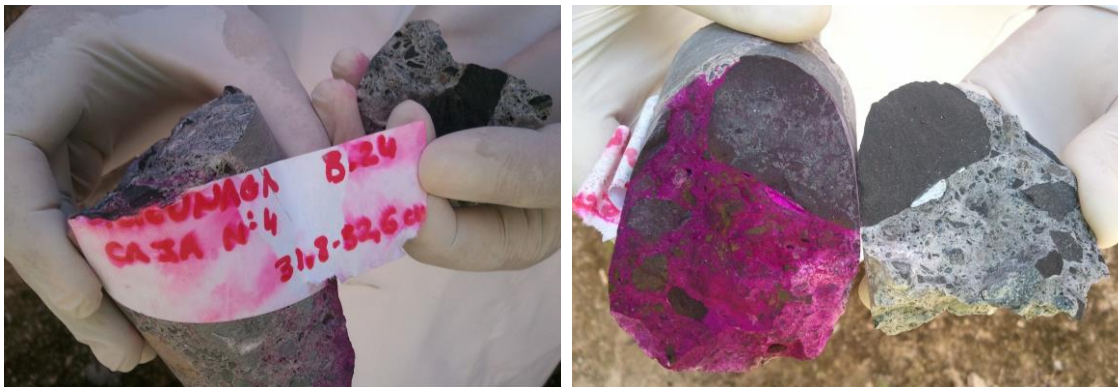


Figura 4.39.- Testigo de la presa de Urrúnaga: a) sin teñir; b) teñido

#### 4.8.- CONCLUSIONES

A nivel general puede afirmarse que la metodología de diagnóstico presentada en el capítulo anterior requiere de una serie de actividades escalonadas que, evaluadas de forma transversal, permiten establecer de forma sistemática la 1ª Hipótesis de Diagnóstico, tal y como se ha comprobado en la aplicación realizada para el caso de la presa de Urrúnaga.

La herramienta es útil para todo aquello que concierna a la detección de problemas que afecten a la presa, sus órganos afines o a las instalaciones vinculadas a su explotación ordinaria. Este capítulo ha servido, además, para constatar que su implementación es sencilla, y para resaltar la importancia de la interpretación de la significación de los resultados obtenidos en el contexto global de las actuaciones realizadas durante el diagnóstico, y no de una forma abstracta como cifras absolutas.

A nivel específico, remarcar la importancia de la metodología a la hora de establecer la 1ra hipótesis de diagnóstico en el caso de la presa Urrúnaga, donde, a pesar de haberse realizado numerosos estudios, no se había establecido una explicación consistente a los movimientos remanentes.

Los principales signos de daño que presenta la presa (ligera fisuración longitudinal y enramada, además de unos movimientos de nivelación remanentes continuados en el tiempo y de carácter general) pueden ser debidos a las deformaciones causadas por la hidratación diferida de la cal libre existente en el cemento, que produce una importante cantidad de calcita neoformada ( $\text{CaCO}_3$ ) que se encuentra por todo el cuerpo de presa.

En vista de los datos disponibles del año 2009, la presa se encuentra en buen estado y no es necesario que se realice una actuación específica más allá de la ordinaria conservación que realizan con buen criterio los técnicos de Iberdrola Generación.

En el caso de quererse realizar una actuación específica para detener la tenue evolución de los daños, podría plantearse la instalación de una capa impermeabilizante en



ambos paramentos para evitar la entrada de agua en el hormigón y la consecuente hidratación de la cal libre.

Si los estudios de la segunda fase del diagnóstico (análisis de laboratorio y modelos de simulación numérica) corroboran el dictamen, se podría plantear la posibilidad de que la reacción diferida de la cal libre (RDCL) sea la causa del movimiento remanente de muchas presas que no presentan áridos reactivos y en las que han cesado los movimientos cuando han sido impermeabilizadas. Hasta el momento no se ha dictaminado un diagnóstico claro que justifique este tipo de comportamiento.

## CAPÍTULO 5

# ÍNDICE DE PRIORIZACIÓN EN LA GESTIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS (IPGOH)

### 5.1.- INTRODUCCIÓN

En el bloque número dos de este documento se ha presentado una metodología de trabajo que ayuda al técnico de explotación a determinar cuál es el origen de los daños que presenta una estructura hidráulica, preferentemente una presa. Esta metodología puede servir, además, anualmente, para dotar de argumentos a todos los responsables de un complejo hidráulico cuando deben pedir financiación a los órganos gestores de la empresa, para programar las actuaciones que van a permitir corregir los daños y garantizar, de esta forma, la seguridad de la estructura.

La gran carga presupuestaria que representan las obras de mantenimiento y conservación, y los limitados recursos económicos disponibles, imposibilitan la realización simultánea de todas ellas. Recuérdese que la inversión en obra civil ha descendido radicalmente en el último quinquenio, 2008-2013 y parece ser que difícilmente va a recuperar el nivel de antaño (ITEC, 2013; y DBK, 2013).

Unos de los sistemas de ayuda a la decisión más utilizados en ingeniería civil son los métodos multicriterio (MCDM). Estos sistemas valoran de forma sistemática, para cada alternativa, distintos factores que cuantifican los beneficios y perjuicios que recaen sobre los *stakeholders*, permitiendo que el decisor ordene las alternativas (Tsfamariam y Sadiq, 2006; Sadiq y Tsfamariam, 2009; Huang et al., 2011). Los MCDM se han

implementado en distintos ámbitos de decisión y a distintos niveles. En la gestión de infraestructuras en explotación, por ejemplo, se han utilizado para seleccionar las actuaciones de mantenimiento en sistemas ferroviarios (Nystr y Sderholm, 2010), carreteras (Khadem y Sheikholeslami, 2010) y puentes (Valenzuela *et al.* 2010). En ingeniería hidráulica, en cambio, ha faltado optimización (en términos de inversión económica y reducción del nivel de riesgo) en la programación y ejecución de actuaciones de mantenimiento y conservación debido a la inexistencia de un marco referencial de asistencia a la decisión.

La voluntad principal de este capítulo es presentar el *Índice de Priorización en la Gestión de Obras Hidráulicas* (IPGOH), un sistema multicriterio de ayuda a la decisión que ordena y prioriza las inversiones de mantenimiento en obras hidráulicas. El objetivo final es seleccionar aquellos proyectos que presentan una mejor respuesta global y que por tanto aportan un mayor valor añadido tanto para la empresa como para la sociedad.

Para concretar este planteamiento se propone el desarrollo de un árbol de decisión basado en MIVES, Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones Sostenibles (§2.6), que valora de una forma integrada todos los aspectos que intervienen en el desarrollo sostenible. Su capacidad de fragmentar un problema complejo en pequeñas secuencias independientes conjugadas genera un esquema de análisis fácil de interpretar y reproducir. La sencillez conceptual (solamente se utiliza aquello que se comprende) y operacional, unida al breve tiempo de implementación y a la robustez (entendida como la capacidad del modelo de proporcionar resultados coherentes) hacen que ésta sea la herramienta ideal para concebir el sistema de ayuda a la decisión.

Además de eliminar la arbitrariedad en la toma de decisiones, este modelo pretende ofrecer transparencia ante la sociedad civil. Cualidad que sin duda le transfiere un atractivo suplementario, más si cabe, en un momento en que la corrupción y el fraude son la segunda preocupación de la sociedad española (CIS, 2013).

Para alcanzar el objetivo marcado, el presente capítulo, con el que se inicia el tercer bloque de esta tesis (§1.4), se divide en tres grandes apartados:

- Características de la decisión (§5.2)
- Fase 1. Evaluación homogénea del daño (§5.3)
- Fase 2. Índice de Priorización en la Gestión de Obras Hidráulicas (§5.4)

## 5.2.- CARACTERÍSTICAS DE LA DECISIÓN

Este apartado pretende contextualizar la decisión a nivel general, para lograrlo, en el marco conceptual se ubica la decisión espacial y temporalmente, limitando las dimensiones del estudio; posteriormente se describen las distintas tipologías de actuaciones que se van a considerar. Ambos apartados pretenden fomentar el uso adecuado del índice de priorización y evitar así que se intenten evaluar actuaciones para

las que no está concebida la herramienta; finalmente, se justifica la utilización de la sostenibilidad como argumento válido para actuar como hilo conductor de la decisión.

### 5.2.1.- Marco conceptual

La mente humana, y más la ingenieril, tiende a modelar la realidad física según un sistema de coordenadas cartesianas que puede utilizarse en toda decisión como marco de referencia conceptual. Los dos ejes independientes que en este caso definen el sistema donde se toma la decisión son: ámbito ( $x$ ) – ciclo de vida ( $y$ ), tal y como puede observarse en la figura 5.1.

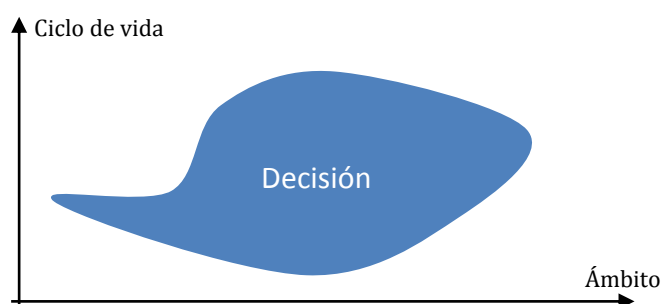


Figura 5.1.- Marco conceptual de la decisión

El ámbito de la decisión establece, a priori, cuáles son los sujetos que pueden ser de la misma. Su definición es fundamental a la hora de limitar la dimensión del estudio. En el caso que ocupa esta tesis doctoral se ha considerado que el ámbito de la decisión queda configurado por las siguientes unidades estructurales<sup>1</sup>:

- Cuerpo de presa
- Estribos
- Cimentación
- Vaso
- Órganos afines

Unas unidades estructurales que tienen la particularidad de que son claramente diferentes las unas de las otras, del mismo modo que lo son los daños que sufren. Teniendo en cuenta que la decisión es única, al no hacerse diferencia entre la partida presupuestaria dedicada a una unidad estructural o a otra, los daños de todas las unidades, por muy diferentes que sean, deben compararse para dilucidar qué actuaciones deben considerarse prioritarias.

---

<sup>1</sup> Tanto en los próximos apartados como en los capítulos que siguen, cuando el texto hable de “estructura”, “complejo presa-embalse”, “complejo hidráulico” o simplemente de “presa” se estará refiriendo indistintamente a cualquiera de las cinco unidades estructurales.

El ciclo de vida divide el estudio a partir de las fases temporales por las que transcurre una estructura a lo largo de su vida útil. Estas fases, por norma general, son: proyecto, construcción-puesta en obra, explotación y abandono-demolición.

En este estudio solamente se va a considerar la fase de explotación, pues se entiende que las estructuras susceptibles de necesitar un mantenimiento son aquellas que ya se encuentran en servicio, con lo cual las dos primeras fases se consideran consolidadas en tiempos pasados. La fase de abandono-demolición tampoco se considera al entenderse que si se proyecta una actuación de conservación y mantenimiento es precisamente para evitar que, a corto plazo, tenga que dejar de utilizarse la estructura en cuestión.

Para entender la dimensión temporal de cada uno de los proyectos a priorizar, es necesario que toda actuación de mantenimiento y conservación cuente con una estimación explícita de su vida útil, entendida ésta, según el ASTM (1996), como el periodo de tiempo en que las prestaciones y propiedades esenciales del elemento en que se actúa permanecerán superiores al valor mínimo aceptable gracias a esa intervención puntual. Se acepta que durante la vida útil de la actuación se realicen actividades de mantenimiento rutinario de la misma.

### 5.2.2.- Tipología de actuaciones a priorizar

La metodología pretende priorizar solamente aquellas actuaciones de mantenimiento y conservación que en un periodo de explotación ordinaria debe realizar el gestor de una obra hidráulica para garantizar que ésta opera con total seguridad. En este grupo quedan comprendidas las siguientes actuaciones: preventivas, rehabilitación, reparación, refuerzo y sustitución.

- Preventivas: Acciones realizadas con la finalidad de anticiparse a la aparición de un daño, o destinadas al control de su evolución temporal, entre las que se va a considerar, por tanto, la instalación de una nueva auscultación o los estudios de I+D+i.
- Rehabilitación: Intervención para la adecuación funcional de un elemento de la estructura que se realiza cuando éste pierde la capacidad de desarrollar la actividad propia para la cual fue creado.
- Reparación: Actuaciones que se emplean cuando se pretende recuperar las prestaciones estructurales originales de uno o varios elementos afectados por los daños.
- Refuerzo: Actuaciones que se realizan cuando se pretende mejorar las prestaciones del elemento estructural original. Básicamente, consiste en incrementar la capacidad resistente del hormigón.
- Sustitución: Este método se utiliza cuando el estado de deterioro de la estructura es tal que la mejor solución consiste en trasladar las cargas del elemento original a

un nuevo elemento. La sustitución aporta un material nuevo que pasa a desempeñar la función resistente del elemento original.

Puede existir un segundo grupo de actuaciones de mantenimiento, consideradas menores (ej: pintura de barandillas), que no quedan contempladas. La razón principal es que no tienen relación alguna con la seguridad, y además se nutren de unas dotaciones económicas menores que se consideran en otro tipo de partidas presupuestarias.

### 5.2.3.- La sostenibilidad como eje de la decisión

Los métodos multicriterio se han revelado como una referencia en los sistemas de ayuda a la decisión. El único problema, no por eso trivial, radica en encontrar, entre los grupos de influencia, el consenso en la definición de los conceptos a medir, ya sean mediante variables o atributos.

La sostenibilidad, cuyo objetivo esencial es optimizar la gestión de todo tipo de recursos en cualquier actividad, evitando en un sentido general cualquier consumo superfluo o injustificado, se ha introducido con firmeza, a pesar de ser una disciplina reciente<sup>2</sup>, como argumento válido a la hora de crear el consenso necesario en la definición de las variables a evaluar en muchas áreas de ingeniería civil.

Cualquier desarrollo sostenible se basa en un enfoque a largo plazo que tenga en cuenta el carácter inseparable de los aspectos ambientales, sociales y económicos de las actividades de desarrollo, tal como se ilustra en la figura 5.2 (Quebec National Assambly, 2006; United Nations, 2013). Éste es un tipo de planteamiento que las empresas eléctricas tratan de hacer suyo. Es prueba de ello Endesa (2011), donde se manifiesta que el Plan de Sostenibilidad 2008-2012 de la compañía integra plenamente de forma estratégica las tres dimensiones.

A pesar de su trascendencia, en ingeniería civil, el estudio comparativo del grado de sostenibilidad mediante un análisis multicriterio, en gran medida, solamente se ha utilizado para tomar dos tipos de decisiones:

- Seleccionar los proyectos de infraestructuras clave para el futuro desarrollo de ciertas regiones o países, tal y como puede verse en Ziara *et al.* (2002), Shen *et al.* (2011), Lambert *et al.* (2012) o Mejia-Giraldo *et al.* (2012), entre otros.
- Seleccionar, en un proyecto concreto, la alternativa constructiva más adecuada de entre un número finito de posibilidades, tal y como puede verse Shang *et al.* (2004), Abrishamchi *et al.* (2005), Comisión Permanente del Hormigón (2008), Koo y Ariaratnam (2008) o Ariaratnam *et al.* (2013), entre otros.

---

<sup>2</sup> La Comisión Mundial para el Medio Ambiente en el informe Brundtland, en 1987, acuñó por vez primera el concepto de “desarrollo sostenible” para referirse al desarrollo que: “asegura la satisfacción de las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las propias”.

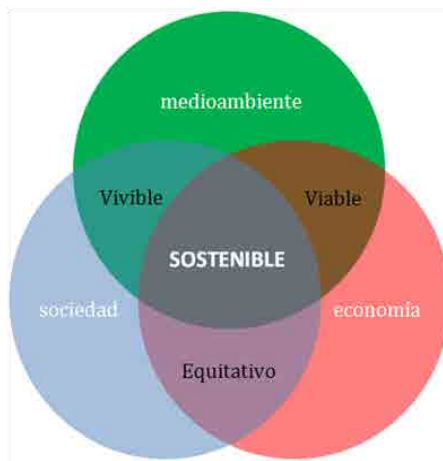


Figura 5.2.- Desarrollo sostenible

#### 5.2.4.- La decisión dividida en dos fases

En el presente trabajo se pretende desarrollar una herramienta nueva que se encuadra en una realidad diferente. La decisión que debe tomarse se sitúa en un contexto ordinario de explotación, donde deben compararse daños existentes de naturalezas y características dispares, que se presentan en varias obras hidráulicas, para determinar de manera objetiva cuál de ellos merece ser tratado con preferencia.

La nueva herramienta no puede asimilarse a los sistemas desarrollados para definir un modelo de país porque son métodos muy generalistas, altamente vinculados a la construcción de nuevas infraestructuras, y porque como recuerda Shen *et al.* (2011) en muchos casos utilizan las tres dimensiones de la sostenibilidad de forma disgregada.

El modelo necesario tampoco puede asimilarse al grupo de herramientas que buscan la alternativa constructiva más sostenible. En ellas, el decisor debía decidir para un único proyecto entre  $n$  alternativas constructivas homogéneas y muy similares, planteadas para dar respuesta a un mismo problema, como es el caso de la figura 5.3 (Villegas, 2009), donde el decisor puede escoger entre una solución prefabricada y la solución tradicional para construir un tramo de carretera.

Ahora en cambio el decisor debe comparar  $n$  actuaciones a realizar en  $p$  obras hidráulicas diferentes ( $p \leq n$ ) para corregir  $n$  daños que pueden ser tan diversos como los que se presentan a modo de ejemplo en la figura 5.4, y que corresponden a: a) fisura zona de compuertas (presa de Camarasa), b) deslizamiento de ladera (presa de Panix), c) fisuras dientes pie de presa (presa de Canelles), d) movimientos remanentes (presa de Graus), e) filtraciones en galerías (presa de Torán), f) degradación paramento (presa de Paso Nuevo), g) fisura galería (presa de Ullivarri) h) degradación muro contención (presa de Ribarroja).

Así, la dificultad y el gran reto de este trabajo es encontrar un sistema objetivo, capaz de homogeneizar las distintas realidades que pueden presentarse en la estructura y, que a su vez, sea suficientemente concreto para poder efectuar un cotejo técnicamente

válido a partir de los tres planos que definen un sistema sostenible (sociedad, medioambiente y economía).

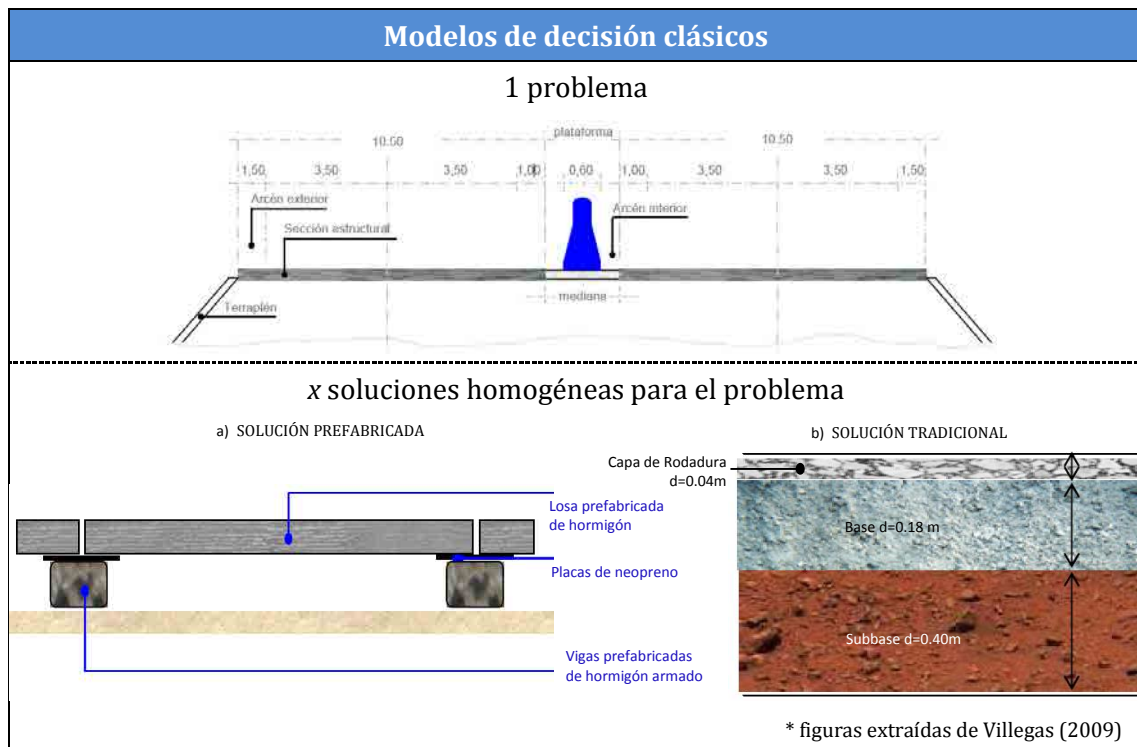


Figura 5.3.- Modelos de toma de decisiones clásicos

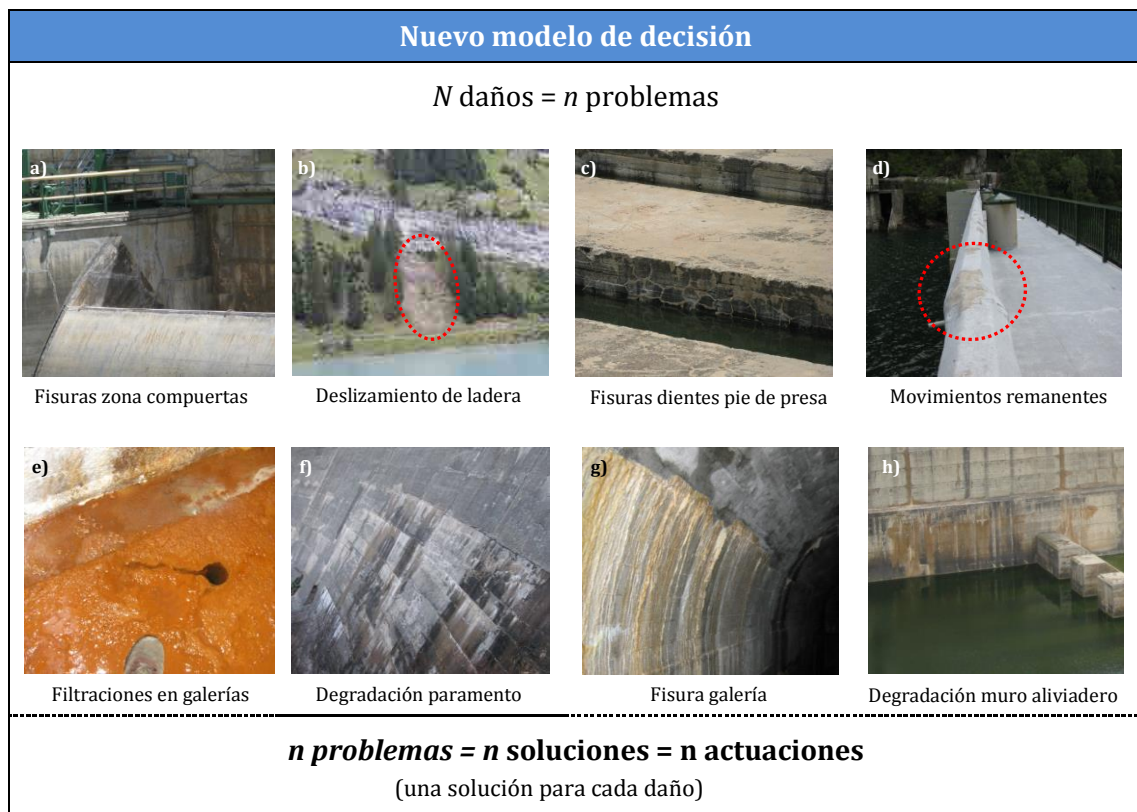


Figura 5.4.- Nuevo modelo de toma de decisiones



Como se ha visto en la figura 5.4, los problemas que pueden presentar las distintas tipologías estructurales son muy diversos y, en consecuencia, también los son las actuaciones propuestas para solucionarlos. Ante la necesidad de comparar realidades de naturaleza múltiple, para tomar la decisión, según Pardo-Bosch y Aguado (2014), es necesario desarrollar un sistema previo de homogeneización, y por tanto dividir el proceso de evaluación en 2 fases, tal y como puede verse en la figura 5.5: la *Fase 1*, de homogeneización, en la que se evalúa de forma análoga el daño que corrige cada una de las  $n$  actuaciones propuestas; y la *Fase 2*, en la que se evalúan las consecuencias que se pueden derivar de cada uno de los daño en el contexto donde aparecen, y se establece el orden de prioridades a través del *Índice de Priorización en la Gestión de Obras Hidráulicas* (IPGOH).

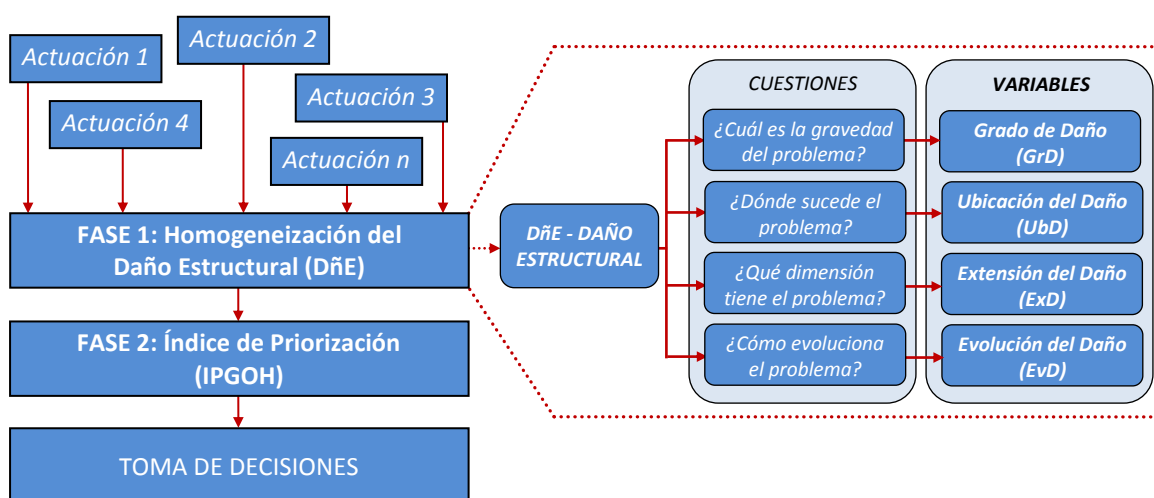


Figura 5.5.- Fases de la decisión y variables de la Fase 1

### 5.3.- FASE 1. EVALUACIÓN HOMOGÉNEA DEL DAÑO

El daño que presenta la estructura es uno de los dos condicionantes de la decisión. De su relevancia, además, dependen las consecuencias (el segundo condicionante). Por tanto, para decidir con criterio es necesario cuantificar la importancia del daño (Fase 1), y hacerlo con un sistema universal, válido para cualquier tipología de afectación.

A tal fin se define el concepto ingenieril *Daño Estructural* (DñE), una nueva unidad que valora de forma semicuantitativa, y por tanto objetiva, cómo se ve afectada la capacidad que tiene la estructura de garantizar las exigencias de seguridad y servicio, para las que fue proyectada, durante toda su vida útil. Este sistema innovador puede cuantificar cualquier modo de daño, permitiendo la homologación conceptual de lesiones diferentes presentes en distintas tipologías estructurales, haciendo posible, a partir de ese momento, su comparación. Mediante el cálculo del DñE, además, se contextualiza, a priori, el problema a afrontar, independientemente de la estructura en la que se encuentra y del entorno en el que se sitúa. Es decir, se valora el daño sin tener en cuenta los efectos que puedan derivarse porque no se debe, ni puede, condicionar la evaluación del daño a la

significación de la presa. La importancia de la patología es independiente del “paciente” que la sufre. Las consecuencias se valoran con en la Fase 2, no con el DñE en la Fase 1.

No es fácil encontrar un sistema universal que evalúe el DñE de forma consistente y que asegure, además, un alto grado de representatividad de la realidad. Para pautar y organizar esta evaluación se define un modelo con cuatro variables independientes y complementarias que, a pesar de tener un carácter genérico, aseguran el rigor y la representatividad que necesita un análisis de este tipo. Cada una de ellas responde a una pregunta estratégica, tal y como puede verse en la figura 5.4. Las variables son: *Grado de Daño* (GrD), *Ubicación del Daño* (UbD), *Extensión del Daño* (ExD) y *Evolución del Daño* (EvD).

A cada variable (tratadas todas como atributos) se le asigna una puntuación que puede oscilar en una escala que va de 1 a 5 puntos, según la recomendación de Williams (2009). Para evitar disparidad de criterios, ocasionados por pequeños matices, se aconseja, en este tipo de evaluaciones, simplicidad y ésta se consigue con una gradación que como máximo contemple 5 niveles. La puntuación de una variable no debe condicionar la puntuación de las otras, porque son variables independientes y como tales deben valorarse.

### 5.3.1.- Grado de daño (GrD)

El *Grado de Daño* (GrD) define la gravedad intrínseca del daño manifestado. Es decir, valora como queda alterada la condición física de la estructura (o de alguno de sus elementos constituyentes) una vez se manifiesta el daño.

Esta variable contempla 5 escenarios diferentes de deterioro para describir el estado de conservación en que se encuentra la estructura, tal y como se muestra en la tabla 5.1.

Variable	Atributo	Puntos
<i>Grado de Daño</i> (GrD)	Muy Grave	5
	Grave	4
	Medio	3
	Bueno	2
	Muy Bueno	1

Tabla 5.1.- Atributos que definen la variable *Grado de Daño*

Mediante los 5 atributos considerados se contempla todo tipo de estado que justifique una actuación o análisis. Se valoran tanto los estados que pueden ocasionar una insuficiencia estructural, como aquellos que, a causa de un deterioro superficial, solamente proyecten una mala percepción acerca del complejo hidráulico. No se puede olvidar que el ingeniero debe lograr mantener la estructura en un estado que conjugue la visión técnica con el lenguaje plástico.

Una estructura se encuentra en un estado *Muy Grave* cuando el daño presente puede significar de forma inmediata el fallo de la estructura, por pérdida de estabilidad, colapso o rotura de la misma o parte de ella. Se considera la situación más peligrosa de todas. Este estado podría asimilarse al estado límite último de las normativas estructurales EHE 08 y la EAE 11.

Se dictamina que una estructura se encuentra en un estado *Grave* si no se puede garantizar su funcionalidad como consecuencia del nivel de daño. Aunque la situación es crítica, en esta situación no existe peligro de fallo. Los fenómenos que pueden ocasionar que se alcance este nivel son: una apertura excesiva de las fisuras, causada por una tensión que sobrepasa la capacidad resistente del material; unas deformaciones, normalmente manifiestas mediante movimientos relativos, que sobrepasen los valores establecidos como límite en situación de servicio; y una vibración que cause incomodidad en las personas que se encuentran en la estructura y/o que afecte al funcionamiento de equipos sensibles a este tipo de fenómenos. Esta situación podría asimilarse a un estado límite de servicio.

El grado de daño es *Medio* cuando las estructuras se encuentran en una situación en que queda en entredicho su durabilidad como consecuencia de la actividad de acciones físicas y/o químicas. Estas acciones generan un deterioro progresivo, pudiéndose degradar las características de la estructura hasta límites inaceptables, en cuyo caso el estado se designará como *Grave* o *Muy Grave*.

Se considera que la estructura se encuentra en un estado *Bueno* cuando, aun presentando signos de daño, estos son leves y carentes de significación. Se encuadran aquí todas las afectaciones que siendo estructurales no comprometen en ningún sentido la durabilidad futura de la composición. Este nivel de gravedad sirve para marcar la diferencia entre una estructura donde la durabilidad queda condicionada por el daño y aquella donde solamente existe un problema estético.

Finalmente se considera que la estructura se encuentra en un estado *Muy Bueno* si el único problema ocasionado por el daño es de carácter estético. La falta de la armonía propia de la "belleza" resulta en una apariencia desagradable a la vista, que puede generar un grado de desafección hacia la estructura que en algunos casos exige de la realización de una actuación. Las causas que pueden ocasionar que se genere esta percepción son muchas y diversas: una notoria fisuración no estructural, lascas en el hormigón, agua en las galerías, humedades, resto de productos de una reacción química, eflorescencias...

En caso de duda entre si se debe seleccionar entre *Bueno* y *Medio*, o entre *Bueno* y *Muy Bueno*, se aconseja al técnico seleccionar siempre el grado con mayor puntuación, en definitiva, el más desfavorable, para situarse dentro del lado de la seguridad en la evaluación.

### 5.3.2.- Ubicación del daño (UbD)

La *Ubicación del Daño* (UbD) define la posición relativa en que aparece el daño. La trascendencia de un mismo daño varía en función de la relevancia del lugar de la estructura en el que éste se manifiesta.

Con un ejemplo es fácil entender la importancia de esta variable. Una fisura por interacción suelo-estructura que aparece en el paramento aguas arriba, por encima de la cota de embalse, no debería, a priori, generar preocupación alguna a los técnicos; en cambio, si la misma fisura aparece por debajo de una galería, la preocupación debe ser bastante mayor, ya que, por ejemplo, podría, entre otras muchas cosas, generar pérdidas de agua por filtraciones. Tampoco tiene la misma importancia un deslizamiento de ladera ocasionado en la cola del embalse que uno, con las mismas características, que se dé a escasos 200 m del paramento aguas arriba de la presa.

Con la intención de crear una zonificación coherente, sencilla, discriminante y que, a su vez, sea representativa de un conjunto tan extenso y complejo como el que conforman la presa y el embalse, se dividen todas las posibles ubicaciones de daños únicamente en 3 grupos de posiciones: *Crítica*, *Principal* y *Secundaria*, tal y como se pudo ver en la tabla 5.2.

Variable	Atributo	Puntos
<i>Ubicación del Daño (UbD)</i>	Crítica	5
	Principal	3
	Secundaria	1

Tabla 5.2.- Atributos que definen la variable *Ubicación del Daño*

Para mantener la escala propuesta por Williams (2009) se asignan puntuaciones de 1 a 5 a pesar de que los daños solamente puedan clasificarse en 3 grupos. Se prescinde de los valores intermedios, 2 y 4, con el objetivo de aumentar la capacidad de discriminación de la clasificación. De todas maneras en caso de duda entre si la ubicación es *Crítica* o *Principal* se puede puntuar la variable UbD con 4 puntos, y si la duda es entre *Principal* y *Secundaria* se puede puntuar UbD con 2 puntos.

El daño se presenta en una zona *Crítica* cuando afecta a un elemento esencial de la presa, cuyo estado de conservación es de importancia decisiva para evitar consecuencias negativas referentes a seguridad. Ej: la afectación de una compuerta o de un estribo donde se sustenta la presa.

En cambio, un daño se encuentra en una zona *Principal* cuando afecta a elementos cuyo fallo reduce el margen de seguridad del conjunto estructural, aunque, a priori, no lo elimina. También se encuadran aquí los daños que pueden acarrear problemas funcionales. Ej: Fisuras por encima de cota de embalse en cuerpo de presa o desalineación de ejes de turbinas.

Finalmente, se considera que un daño se encuentra en una zona *Secundaria* cuando se desarrolla en un punto que no entraña prácticamente efectos negativos. Ej: deslizamiento de ladera en cola de embalse o fisuras en pavimento antideslizante de acceso a una galería.

### 5.3.3.- Extensión del daño (ExD)

La variable *Extensión del Daño (ExD)* valora que parte o porción de la estructura está afectada por el daño. Es fácil entender que a mayor dimensión (mayor espacio afectado) peor es la situación.

Para poder cuantificar esta variable, debido a la gran complejidad morfológica del conjunto presa-embalse, se pueden utilizar distintas magnitudes físicas: *longitud*, *superficie*, *volumen* e, incluso, *número de unidades afectadas*.

- La *longitud* mide la extensión de las tipologías de daño planas en que una dimensión predomina marcadamente sobre la otra. Ej: fisuras orientadas.
- La *superficie* mide la magnitud de un daño que se extiende por igual en dos dimensiones, largo y ancho. Ej: manchas de humedad o fisuras en mapas.
- El *volumen* mide el espacio que puede ocupar el material que puede desprenderse de un cuerpo sólido. Ej: potencial deslizamiento de ladera.
- El *número de unidades afectadas* cuantifica los elementos mecánicos que trabajan a nivel individual en un conjunto y que no funcionan correctamente. Ej: n<sup>o</sup> de compuertas o turbinas.

Se recuerda que el objetivo de cuantificar el *DñE* es que se puedan comparar tipologías distintas de daño. Si la extensión se mide en unidades diferentes (metros, metros cuadrados, metros cúbicos o n<sup>o</sup> de unidades) es imposible que se pueda realizar dicha comparación. Además, teniendo en cuenta que el daño puede aparecer en presas distintas, una magnitud que puede representar la afectación total de una presa puede significar un valor despreciable en otra de mayor tamaño.

Para solucionar estos dos desajustes conceptuales se propone que cada medida de longitud, superficie, volumen o n<sup>o</sup> de unidades se relativice, y la evaluación se haga en tanto por ciento del valor total o valor de referencia de la estructura afectada por el daño. Pudiéndose comparar, así, de forma fácil, unidades y tamaños diferentes de daño.

Para determinar el valor de referencia a partir del cual se puede relativizar una magnitud se escoge, para cada unidad de medida, la mayor magnitud del conjunto estructural afectado. Así, por ejemplo, en el caso de los estribos, que trabajan de forma desasociada uno de otro, la magnitud de referencia sólo toma en consideración las características geométricas del estribo afectado por el daño, no de los dos. En cambio, en el caso de que una presa tenga  $u$  compuertas inservibles de un total de  $z$  ( $u \leq z$ ), la extensión,

en tanto por uno, será  $u/z$ , porque todas las compuertas realizan la misma función y la afectación es a la capacidad total de desagüe de la presa.

Las magnitudes relativizadas (% de afectación) se dividen, como puede verse en la tabla 5.3, en 5 intervalos a los que se asocian de 1 a 5 puntos. En dicha tabla se considera que el daño es:

- *Total* si el porcentaje de afectación es superior al 75%.
- *General* si el porcentaje de afectación se encuentra entre el 50 y el 75%.
- *Media* si el porcentaje de afectación se encuentra entre el 25 y el 50%.
- *Local* si el porcentaje de afectación se encuentra entre el 10 y el 25%.
- *Muy local* si el porcentaje de afectación es inferior al 10%.

Variable	Atributo	Puntos
<i>Extensión del Daño (ExD)</i>	Total	5
	General	4
	Media	3
	Local	2
	Muy Local	1

Tabla 5.3.- Atributos que definen la variable Extensión del Daño

Es evidente que las medidas no se pueden tomar con exactitud, en la mayoría de situaciones ni tan siquiera es necesario hacerlo. El ojo humano es suficientemente preciso como para poder clasificar la extensión según los 5 grupos presentados en el párrafo anterior sin que exista el riesgo de una equivocación significativa. En el caso de que algún técnico tenga dudas a la hora de hacer la asignación de puntos a un daño siempre se debe escoger la puntuación más alta entre las que se produzca la vacilación, dándose así prevalencia a la seguridad.

Puede darse el caso, también, de que algún elemento estructural se vea afectado por distintos signos de daño. Ante una situación de este tipo se debe escoger la magnitud que el técnico estime que mejor valora el estado general del elemento.

#### 5.3.4.- Evolución del daño (EvD)

La *Evolución del Daño (EvD)* estima la capacidad potencial que tiene el proceso patológico de incrementar, en un futuro próximo, el daño en la estructura. A mayor posibilidad de evolución, mayor riesgo, y por tanto mayor puntuación se asigna a esta variable, tal y como puede verse en la tabla 5.4.

Variable	Atributo	Puntos
<i>Evolución del Daño</i> (EvD)	Inicial o Activa	5
	Latente	3
	Inactiva	1

Tabla 5.4.- Atributos que definen la variable *Evolución del Daño*

Existen dos tipos de proceso patológicos, aquellos que son causados por agentes/eventos puntuales y aquellos que se dilatan en el tiempo. Los procesos físicos de manifestación de un daño diferido tienen una serie de secuencias que se ordenan en el tiempo a modo de cuatro fases temporales: la *inicial*, la *activa*, la *latente* o de *estabilización* y la *inactiva* o *final*. Las dos primeras se dan en cualquier proceso, en cambio, las dos últimas pueden darse en el orden presentado o bien darse una sin necesidad de que aparezca la otra.

La fase *inicial* identifica el momento en que el daño aparece (que no quiere decir que sea el instante en que se detecta). En este instante es difícil prever cual va a ser la evolución, por lo que para evitar situaciones comprometidas se debe tener máximo cuidado y posiblemente plantear algún tipo de actuación preventiva.

La fase *activa*, la segunda en orden cronológico, que puede ser más o menos longeva, se refiere al periodo de tiempo donde el daño se mantiene dinámico y por tanto va en aumento ( $>> 0$ ). En esta fase crece el deterioro de la estructura y son cada vez más recurrentes los signos manifiestos del daño. La fase *activa* puede dar lugar a dos tipos distintos de evolución. El daño puede entrar en una fase *latente* o en una fase *inactiva*, derivada ésta última de un desenlace rápido del proceso producido por el fallo de la estructura.

La fase *latente* comprende el periodo de tiempo en el que el daño se mantiene constante con una evolución muy baja, tendiendo a cero ( $\approx 0$ ). Se debe tener en cuenta que el causante del daño no ha sido eliminado, por lo que no se puede asegurar que éste no repunte en algún momento. La fase *latente* o de *estabilización* es un periodo que, de existir, siempre se extiende hasta que se constata el final del proceso. Aunque es un periodo que puede alargarse de forma indefinida.

El final de un proceso diferido puede acontecer por dos razones, que de igual forma dan lugar a la fase *inactiva*, donde la evolución del daño es nula ( $=0$ ). El primer escenario es que el proceso dañino ocasione la rotura de la estructura; en este caso es necesario actuar para repararla, aunque ya no pueda empeorarse la situación. El segundo escenario se da en el caso de que el gestor haya ya actuado eliminando el problema y en consecuencia no se debe priorizar una actuación que ya se realizó.

Si el causante del daño es un proceso puntual que no se dilata en el tiempo, una vez establecidas las deficiencias estructurales acontecidas estas no deberían evolucionar, aunque sí deben ser corregidas para paliar las secuelas que hayan podido quedar. De

nuevo, en esta situación, se considera que el daño se encuentra en fase *inactiva* al entenderse que su evolución también va a ser nula (=0).

Tal y como se ha visto, en esta variable se distinguen 3 tipos de situaciones a las que se puede llegar de múltiples maneras: aquellas en que es posible que el daño evolucione, a las que se asignan 5 puntos; aquellas en las que con certeza el daño no va a evolucionar, a las que se asigna 1 punto; y aquellas que se sitúa en un estadio intermedio (se les asignan 3 puntos), que incluiría todas las situaciones donde la evolución tiende a ser inexistente, aunque no es nula. No se considera, en este caso, la posibilidad de otorgar 2 o 4 puntos.

La descripción detallada que se realiza de cada una de las variables permite que distintos técnicos evalúen una misma patología con un valor muy similar, lo que denota la robustez del sistema. A modo de resumen, y con el objetivo de facilitar una visualización conjunta, se presenta la tabla 5.5, con todas las variables y los atributos que conforman la Fase 1.

Variable	Atributo	Puntos	Variable	Atributo	Puntos
<i>Grado de Daño (GrD)</i>	Muy Grave	5	<i>Extensión del Daño (ExD)</i>	Total	5
	Grave	4		General	4
	Medio	3		Media	3
	Bueno	2		Local	2
	Muy Bueno	1		Muy Local	1
<i>Ubicación del Daño (UbD)</i>	Crítica	5	<i>Evolución Temporal del Daño (EvD)</i>	Inicial o Activa	5
	Principal	3		Latente	3
	Secundaria	1		Inactiva	1

Tabla 5.5.- Variables que definen el DñE con sus respectivas puntuaciones

### 5.3.5.- Cuantificación DñE

Como ya se ha explicado en el inicio de este apartado, el objetivo final es la cuantificación del *Daño Estructural* (DñE). Se considera que la forma más razonable de relacionar las distintas variables es mediante un sumatorio, en el que estas deben ser ponderadas según su importancia relativa. Así, la expresión genérica que permite cuantificar el DñE es la que se presenta en la ecuación 5.5:

$$DñE = \alpha \cdot GrD + \beta \cdot UbD + \eta \cdot ExD + \nu \cdot EvD \quad [\text{ec. 5.5}]$$

donde:  $\alpha, \beta, \eta, \nu$  son coeficientes que representan el peso de cada variable de forma tal que todos sumados son igual a 1



### 5.3.5.1.- Cálculo de los coeficientes $\alpha$ $\beta$ $\mu$ $\nu$

Para determinar el valor de los coeficientes que acompañan a las variables, y que por tanto definen indirectamente su peso relativo en el valor final del DñE, se utiliza el Analytic Hierarchy Process (AHP) desarrollado en Saaty (1980). A tal fin, deben realizarse las siguientes operaciones:

- Construcción de la matriz de comparación pareada
- Comprobar la consistencia de los juicios
- Cálculo de pesos

#### Construcción de la matriz de comparación pareada

Mediante esta matriz se establece la comparación entre las distintas variables que intervienen en la decisión. Se utiliza una escala de números, oscilante entre 1 y 9, ver tabla 5.6 (Saaty 2008), que indica cuantas veces un elemento es más importante sobre otro elemento.

Escala numérica	Definición	Descripción
1	Igual importancia	<i>Los dos elementos contribuyen igualmente al objetivo</i>
3	Moderadamente más importante	<i>La experiencia y el juicio se inclinan a favor de un elemento sobre el otro</i>
5	Fuertemente más importante	<i>La importancia de un elemento sobre el otro queda considerablemente reforzada</i>
7	Muy fuerte o de importancia demostrada	<i>Un elemento es favorecido con mucha fuerza sobre otro, con un dominio muy evidente</i>
9	Extremadamente más importante	<i>La supremacía de un elemento sobre otro es máxima</i>
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes	<i>Se usan como compromiso entre dos juicios</i>

*Tabla 5.6.- La escala fundamental de los números absolutos (Saaty, 2008)*

Esta es la fase o etapa más delicada del proceso, en ella debe determinarse la importancia relativa de una variable respecto a las otras tres. Es la única fase que puede admitir cierta discusión, pues las otras son desarrollos matemáticos. Para garantizar el éxito del proceso y para reducir al máximo el grado de subjetividad, se invitó a diversos expertos del sector público y privado. De su aportación surgió la matriz de comparación pareada  $M$  que se presenta en la tabla 5.7.

	GrD	UbD	ExD	EvD
GrD	1	1	4	2
UbD	1	1	4	2
ExD	1/4	1/4	1	1/2
EvD	1/2	1/2	2	1

Tabla 5.7.- Matriz de comparación pareada,  $M$

La matriz, que debe leerse de la siguiente manera: la variable de la primera columna es  $x$  veces más importante que la variable de columna  $j$ , fue considerada válida por amplio consenso. De ella se desprende que los técnicos consideran que GrD y UbD son las variables más importantes, y que por tanto son estas las que deben marcar de forma más significativa la evaluación del daño. La variable menos importante, según este método, es la que toma en consideración la extensión de daño, ExD.

#### Comprobar la consistencia de los juicios

Si las relaciones determinadas son totalmente consistentes, la matriz de comparación de pares no solamente es una matriz recíproca sino que es una matriz de rango 1 al ser todas las filas linealmente dependientes de la primera. Estas matrices solamente tienen un valor propio distinto de cero, que es igual al número de filas y columnas de la matriz, en este caso sería  $\lambda=4$ .

Es fácil observar que las relaciones establecidas en la tabla 5.7 son consistentes. La primera fila y la segunda son iguales. Además, la tercera se obtiene de multiplicar la primera por 1/4, y la última de multiplicar la primera por 1/2.

De todas formas, si se desconfía de este razonamiento se pueden calcular los valores propios mediante los métodos clásicos, tal y como se hace a continuación:

$$|M - Id \cdot \lambda| = 0 \quad [\text{ec. 5.6}]$$

$$\begin{bmatrix} 1 - \lambda & 1 & 4 & 2 \\ 1 & 1 - \lambda & 4 & 2 \\ 1/4 & 1/4 & 1 - \lambda & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & 2 & 1 - \lambda \end{bmatrix} = 0 \quad [\text{ec. 5.7}]$$

$$\lambda_1 = 4; \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 0 \quad [\text{ec. 5.8}]$$

Con lo que queda validado que la matriz de comparación pareada es totalmente consistente.

### Cálculo de pesos

La última etapa de este proceso consiste en calcular los pesos relativos de cada una de las variables. A tal fin, se deben realizar las tareas que ahora se enumeran y desarrollan:

- obtener una matriz normalizada  $L$  (dividiendo cada elemento de la columna  $i$  de la matriz  $M$  por la suma de los elementos de dicha columna)

$$L = \begin{bmatrix} 0,36 & 0,35 & 0,36 & 0,36 \\ 0,36 & 0,35 & 0,36 & 0,36 \\ 0,09 & 0,12 & 0,09 & 0,09 \\ 0,18 & 0,18 & 0,18 & 0,18 \end{bmatrix} = 0 \quad [\text{ec. 5.9}]$$

- estimar el vector de pesos  $P'$  calculando el promedio de cada fila de la matriz normalizada.

$$P' = \begin{bmatrix} \alpha' \\ \beta' \\ \eta' \\ \nu' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,36 \\ 0,36 \\ 0,09 \\ 0,18 \end{bmatrix} \quad [\text{ec. 5.10}]$$

Con el objetivo de utilizar coeficientes que sean fáciles de recordar por aquellos que deben realizar el cálculo del DñE, y ante la evidencia que el valor de éste no se verá prácticamente alterado, se propone un vector  $P$  (ecuación 5.11) que surge de la aproximación de  $P'$  a la media décima (0,05).

$$P = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \eta \\ \nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,35 \\ 0,35 \\ 0,10 \\ 0,20 \end{bmatrix} \quad [\text{ec. 5.11}]$$

En el caso de que se hubiera decidido modificar la matriz  $M$ , cambiando el valor 4 por un valor 3 (única duda existente en la elaboración de la matriz de comparación), se hubiera obtenido el mismo valor del vector  $P$ , una vez realizada la misma aproximación.

#### 5.3.5.2.- Análisis de sensibilidad

El valor del DñE se obtiene a partir de la puntuación de cuatro variables que se ponderan con los coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $\nu$  surgidos de la matriz comparación pareada  $M$ . Este apartado pretende analizar la capacidad que tienen estos coeficientes de alterar el valor de DñE en el caso que se modifique su importancia relativa.

En este análisis se considera que las cuatro variables pueden ser puntuadas de 1 a 5 puntos. Es cierto que UbD y EvD en principio solamente pueden ser puntuadas con 1, 3 y 5 puntos, pero en caso de duda se admiten valores de 2 y 4 puntos, por lo que se ha preferido ampliar el rango de posibilidades. Por tanto, existe la posibilidad de permutar 5

elementos cogiéndolos de 4 en 4 ( $P_{5,4}=5^4$ ), lo que significa que pueden hallarse 625 valores <sup>3</sup> de DñE para cada combinación de coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $\nu$ .

El estudio de sensibilidad que se propone consiste en analizar 3 nuevas combinaciones de valores para los coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $\nu$ . La forma más razonable de obtenerlas es modificando ligeramente el vector  $P$  de referencia, respetando, eso sí, la esencia establecida por la matriz  $M$ .

La modificación que se aplica a cada una de los coeficientes es 0,05, que representa una tasa de modificación mínima del 14,2% de los coeficientes. Este es un valor más que significativo para un estudio de esta índole. Las tres variantes consideradas a partir de este criterio son las que se presentan en la tabla 5.8.

	$\alpha$	$\beta$	$\eta$	$\nu$
<b>Coefficientes <math>P</math></b>	<b>0,35</b>	<b>0,35</b>	<b>0,10</b>	<b>0,20</b>
<b>Variante 1 (<math>V_1</math>)</b>	0,40	0,40	0,05	0,15
<b>Variante 2 (<math>V_2</math>)</b>	0,40	0,35	0,10	0,15
<b>Variante 3 (<math>V_3</math>)</b>	0,30	0,30	0,15	0,2

Tabla 5.8.- Valor de los coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $\nu$  en las variantes del análisis de sensibilidad

En la Variante 1 ( $V_1$ ) se refuerza la importancia de las variables GrD y UbD aumentando el valor de  $\alpha$  y  $\beta$  en 0,05 y, a su vez, reduciéndose en la misma cantidad el valor de los otros dos coeficientes. El valor de  $\eta=0,05$  se considera un límite. En el caso de plantearse un valor inferior sería conveniente eliminar el coeficiente y mantener únicamente tres variables para realizar la evaluación del DñE.

En la Variante 2 ( $V_2$ ) se prima la importancia de la variable GrD (el estudio sería idéntico en el caso de primar la variable UbD). Para conseguirlo se aumenta el valor de  $\alpha$  hasta alcanzar 0,40, y se reduce el valor de  $\nu$ , referente a EvD, hasta el valor de 0,15. Los valores de  $\beta$  y  $\eta$  se mantienen, en este caso, en 0,35 y 0,10.

La Variante 3 ( $V_3$ ) diluye la importancia de las variables GrD y UbD, reforzando la importancia de EvD y ExD. Esta es la alternativa que presenta unos pesos de los coeficientes más equilibrados.

Para analizar las alternativas se realizan dos tipos de estudios. En el primero se valora la diferencia entre el DñE obtenido con el vector  $P$  y el obtenido con la variante  $V_x$  en valor absoluto. La importancia relativa de esta variación depende del valor del propio DñE, a menor puntuación más significación tiene un incremento o decremento de su valor. Para tener en cuenta esta circunstancia se realiza un segundo estudio en el que se evalúa la variación del DñE en porcentaje (%).

<sup>3</sup> En el Anexo 5 se presentan todos los valores posibles de DñE y las diferencias existentes entre las diversas variantes.

### Variante 1

Si se comparan los 625 valores de DñE que se pueden obtener en  $V_1$  con su pares obtenidos del vector  $P$ , se observa que la mayor diferencia que existe es de 0,4 unidades (ver figura 5.6), que se repite en dos ocasiones, lo que significa que tienen una probabilidad de ocurrencia de 0,0032. La diferencia de 0,4 en valor absoluto entre  $P$  y  $V_1$  se obtiene cuando  $GrD=UbD=5$  y  $ExD=EvD=1$ ; y cuando  $GrD=UbD=1$  y  $ExD=EvD=5$ . La segunda máxima variación es de 0,35 puntos y se da en ocho ocasiones (probabilidad de ocurrencia de 0,0128). De todas formas, la variación media en valor absoluta es de 0,11 puntos, un valor poco significativo para este tipo de estudios.

En la figura 5.6 se generan 4 tipos distintos de ciclos. El más pequeño se da cada 5 números (casi imperceptible en el gráfico), ocasionado al cambiar la puntuación de la variable  $EvD$ . Este ciclo de 5 números se repite 5 veces desplazándose en altura a causa de la variación de la puntuación de la variable  $ExD$ , completando un ciclo de 25 números (marcado con un ovalo en el gráfico). Este ciclo de 25 números se repite 5 veces al cambiar la puntuación de la variable  $UbD$ , completando un ciclo de 125 números (marcado con un rectángulo en el gráfico). Finalmente, el cuarto ciclo es el que se genera al cambiar el valor de la variable  $GrD$ , que ocasiona que se repita 5 veces el ciclo de 125 números.

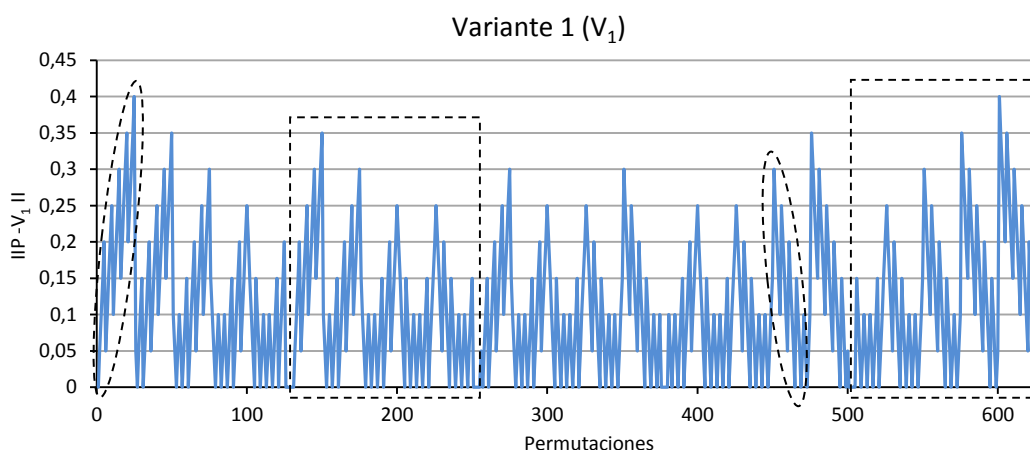


Figura 5.6.- Variación del valor del DñE

En la figura 5.7 se presenta un gráfico con la variación en porcentaje (%) del valor del DñE. La situación más extrema se da cuando  $GrD=UbD=1$  y  $ExD=EvD=5$ , pues se pasa de obtener un valor de  $DñE=2,2$  con el vector  $P$ , a obtener en  $V_1$  un valor de  $DñE=1,8$ , lo que representa una variación del 18,18%. El siguiente incremento más pronunciado es del 16,66%, que se presenta en dos ocasiones:  $GrD=UbD=1$ ,  $ExD=5$  y  $EvD=3$ ;  $GrD=UbD=1$ ,  $ExD=4$  y  $EvD=5$ . De este estudio se puede extraer que la variación media es del 4%, considerada no significativa en esta tipología de estudios.

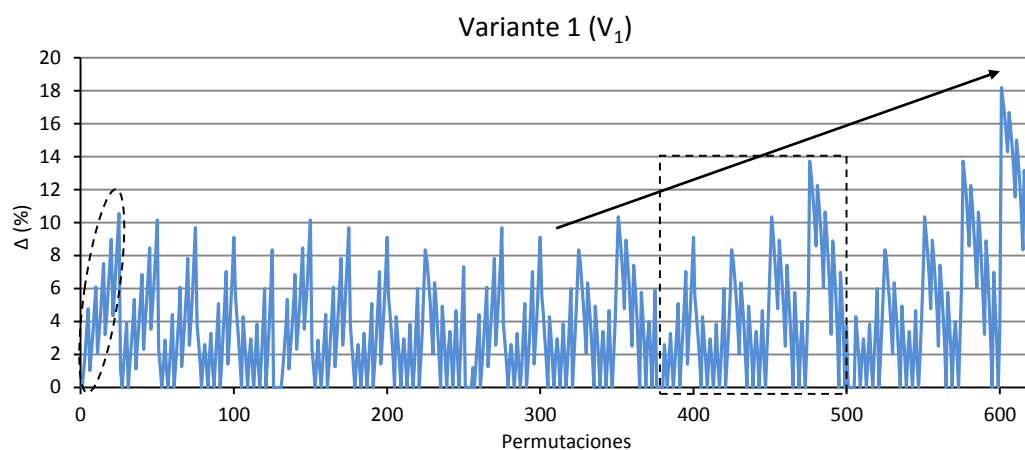


Figura 5.7.- Variación en % del valor del DñE

En la figura 5.7 también se presentan los 4 ciclos numéricos que aparecían en la gráfica 5.6. La tendencia de los ciclos de 25 números (marcados con un óvalo) cambia, como en el caso anterior, en la  $P_{313}$  (permutación intermedia), momento a partir del cual aumenta el valor del pico del ciclo de 25 números (señalado con una flecha ascendente), al ser más pequeño el valor de DñE.

### Variante 2

En esta variante, la máxima diferencia obtenida entre las puntuaciones del DñE calculadas a través del vector  $P$  y las calculadas a través de  $V_2$  en valor absoluto es 0,2 (ver figura 5.8). Una cifra que es exactamente la mitad de la calculada en el caso anterior. La gran diferencia es que ésta aparece en 50 de las 625 permutaciones, lo que significa una probabilidad de ocurrencia de 0,08. La segunda variación más significativa es de 0,15 unidades y aparece en 100 ocasiones. Aun así, la variación media en valor absoluto de esta alternativa, cifrada en 0,08 puntos, es ligeramente inferior a la de  $V_1$ .

Los valores de los coeficientes  $\beta$  y  $\eta$  son los mismos en el vector  $P$  y en la Variante 2. Esto hace que solamente puedan verse dos ciclos de valores. Uno es el ciclo de 5 números causado por la variación de la puntuación de EvD, que se repite 25 veces; el otro es el ciclo de 125 valores que se ocasiona al cambiar la puntuación de la variable GrD, asociada al coeficiente  $\alpha$ . En la figura 5.8 aparecen dos trazos discontinuos, un eje recto, situado en  $P_{313}$  que marca el eje de simetría, y uno curvo que marca la tendencia de los bloques de 125 números. Una tendencia marcada claramente por el eje de simetría.

En cuanto al análisis de la variación en porcentaje (ver figura 5.9), simplemente comentar que el valor máximo es del 11,11% que se obtiene para el caso en que  $GrD=Ubd=ExD=1$  y  $EvD=5$ , que significa que un valor de  $DñE=1,8$  se transforma en un valor de  $DñE=2$ . Aquí la variación media es del 2,8%, lo que tampoco representa un cambio significativo para la problemática tratada.

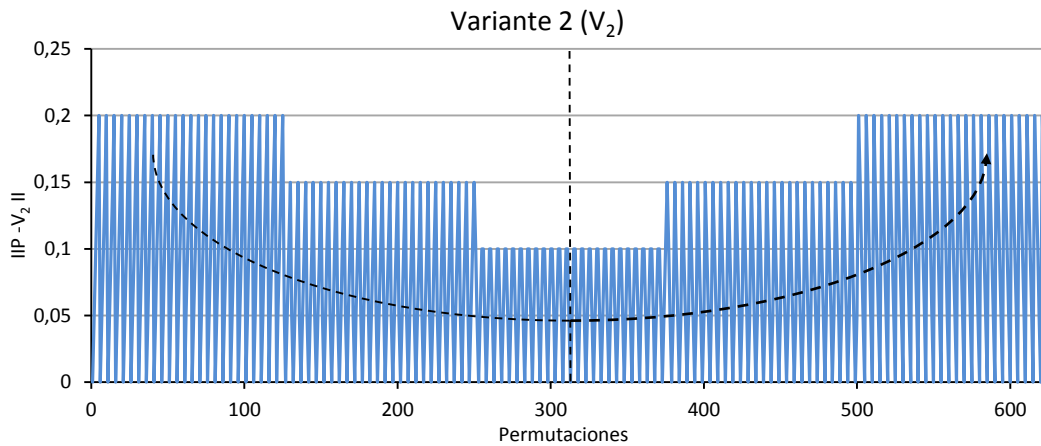


Figura 5.8.- Variación del valor del DñE

En la figura 5.9 también se presentan los 2 ciclos numéricos que aparecían en la gráfica 5.8. La tendencia de los ciclos de 5 números es ir aumentando su valor hasta que llega el cambio del valor del coeficiente GrD.

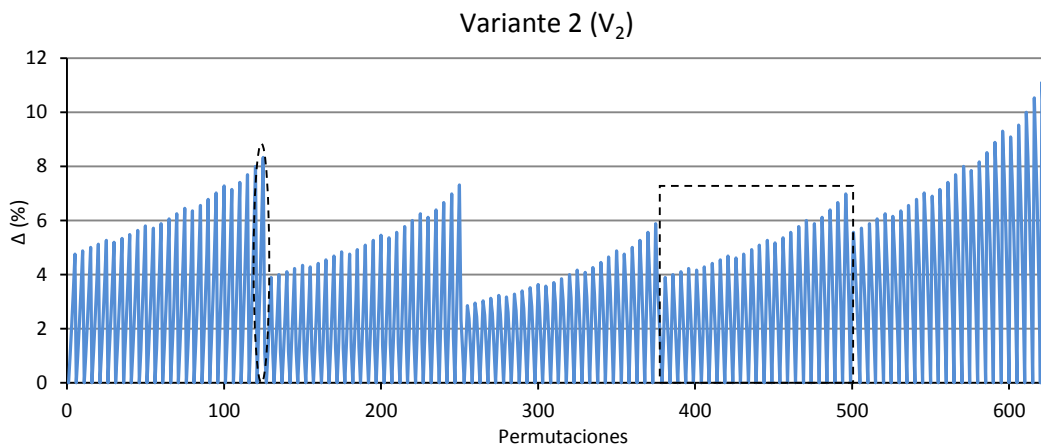


Figura 5.9.- Variación en % del valor del DñE

### Variante 3

Mediante esta combinación de coeficientes se obtienen unos valores de DñE que difieren de los obtenidos mediante las otras variantes aunque la diferencia en valor absoluto con los obtenidos a partir del vector  $P$  es exactamente la misma que la generada en la variante  $V_1$ . La única diferencia entre ambas es que el signo es contrario. Este hecho hace que todas las reflexiones planteadas para  $V_1$  sirvan para este caso de estudio.

### Análisis conjunto

A modo de resumen se adjunta la tabla 5.9. En cada fila se presenta la diferencia máxima en valor absoluto entre el vector  $P$  y la variante  $V_x$ , la diferencia media entre  $P$  y  $V_x$ , la diferencia máxima en porcentaje entre  $P$  y  $V_x$ , y finalmente la media de la variación en porcentaje entre  $P$  y  $V_x$ . Los valores que se muestran, comentados ya en sus respectivos

apartados, denotan que el valor del DñE no sufrirá grandes variaciones, si la variación de  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $\nu$  se realiza respetando la lógica impuesta en la matriz  $M$ .

	Máxima	Media	Máxima (%)	Media (%)
$\ P - V_1\ $	0,40	0,11	18,18	3,99
$\ P - V_2\ $	0,20	0,08	11,11	2,82
$\ P - V_3\ $	0,40	0,11	18,18	3,99

Tabla 5.9.- Análisis de sensibilidad

#### 5.3.5.3.- Formula final de cálculo del DñE

Después de todo el proceso realizado en este apartado se presenta la expresión (ecuación 5.5) que permite, para todo tipo de elemento estructural (ladera, compuerta, paramento, galería...) y de forma homogénea, evaluar el daño, es decir, permite valorar cómo éste puede afectar a la capacidad que tienen la estructura de garantizar las exigencias de seguridad y servicio durante su vida útil.

$$DñE = 0.35 \cdot GrD + 0.35 \cdot UbD + 0.10 \cdot ExD + 0.20 \cdot EvD \quad [\text{ec. 5.5}]$$

## 5.4.- FASE 2. ÍNDICE DE PRIORIZACIÓN EN LA GESTIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS (IPGOH)

La Fase 2 del modelo de decisión desarrolla el *Índice de Priorización en la Gestión de Obras Hidráulicas* (IPGOH). El IPGOH es un índice que realiza una evaluación determinista semicuantitativa del grado de sostenibilidad que aporta una actuación de mantenimiento que tiene como objetivo corregir el daño evaluado en la Fase 1. Cuanto mayor es el IPGOH más necesario es realizar la actuación de mantenimiento sugerida. Un planteamiento que surge del paradigma planteado tanto por ICOLD (2005) como por el Bureau of Reclamation y Army Corps of Engineers (2010) ante la necesidad de priorizar actuaciones en el ámbito de la explotación ordinaria de presas (ver §2.5).

El grado de sostenibilidad depende de las consecuencias sociales, ambientales y económicas que pueden derivarse del daño según sean las características de la estructura y del entorno. Por lo que este índice es función tanto del daño como de las consecuencias (ecuación 5.12). Las tipologías de daño consideradas pueden ocasionar perjuicios varios aunque normalmente no acarrear el colapso de la estructura (véanse todos los ejemplos presentados en el capítulo 3).

$$IPGOH = f(\text{Daño}, \text{Consecuencias}) \quad [\text{ec. 5.12}]$$

La evaluación se realiza a través de un árbol de decisión, ver figura 5.10, que estructura el pensamiento mediante tres requerimientos, de donde surgen unos criterios



que, a su vez, son los conceptos concretos que agrupan los indicadores. Estos últimos son las características tangibles que se pueden evaluar.

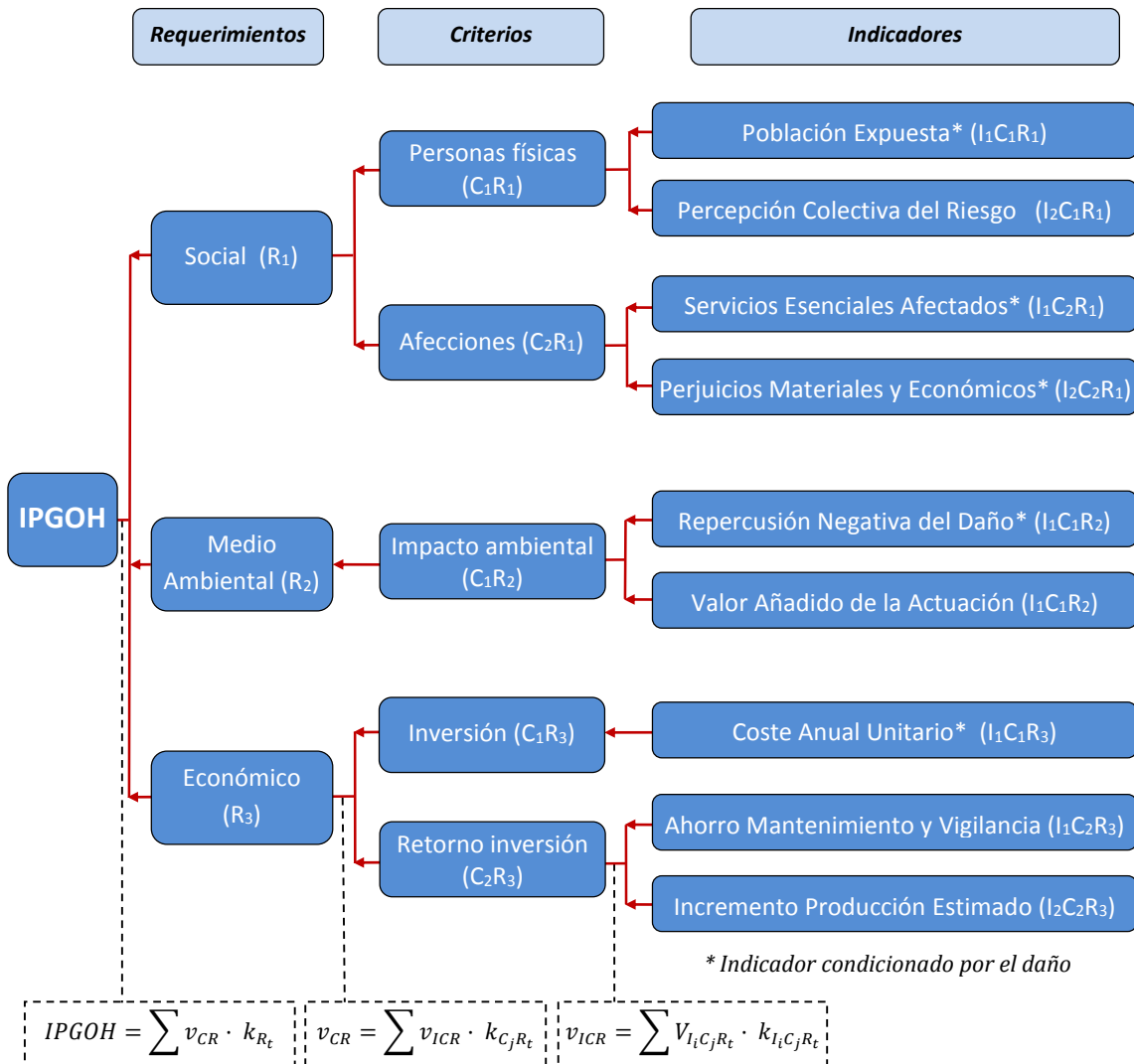


Figura 5.10.- Árbol de decisión para el cálculo del IPGOH

Los requerimientos, Ormazábal (2002), recogen toda posible entrada de la toma de decisión, ya se entienda como objetivo, necesidad o meta, condicionante tanto en lo relativo a los recursos como a las prestaciones buscadas. Dada su naturaleza, los requerimientos son de carácter general, permitiendo asignar a cada proyecto planos específicos de acuerdo a sus características y necesidades. En este caso son tres, los ejes conceptuales de la sostenibilidad:

- El *Requerimiento social* es el encargado de valorar los efectos que el daño puede generar en las personas, de forma directa o indirecta. Los perjuicios pueden ser de carácter físico, moral, material o empresarial. La principal voluntad de las entidades que gestionan obras hidráulicas es garantizar la seguridad de la población. La salud y el bienestar de las personas están por encima de cualquier otra consideración, de ahí que sea un elemento fundamental de la decisión. De este

requerimiento se desprenden dos criterios, *Personas Físicas y Afecciones*, que a su vez se dividen en dos indicadores.

- El *Requerimiento medio ambiental* evalúa tanto el impacto negativo que el daño puede ocasionar en el medio natural como los beneficios indirectos que puede aportar la actuación correctora. Aunque es un elemento importante de la decisión, no se debe olvidar que el mayor impacto que una obra hidráulica causa en el medio natural se debe a su construcción. Los proyectos de mantenimiento pueden tener cierta repercusión (positiva y/o negativa), aunque su trascendencia es incomparable a la de la fase de construcción. Aun así, se tiene en cuenta este requerimiento por la voluntad de los gestores de potenciar el cuidado del medio natural y de crear conciencia en la sociedad civil, especialmente entre su personal laboral. Este requerimiento está compuesto por un único indicador (*Impacto Ambiental*) que se ramifica en forma de dos indicadores que permiten evaluar las repercusiones de la actuación, sean positivas o negativas, sobre el medio natural.
- El *Requerimiento económico* evalúa la administración (consumo y obtención) de los recursos financieros necesarios para corregir el daño que presenta la estructura. Este requerimiento no pretende potenciar aquellas actuaciones que sirvan para aumentar los beneficios del gestor, simplemente pretende rentabilizar al máximo cada euro invertido a la hora de eliminar un daño estructural. Actualmente, solamente se puede asegurar la subsistencia de los entes gestores si se realiza una administración razonable de los recursos económicos. Si estos fueran ilimitados no sería necesario priorizar las inversiones de mantenimiento, simplemente se realizarían todas. Este requerimiento se divide en dos criterios, *Inversión y Retorno de la Inversión*, cuyo objetivo es valorar los beneficios económicos e intangibles que se derivan del gasto realizado.

El conjunto de indicadores presenta las propiedades que, según Keeney y Raiffa (1993), debe tener un modelo de ayuda a decisión, esto es: completo, operativo, disgregable, no redundante, y de mínimo tamaño.

Completo. El conjunto de indicadores es completo porque permite cumplir los objetivos del modelo, al medir el impacto que el daño puede generar en las personas, en el medio ambiente, y en las harcas de la empresa que gestiona la infraestructura.

Operativo. Cada uno de los indicadores, a través de sus variables, son fundamentales para tomar la decisión, tal y como se verá en el capítulo siguiente.

Disgregable. El árbol de decisión utiliza tres requerimientos y cinco criterios, una estructura que al descomponer la decisión ayuda a organizar el pensamiento.

No redundante. Los conceptos teóricos que guían la decisión se miden sólo una vez. Los indicadores son complementarios, pero no se repiten.

Mínimo tamaño. Veintisiete son las variables a medir, distribuidas en nueve indicadores. Este es un número pequeño. Así, los técnicos pueden completar el modelo para todas las alternativas, con rigor, pero sin excesivo trabajo y en poco tiempo.

El valor final del IPGOH de cada una de las actuaciones ( $A_x$ ) se obtiene gracias a un proceso ascendente de valoración de los indicadores ( $V_{I_i C_j R_t}(A_x)$ ) y ponderación de subniveles, integrando de forma eficaz el peso relativo de de indicadores ( $k_{I_i C_j R_t}$ ), criterios ( $k_{C_j R_t}$ ) y requerimientos ( $k_{R_t}$ ), según se muestra tanto en el árbol de decisión de la figura 5.10, como en la ecuación 5.13. Los pesos se obtienen de ajustar los valores obtenidos mediante el Analytic Hierchy Process (AHP) (Saaty 1980), el método más utilizado, a nivel individual, para desarrollar sistemas de ayuda a la decisión (Huang et al., 2011 y Kabir *et al.* 2013).

$$IPGOH(A_x) = \sum V_{I_i C_j R_t}(A_x) \cdot k_{I_i C_j R_t} \cdot k_{C_j R_t} \cdot k_{R_t} \quad [\text{ec. 5.13}]$$

donde: IPHOH( $A_x$ ) es el índice de priorización de la actuación x

$V_{I_i C_j R_t}(A_x)$  es el valor del indicador  $i$ ésimo de la actuación x

$k_{I_i C_j R_t}$  es el peso del indicador  $i$ ésimo

$k_{C_j R_t}$  es el peso del criterio  $j$ ésimo

$k_{R_t}$  es el peso del requerimiento  $t$ ésimo

Para desarrollar todo el proceso de evaluación, y sobre todo para obtener las puntuaciones de las variables definidas con atributos, es imprescindible el juicio ingenieril, entendido como la opinión de un profesional cualificado.

Gracias al IPGOH se pueden evaluar de forma ecuánime un número  $n$  de actuaciones, dándole a cada una de ellas un valor entre 0 (sin importancia) y 1 (muy importante), lo que permite realizar una ordenación cardinal de todas ellas y posteriormente priorizarlas.

La contribución a la sostenibilidad de las diferentes actuaciones evaluadas puede clasificarse de acuerdo con el IPGOH en los cinco niveles que se presentan en la tabla 5.10. El nivel A representa la máxima contribución a la sostenibilidad. Este es un sistema de clasificación muy intuitivo, que en otros ámbitos, ya ha sido aplicado por distintas instituciones internacionales como puede verse en ICE (2010) y ASCE (2013). Los intervalos son suficientemente representativos como para que no deba escogerse entre dos actuaciones que se encuentran en el mismo y cuya puntuación pueda diferir en pocas centésimas.

NIVEL A	NIVEL B	NIVEL C	NIVEL D	NIVEL E
$1 \geq IPGOH \geq 0,81$	$0,80 \geq IPGOH \geq 0,61$	$0,60 \geq IPGOH \geq 0,41$	$0,40 \geq IPGOH \geq 0,21$	$0,20 \geq IPGOH \geq 0$

Tabla 5.10.- Niveles de clasificación del IPGOH

Lo más probable es que las actuaciones evaluadas se sitúen entre los niveles B y D. Las actuaciones más necesarias (Nivel A) en muchos casos serán actuaciones de carácter urgente, que se realizarán sin programación previa y con presupuestos extraordinarios por lo que no llegarán a ser analizadas por esta herramienta de priorización. En el extremo opuesto, las actuaciones que contribuyen escasamente a la sostenibilidad (Nivel E) suelen ser descartadas por los propios técnicos que deberían proponerlas por lo que tampoco son analizadas por esta herramienta. Aun así, el IPGOH está capacitado para evaluar todo tipo de actuaciones, copando todo el abanico presente en la clasificación.



## CAPÍTULO 6

# COMPONENTES DEL ÁRBOL DE DECISIÓN

### 6.1.- INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se propuso el *Índice de Priorización en la Gestión de Obras Hidráulicas* (IPGOH) como herramienta metodológica para seleccionar, en la gestión de estructuras hidráulicas de hormigón, aquellas actuaciones de mantenimiento y conservación que aportan un mayor valor añadido desde la óptica de la sostenibilidad global. Aunque se presentó el árbol de decisión desarrollado (ver figura 6.1) para el cálculo del IPGOH con todos sus componentes, no se dio ningún tipo de detalle acerca del mismo. El presente capítulo, continuación natural del anterior, y perteneciente al mismo bloque de la tesis (§1.4), pretende paliar el déficit de información que se arrastra, objetivo que se consigue con la definición y justificación minuciosa de todos los criterios e indicadores que formar la estructura básica del árbol de decisión.

Para definir los 9 indicadores va a ser necesario establecer y caracterizar una serie de variables que son las que deberán cuantificar los técnicos cuando quieran conocer el IPGOH de una actuación. Del mismo modo que se hizo con la definición del DñE, se pretende que la descripción de las variables sea suficientemente detallada como para que la cuantificación que puedan realizar distintos técnicos de una misma actuación no registre diferencias significativas.

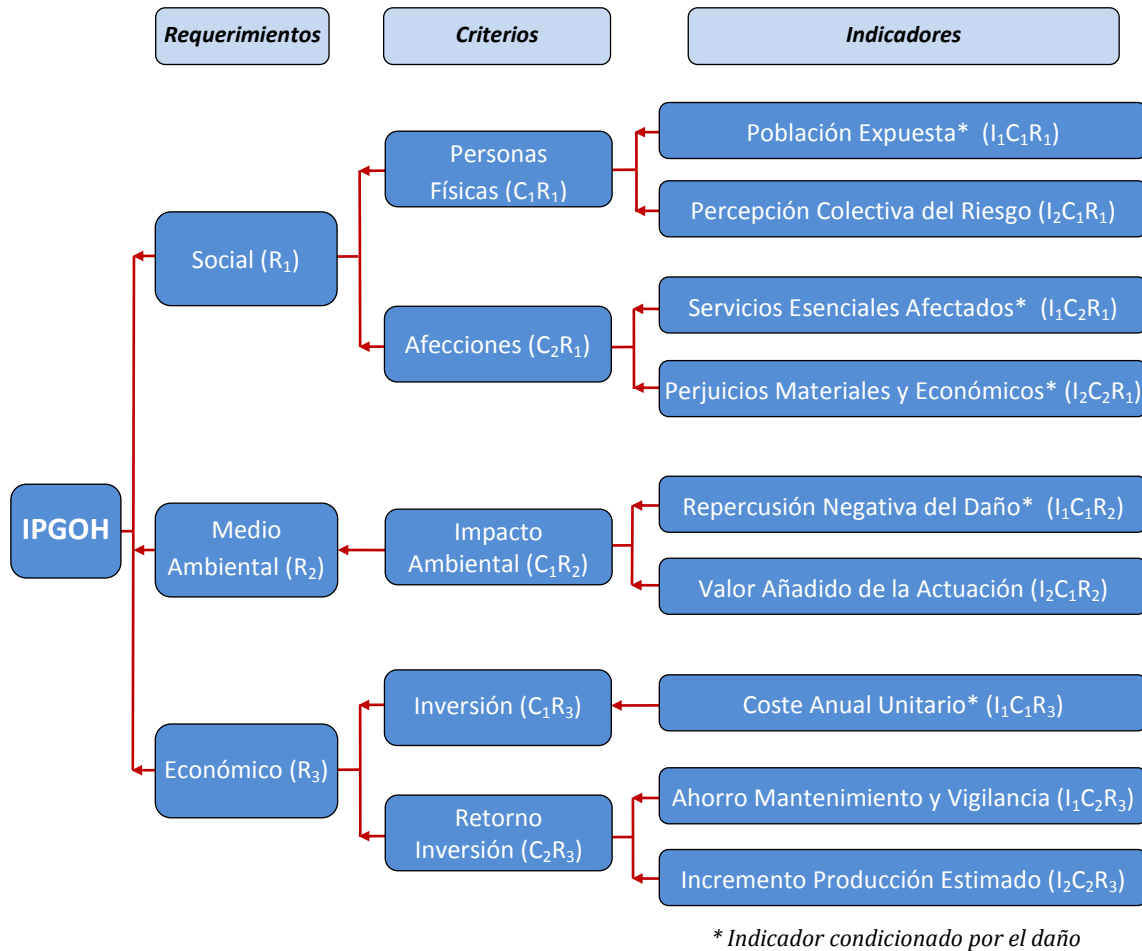


Figura 6.1.- Recordatorio árbol de decisión presentado en la figura 5.10

Una vez definidos todos sus componentes, el árbol debe ser siempre el mismo. Este se adapta a las preferencias y necesidades del decisor, modificando los pesos que se asignan a los elementos que lo conforman, tal y como se avanzó en el capítulo 2. Esta versatilidad genera que sea una herramienta de gran utilidad, al poder ser utilizada tanto por entidades privadas como por instituciones públicas, unas y otras con intereses distintos. La asignación de los pesos, eso sí, debe realizarse antes de determinar cuáles van a ser los casos de estudio, para no favorecer la arbitrariedad. En el capítulo 7 de este trabajo, donde se presenta una aplicación real de la metodología, se realizan dos asignaciones de pesos que dan respuesta, de forma separada, a las necesidades que tiene una empresa privada y una de la administración pública.

El presente capítulo se divide en tres grandes apartados, uno dedicado a cada uno de los requerimientos:

- Requerimiento Social (§6.2)
- Requerimiento Medio ambiental (§6.3)
- Requerimiento Económico (§6.4)

Los tres apartados presentan una estructura muy similar. Después de contextualizar cada requerimiento mediante su rama del árbol, se define un criterio, y se pasan a describir los indicadores que de éste se derivan. Finalizada esta tarea se pasa al siguiente criterio del mismo requerimiento repitiéndose el proceso.

La definición y caracterización de los indicadores se hace en todos los casos a través de los cuatro apartados siguientes:

- **Objetivo:** detalla cual es la finalidad que persigue cada uno de los indicadores.
- **Estrategia:** explicar porque se ha escogido ese indicador, contextualizándolo en la decisión.
- **Forma de medir:** define las variables utilizadas para el cálculo del indicador, presenta las tablas que permiten cuantificar las variables que se miden a partir de atributos y establece las expresiones que permiten calcular la puntuación del indicador.
- **Función de valor:** presenta la función de valor escogida, con su expresión, y el porqué de tal elección. Todas las funciones se basan en la ecuación 2.9, surgida del modelo MIVES.

## 6.2.- REQUERIMIENTO SOCIAL - R<sub>1</sub>

Este requerimiento se utiliza para evaluar cómo se ve afectada la sociedad por la disfunción aparecida en el complejo hidráulico. Se establecen dos criterios básicos: *Personas físicas* y *Afecciones* que a su vez se dividen en dos indicadores cada uno de ellos, tal y como se muestra en la tabla 6.1.

Requerimiento	Criterios	Indicadores
Social	Personas físicas	Población Expuesta (PoE)
		Percepción Colectiva del Riesgo (PCR)
	Afecciones	Servicios Esenciales Afectados (SEA)
		Perjuicios Materiales y Económicos (PME)

Tabla 6.1.- Rama del requerimiento Social

Se han escogido estos dos criterios porque a través de ellos se puede valorar tanto el perjuicio directo que puede padecer una persona a causa del daño (Criterio *Personas físicas*), como el perjuicio indirecto que puede alterar la actividad ordinaria de personas o entidades (Criterio *Afecciones*).



### 6.3.1.- Personas físicas - C<sub>1</sub>.R<sub>1</sub>

El concepto de *Persona física* es jurídico, y su definición fundamental corrió a cargo de los juristas del Imperio Romano. En términos generales se refiere a todo aquel ser de la especie humana que es susceptible de contraer obligaciones y adquirir derechos.

Se ha escogido este concepto porque define de forma acertada la esencia del criterio, cuyo único objetivo es promover el cuidado de la salud y el bienestar de la población, teniendo en cuenta los perjuicios físicos y psicológicos que pueden padecer a causa del daño. El criterio se divide en dos indicadores: *Población Expuesta* y *Percepción Colectiva del Riesgo*.

#### 6.2.1.1.- Población Expuesta (PoE) - I<sub>1</sub>.C<sub>1</sub>.R<sub>1</sub>

##### Objetivo

El indicador *Población Expuesta* (PoE) evalúa la afectación física que puede padecer la población humana como consecuencia directa de la aparición de un daño en el elemento estructural que se está analizando.

En este indicador se considera todo tipo de persona que pueda tener relación con la estructura, desde el vecino al excursionista, pasando incluso por los trabajadores de la empresa responsable de la explotación que se encargan de realizar las tareas de vigilancia, mantenimiento y conservación de la estructura.

##### Estrategia

La población humana es un grupo de personas que ocupan un área geográfica determinada, en este caso, el área geográfica colindante a la estructura que es objeto de estudio. El sustantivo grupo y el verbo ocupar son esenciales para la concepción del indicador.

Un grupo de personas puede estar compuesto por un número diverso de integrantes. Cuanto mayor es el número que forma una población más delicada es la situación, al ser mayor el número de posibles afectados como consecuencia de la manifestación de un daño.

Por otro lado, existen diversas maneras de ocupar un territorio. Cuanto más tiempo pasa una persona en la estructura o cerca de ella, más fácil es que el daño pueda causarle algún tipo de perjuicio. Un grupo de personas que viven permanentemente cerca de la presa corren mayor riesgo que un grupo de excursionistas o cazadores que pasean por la zona de forma ocasional.

Por tanto, la vulnerabilidad de la población es mayor cuanto más grande es el número de personas que la forman y cuanto más tiempo pasan éstas en los alrededores de la estructura.

Forma de medición

Se propone medir este indicador mediante dos variables que tienen en cuenta tanto el *Número de Personas Afectadas* (NPA) como la *Tipología de Ocupación del Espacio* (TOE):

- El *Número de Personas Afectadas* (NPA) cuantifica la población que, ocupando el espacio colindante al elemento estructural, puede verse afectada por el daño detectado en la estructura.
- La *Tipología de Ocupación del Espacio* (TOE) valora el tiempo de permanencia de la gente en la zona colindante a la estructura según la actividad que realizan en ese espacio.

El *Número de Personas Afectadas* (NPA) divide la población en cinco intervalos en función de la cantidad de personas que pueden resultar damnificadas, tal y como se puede ver en la tabla 6.2. Cada grupo tiene asociada una puntuación, cuanto mayor es el número de posibles afectados mayor es la puntuación que se le asigna a la variable.

Variable	Intervalo	Puntos
Número Personas Afectadas (NPA)	$n^{\circ} > 300$	5
	$30 < n^{\circ} \leq 300$	4
	$6 < n^{\circ} \leq 30$	3
	$1 < n^{\circ} \leq 6$	2
	$n^{\circ} \leq 1$	1

Tabla 6.2.- Puntuación asignada a los atributos de la variable NPA

Los intervalos de la tabla 6.2 los estableció el Washington State-Department of Ecology (2007), en base a los trabajos de Army Corps of Engineers (1979) y Bureau of Reclamation (1988) considerados aún de referencia en seguridad de presas. La clasificación de Washington State-Department of Ecology (2007) considera que los tres intervalos definidos a partir de 6 habitantes afectados merecen el mismo nivel de valoración (Alto). En la tabla 6.2, ante la evidencia que no es lo mismo una decena de afectados que un centenar, se han establecido tres intervalos para evaluar los grupos que superen las 6 personas. La única voluntad es crear una mayor discriminación a la hora de poder realizar la priorización.

En cualquier caso, esta clasificación hace referencia no sólo al valor económico de la vida humana sino también al valor mediático de la seguridad ante un daño.

La *Tipología de Ocupación del Espacio* (TOE) se divide, asimismo, en cinco grupos, tal y como se muestra en la tabla 6.3. Esta es una clasificación que establece Dirección General de Obras Hidráulicas (2001) aunque fuera concebida y utilizada para definir el

tipo de sistema de aviso a la población en el caso de producirse una emergencia en una presa.

Variable	Atributo	Puntos
Tipología Ocupación Espacio (TOE)	Núcleos urbanos de población	5
	Población en viviendas dispersas	4
	Áreas de ocupación permanente pero diferentes a viviendas habituales	3
	Áreas de ocupación ocasional	2
	Áreas sin ocupación	1

Tabla 6.3.- Puntuación asignada a los atributos de la variable TOE

Para facilitar al técnico su labor, se han desarrollado una serie de definiciones que tratan de explicar cada una de las distintas tipologías de ocupación del espacio presentadas en la tabla anterior.

Núcleos urbanos de población: espacios donde existe una agrupación de construcciones en uso destinadas a la vivienda que constituyen por su proximidad una malla relacional. Se considera núcleo urbano a un conjunto de edificaciones igual o superior a 10, pudiendo ser inferior a 10, siempre que la población residente supere los 50 habitantes, según establece el Instituto Nacional de Estadística.

Población en viviendas dispersas: espacios donde se encuentran construcciones aisladas en uso destinadas a la vivienda (menos de 10 edificaciones con menos de 50 personas residentes).

Áreas de ocupación permanentes pero diferentes a viviendas habituales: espacios donde se ubica alguna o algunas construcciones destinadas a servicios o a usos industriales, distintos a viviendas. En este grupo quedan clasificadas las distintas zonas de la propia presa que a causa de un daño pueden ser consideradas peligrosas para los trabajadores que se encargan del mantenimiento y conservación de la estructura.

Áreas de ocupación ocasional: espacios naturales o edificados donde de forma eventual se puede encontrar alguna persona, tendencialmente excursionistas, ciclistas o derivados que siguen rutas ordinarias ya adaptadas para este tipo de usos.

Áreas sin ocupación: espacios no edificados en los que es realmente muy difícil encontrar alguna persona.

En este caso, la asignación de puntos a la variable TOE se ha hecho considerando el tiempo de uso del espacio, es decir, según el grado de permanencia (ver tabla 6.3). Los espacios destinados a viviendas se han dividido en dos, pues se ha considerado que una mayor concentración de gente en la zona merecía mayor puntuación. Se asigna una puntuación de 1 a *Áreas sin ocupación* porque es una manera de permanecer del lado de la

seguridad, pues que sea difícil encontrar a alguien no significa que por alguna extraña circunstancia ese alguien no pueda encontrarse en ese espacio.

La puntuación final del indicador *Población Expuesta (PoE)* se obtiene a partir de la ecuación 6.1, sumatorio ponderado de las variables independientes NPA y TOE. La puntuación de la variable NPA se multiplica por 0,8, mientras que la de la variable TOE se multiplica por 0,2. La relación entre NPA y TOE se establece por comparación directa, teniendo en cuenta que el número de personas es el concepto que tiene mayor importancia en la toma de la decisión. Son las personas quienes desarrollan la actividad evaluada de “ocupar un espacio”, y, en un caso extremo, no hay cosa más preciada que la vida humana.

$$PoE = (0,8 NPA + 0,2 TOE) \cdot DñE \quad [\text{ec. 6.1}]$$

Las consecuencias que puede sufrir la población van a ser mayores cuanto mayor sea el nivel de daño que presenta la estructura. Para reflejar esta evidencia, este indicador se ve condicionado por el DñE, que amplifica la puntuación de PoE según establece la ecuación anterior.

#### Función de Valor

La función de valor que se propone para este indicador es creciente porque a medida que aumenta la puntuación más necesario es realizar la actuación. En este caso se utiliza la función “S” que se muestra en la figura 6.2, con el punto de mínima satisfacción situado en (1 ; 0) y el de máxima satisfacción en (25 ; 1).

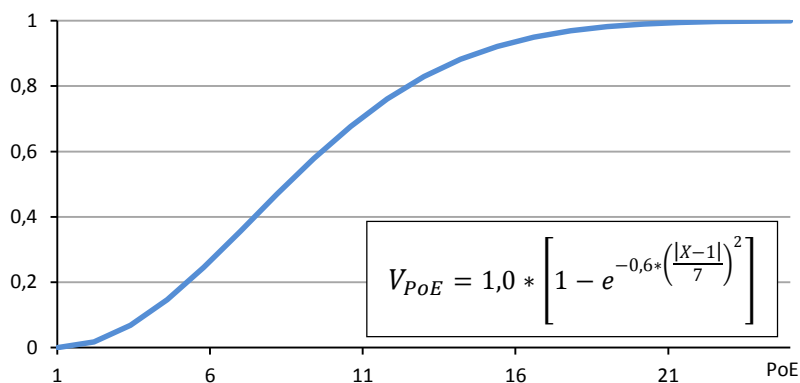


Figura 6.2.- Función de valor indicador Población Expuesta

La mayoría de actuaciones a priorizar van a obtener una puntuación que en principio debe situarse en la zona centro del intervalo considerado. La función “S”, de forma suave en la zona de los extremos, permite realizar una discriminación razonable entre las puntuaciones más probables del PoE.

La suavidad de la “S” es más acentuada en el margen derecho de la función porque se considera que toda evaluación que sobrepase los 15 puntos ya merece, por su gravedad, un valor próximo a 1. El 15 es una puntuación considerada límite porque para alcanzarse

es necesario obtener un valor medio de prácticamente 4 puntos en las tres variables que influyen en la puntuación del indicador (NPA, TOE y DñE). Teniendo en cuenta que se valoran los daños físicos a las personas, se entiende que 4 puntos, en una escala de 5, ya es un valor suficientemente significativo como para considerarlo límite.

#### 6.2.1.2.- Percepción Colectiva del Riesgo (PCR) - I<sub>2</sub>.C<sub>1</sub>.R<sub>1</sub>

##### Objetivo

El indicador *Percepción Colectiva del Riesgo* (PCR) evalúa la interpretación de las sensaciones de riesgo que puede experimentar la población de una determinada zona como consecuencia de la convivencia con una estructura hidráulica que no se encuentra en perfecto estado. El objetivo es que a la hora de priorizar se tengan también en cuenta aquellas actuaciones que corrigen daños que pueden causar un malestar (psicológico, que no físico) entre la población y que no serían consideradas en un análisis puramente técnico.

Aunque algunos daños menores no pongan en entredicho la seguridad de la estructura, y por tanto estos no requieran de una actuación de reparación, los gestores se “ven obligados” a actuar. Año tras año, se ejecutan actuaciones de “maquillaje” que solamente pretenden tranquilizar a una opinión pública que normalmente no dispone de los conocimientos técnicos necesarios para realizar un juicio objetivo y razonable del daño y de sus consecuencias. Se debe tener en cuenta que una corriente de opinión contraria al ente gestor puede ser altamente perjudicial para sus legítimos intereses comerciales.

##### Estrategia

En los últimos decenios, a medida que el sistema democrático se ha ido consolidando, el peso político, social y económico de los ciudadanos ha crecido de forma exponencial. Este cambio ha suscitado la necesidad de introducir a los sujetos pasivos (la población) en el centro de atención, como elementos claves, en los análisis estratégicos, también en el análisis de riesgos. Si se hace distinción entre el individuo y la sociedad, se observa que el primero es hedonista en su selección de *modus vivendi*, buscando en primer lugar el placer; en cambio la sociedad tiende a buscar primeramente la seguridad. Así, los ciudadanos desearían vivir con riesgo cero, aunque la sensatez humana hace entenderles que deben convivir sin problemas con riesgos en su vida cotidiana.

La imposibilidad de alcanzar el riesgo cero da lugar al concepto de riesgo aceptable como elemento de juicio en la evaluación del riesgo. Según Salmon *et al.* (1996) el riesgo aceptable es aquel con el que la gente está dispuesta a convivir para asegurar ciertos beneficios netos, en la confianza de que está siendo adecuadamente controlado, mantenido bajo revisión y además reducido cómo y cuándo es posible.

El grado de tolerabilidad de una sociedad se modifica con el acontecer de los sucesos, a medida que transcurre el tiempo. Si un acontecimiento puntual o diferido gesta una percepción colectiva de que el riesgo es claro, se puede afirmar, por el *Teorema de*

*Thomas*<sup>1</sup>, que, a partir de ese momento, las consecuencias de ese riesgo son para la gente una realidad evidente por lo que vivirán con la certeza de que sus vidas están en peligro. El factor que en mayor medida hará variar el grado de tolerabilidad es la manifestación paladina del daño.

La historia es otro factor que también puede afectar notablemente a la sensibilidad de la población civil. Ésta es tan importante que no sólo condiciona a un pueblo, puede condicionar la sensibilidad ante el riesgo incluso de un Estado. Las roturas de las presas de Vega de Tera (España) y Malpasset (Francia) en 1959, propiciaron que el Gobierno Español creara, dando respuesta a una creciente demanda de seguridad, el Servicio de Vigilancia de Presas que en 1962 publicó la Instrucción de presas. Todo esto hizo que se realizaran trabajos complementarios en muchas presas; unos de los ejemplos es el caso de Mequinenza, donde se mejoró la estabilidad de la presa y se incrementó la instrumentación de forma notable, entre los años 1964-1969 (Aguado *et al.* 2011).

Esta percepción de la realidad ocasiona dos problemas: se genera, en primer lugar, un estado de malestar en la población que, como es lógico, nadie desea; y el segundo, que es consecuencia del primero, es que se daña la imagen corporativa de la empresa propietaria de la estructura, pues la gente hace a ésta responsable de las angustias con las que deben pasar los días.

#### Forma de medición

Se propone medir este indicador mediante dos variables que tienen en cuenta tanto el *Daño Observado por los Ciudadanos* (DOC) como el *Historial de Incidentes* (HIC):

- El *Daño Observado por los Ciudadanos* (DOC) cuantifica la importancia del daño según su tipología a partir del criterio de población no experta.
- El *Historial de Incidentes* (HIC) toma en consideración los problemas graves acontecidos en presas, que pueden haber acabado en catástrofe o que han obligado a realizar actuaciones considerables para evitarlas, y, que en consecuencia han sido de dominio público.

Se planteó la posibilidad de incorporar dos variables más al estudio: la extensión y la evolución del daño. Finalmente se decidió no tenerlas en cuenta por motivos diferentes. En referencia a la extensión, se determinó que la población considera de la misma importancia todo aquello que tenga una extensión suficiente como para ser visto y que por tanto el juicio se realiza, no por la magnitud, sino por la tipología del daño. Por otro lado, comentar que la evolución del daño va ligada a un fenómeno temporal, y el tiempo se considera en el historial de incidentes, entendiéndose que condiciona de manera más significativa a las personas.

---

<sup>1</sup> *El teorema de Thomas* es un principio fundamental en sociología formulado por William I. Thomas en su libro "Los niños en América: problemas conductuales y programas" publicado en 1928, que dice: *Si las personas definen las situaciones como reales, éstas son reales en sus consecuencias.*

La variable *Daño Observado por los Ciudadanos (DOC)* se evalúa a partir de la clasificación que se establece en la tabla 6.4, donde se puntúan cinco tipologías genéricas de daño que puede apreciar un ciudadano no experto en una visita ordinaria/turística a la estructura. El valor que se asocia a cada tipo de daño no tiene ninguna relación con el perjuicio que este puede ocasionar. El valor solamente quiere representar el grado de importancia que la población le da a ese daño.

Variable	Tipología del daño	Puntos
Daño Observado Ciudadano (DOC <sub>i</sub> )	Rotura	5
	Filtraciones	4
	Fisuras	3
	Manchas-Humedades	2
	Movimientos	1

Tabla 6.4.- Puntuación asignada a los atributos de la variable DOC

**Rotura:** Fragmentación de un elemento estructural que provoca que éste deje de ser apto para su uso al alcanzar un estado de ruina parcial o total causada por una tensión que sobrepasa su capacidad resistente. Afectará sobre todo a elementos de hormigón, aunque también deben considerarse laderas y elementos metálicos que desarrollen funciones estructurales.

**Filtraciones:** Flujo de agua que pasa a través de pequeñas aberturas que pueden existir, sobretodo, en el cuerpo de presa o en los estribos. Denotan la pérdida de estanquidad de la estructura.

**Fisuras:** Defecto estructural consistente en una abertura o corte profundo en un cuerpo sólido que no llega a fragmentarlo en elementos independientes. A través de ellas se dan las filtraciones. Son propias de los elementos de hormigón y de las laderas.

**Manchas-Humedades:** Marcas de agua (con restos químicos) que impregnan el cuerpo de presa, principalmente la zona del paramento aguas abajo, ensuciándolo. No se le presupone ningún tipo de repercusión estructural.

**Movimientos:** Cambio de posición relativo entre dos elementos de la estructura sin que estos puedan ocasionar la rotura de ningún elemento estructural, en cuyo caso se les daría consideración de rotura. Se consideran aquí movimientos de barandillas, raíles, bloques, etc.

Podría darse el caso que algún tipo de daño aparezca en zonas que no son visibles para la población (ejemplo: fisuras en galerías). Cuando un individuo no puede ver lo que sucede, el miedo a que ocurra cualquier cosa siempre es mayor, porque la voz popular tiende a amplificar los posibles riesgos. Así, en los casos en que exista la posibilidad que la población sea informada de la presencia de este daño de forma indirecta, mediante

filtraciones o especulaciones, se debe sumar un punto extra a la tipología de daño detectada.

Con frecuencia en una misma estructura pueden presentarse, a la vez, más de una de las tipologías de daño enumeradas en la tabla 6.4. Para poder tomar en consideración esta posibilidad, la puntuación de DOC se desglosa de acuerdo a la ecuación 6.2, un sumatorio con coeficientes de ponderación. Cuantos más son los daños que padece la presa más en entredicho queda su durabilidad futura.

$$DOC = 1,5 \cdot DOC_1 + 1,35 \cdot DOC_2 + DOC_3 \quad [\text{ec. 6.2}]$$

donde:  $DOC_1$ ,  $DOC_2$ ,  $DOC_3$  son las tres tipologías de daño que a ojos del ciudadano se presentan en una superficie mayor (de más grande a más pequeña).

Los coeficientes de mayoración utilizados son los propuestos en la EHE'08 para ponderar las acciones el cálculo del estado límite último. Se entiende que considerar tres tipologías es suficiente porque la población difícilmente va a realizar una inspección lo suficientemente detallada como para percatarse de todas las manifestaciones presentes. En el caso que solamente existan dos tipologías de daño, se considerará  $DOC_3=0$ , y si solamente existe una,  $DOC_2=0$  y  $DOC_3=0$ .

La variable *Historial de Incidentes (Hic)* valora la historia reciente de incidentes en presa, tal y como se ha comentado. Esto puede hacerse desde dos vertientes: la temporal, entendida como el tiempo transcurrido desde el último incidente; y la espacial, entendida como la proximidad geográfica existente entre la estructura y la localización de un incidente.

En este caso se ha decidido utilizar un análisis espacial, considerado más significativo, y se ha fijado un margen temporal máximo de 25 años. Nótese que cuánto más cerca geográficamente de una presa se haya dado un incidente, mayor es la preocupación de la población. Por esta razón, como se puede ver en la tabla 6.5, se realiza una zonificación geográfica en cinco grupos, donde se puntúa la variable Hic en función de la proximidad existente entre la presa y el incidente histórico.

Variable	Atributo	Puntos
Historial de Incidentes (Hic)	En la misma estructura	5
	En zona colindante (misma comarca)	4
	A nivel provincial	3
	A nivel regional	2
	A nivel estatal	1

Tabla 6.5.- Puntuación asignada a los atributos de la variable Hic

La opinión reservada que la sociedad tiene acerca de las presas se suaviza y se diluye con el paso de los años. De todas formas, los desastres puntuales ocasionados por la



ruptura de una de estas estructuras tienden a alimentar la inseguridad de las personas. Para tomar en consideración esta realidad, si se ha dado algún incidente importante, donde haya habido muertos o heridos graves en el último año (sea donde sea), se debe sumar 1 punto al valor de H1c preestablecido, siendo 5 su valor máximo.

La puntuación final del indicador *Percepción de Riesgo Colectivo (PRC)* se obtiene del sumatorio de las variables DOC e H1c según se establece la ecuación 6.3.

$$PCR = DOC + H1c \quad [\text{ec. 6.3}]$$

Aunque de la expresión anterior no se desprenda, el mayor peso de la decisión recae sobre la variable DOC que por su definición puede alcanzar un valor máximo de 15.9 puntos, mientras que H1c solamente puede alcanzar los 5. Es lógico que DOC asuma un papel preponderante al ser la variable que refleja la realidad existente en la presa a ojos de la población, mientras que H1c solamente es una magnitud de apoyo que no tendría sentido considerar si la presa se encontrara en perfecto estado.

La puntuación de este indicador no se ve afectada por el coeficiente *DñE* porque en la definición de las variables ya se han tenido en cuenta los signos físicos que presenta la estructura.

#### Función de Valor

La función de valor que se propone para este indicador es creciente porque a medida que aumenta la puntuación más desgastada queda la imagen de la compañía y, por tanto, más necesario es realizar la actuación. En este caso, se utiliza la función "S" que se muestra en la figura 6.3, con el punto de mínima satisfacción situado en (2,5 ; 0) y el de máxima satisfacción en (20,9 ; 1). El objetivo es restar importancia a las puntuaciones extremas, al considerarse que se darán en pocas ocasiones.

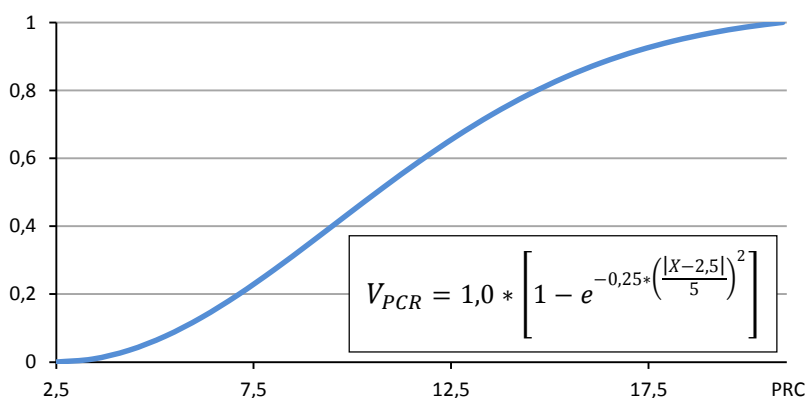


Figura 6.3.- Función de valor indicador Percepción Colectiva del Riesgo

Toda función "S" creciente tiene en su arranque una parte cóncava, delimitada en este caso por un punto de inflexión en abscisas bajo, situado en la puntuación de 5. La misión que tiene este tramo de la función es evitar que manifestaciones no significativas o puntuales de daño puedan obtener valores del indicador elevados, lo que podría ocasionar

que condicionaran de forma excesiva la decisión. El tramo convexo de la función se alarga en abscisas desde los 5 hasta los 20,9 puntos. Se asigna un valor muy cercano a 1 a toda actuación que sobrepase los 17,9 puntos. Aunque teóricamente PCR pueda llegar hasta 20,9 puntos, es muy difícil que se superen estos 17,9 si se tiene en cuenta que la puntuación Hlc tendencialmente será baja ( $\leq 2$ ) al ser muy pocos los casos en que han aparecido problemas graves en presas españolas.

### 6.2.2.- Afecciones - C<sub>2</sub>.R<sub>1</sub>

En distintas circunstancias la manifestación de un daño conlleva una serie de perjuicios que indirectamente pueden alterar el desarrollo de la vida cotidiana de la población residente en los alrededores del conjunto presa-embalse. Para valorarlo, el presente criterio se divide en dos indicadores: *Servicios Esenciales Afectados* y *Perjuicios Materiales y Económicos*.

#### 6.2.2.1.- Servicios Esenciales Afectados (SEA) - I<sub>1</sub>.C<sub>2</sub>.R<sub>1</sub>

##### Objetivo

El indicador *Servicios Esenciales Afectados* (SEA) tiene por objetivo evaluar cómo puede verse reducida la prestación de servicios esenciales por la aparición de un daño en una estructura. Aunque los servicios valorados no sean responsabilidad de la compañía hidroeléctrica, ésta puede ser la responsable de su interrupción.

##### Estrategia

Según la Dirección General de Obras Hidráulicas (1997) se entienden como servicios esenciales aquellos que son indispensables para el desarrollo de las actividades humanas y económicas normales del conjunto de la población, siempre que esta sea igual o superior a 10.000 habitantes. El mismo documento establece que los servicios esenciales que deben considerarse son, al menos, los vinculados a los siguientes sistemas: abastecimiento y saneamiento, sanitario, suministro de energía, comunicaciones y transportes.

Todos estos servicios se prestan gracias a la existencia y soporte de un sistema de infraestructuras. El gestor de una obra hidráulica debe procurar que el daño que afecta a la estructura no comprometa la capacidad de funcionamiento de estas infraestructuras. En el caso de no poderse evitar la interrupción del servicio se debe procurar que el tiempo existente entre que se produce el fallo y el restablecimiento del servicio sea el menor posible.

##### Forma de medir

Para evaluar el nivel de afectación, y ante la certeza de que la falta de cualquiera de los servicios antes mencionados reviste la misma gravedad, se propone medir las variables *Alcance Territorial de la Interrupción* (ATI) y *Tiempo de Interrupción del Servicio* (tIS):

- El *Alcance Territorial de la Interrupción (ATI)* toma en consideración la magnitud del espacio físico que se ve afectado de forma directa o indirecta por el suceso. La evaluación se realiza a través de la trascendencia de la/s infraestructura/s afectada/s. Cuanto mayor es el territorio al que ésta sirve, a priori, más población afectada, y como es natural, más grave es la situación.
- El *Tiempo de Interrupción del Servicio (tIS)* valora la duración de la interrupción.

La variable *Alcance Territorial de la Interrupción (ATI)* divide las infraestructuras afectadas en cinco grupos, tal y como se puede ver en la tabla 6.6. A mayor alcance, más puntuación se asigna a la variable. En el caso de que un mismo daño pueda afectar a infraestructuras clasificadas con distintos alcances, la puntuación que se debe considerar es la mayor posible.

Variable	Atributo	Afectados potenciales	Puntos
Alcance Territorial Interrupción (ATI)	Nacional	afectados > 1 millón	5
	Regional	100.000 < afectados ≤ 1 millón	4
	Comarcal	10.000 < afectados ≤ 100.000	3
	Local	1.000 < afectados ≤ 10.000	2
	Alcance menor	afectados ≤ 1.000	1

Tabla 6.6.- Puntuación asignada a los atributos de la variable ATI

**Nacional:** La infraestructura afectada sirve a una parte importante del país (a diferentes comunidades autónomas). Por ejemplo, pueden quedar encuadradas en esta definición las centrales nucleares, autopistas, autovías estatales o las líneas de trenes de alta velocidad.

**Regional:** La infraestructura afectada se utiliza para prestar servicio a un espacio significativo de una comunidad autónoma o una de sus grandes ciudades. Por ejemplo, pueden quedar encuadradas en esta definición las carreteras nacionales o las líneas de ferrocarril de vía ancha.

**Comarcal:** La infraestructura afectada sirve a una parte significativa de la población de una comarca o a su capital. Se clasifican aquí, por ejemplo, las carreteras secundarias de 1er nivel, las líneas de ferrocarril de vía estrecha o repetidores de señal de radio.

**Local:** La infraestructura afectada sirve a una pequeña comunidad que puede, por norma general, encontrar alternativas al servicio. Por ejemplo, pueden quedar encuadradas en esta definición las carreteras secundarias de 2º ó 3er nivel.

**Alcance menor:** La incidencia no afecta a infraestructuras que presten los servicios considerados como esenciales vistos con anterioridad.

La mayoría de ejemplos presentados en las definiciones de los alcances territoriales hacen referencia al sistema de transportes que, por norma general, es el más afectado cuando aparece un problema en una presa. Como puede verse, la trascendencia de la afección no se valora en metros lineales, la importancia se valora en función del tipo de vía. En este caso la clasificación de la red de carreteras se ha hecho en base a la Ley de Carreteras 25/1988 del gobierno de España.

Puede darse el caso que alguna infraestructura con un eminente carácter local sirva a un gran número de personas, por la simple razón de que esté relacionada con alguna gran capital o con una comarca muy poblada. Para tener en cuenta esta posibilidad, la tabla 6.6 incorpora una columna que considera los afectados potenciales para definir cada atributo. Este concepto solamente puede utilizarse para que la variable ATI gane puntuación. Así, por ejemplo, si una carretera comarcal usada potencialmente por 200.000 personas pudiese quedar afectada por un daño, ATI sería evaluada con 4 puntos, y no con los 3 que le corresponderían si no se utilizara el número potencial de afectados.

La variable *tiempo de Interrupción del Servicio (tIS)*, ante la imposibilidad de definir cantidades exactas de tiempo, establece unos intervalos numéricos para determinar de forma aproximada la duración de la afectación. Tal y como se muestra en la tabla 6.7, cuanto más dura la interrupción mayor es la puntuación asociada a esta variable.

Variable	Tiempo Interrupción	Puntos
Tiempo Interrupción Servicio (tIS)	Indefinida (>2 días)	5
	(12 h < t < 48 h)	4
	6 h < t < 12 h	3
	1 h < t < 6 h	2
	Puntual (< 1 h)	1

Tabla 6.7.- Puntuación asignada a la variable tIS

La puntuación final del indicador Servicios Esenciales Afectados se obtiene del producto de las variables ATI, tIS y DñE, según la ecuación 6.4. Se realiza el producto porque ATI y tIS son variables independientes, cuya magnitud e importancia es más significativa a mayor grado de daño.

$$SEA = (ATI \cdot tIS) \cdot DñE \quad [\text{ec. 6.4}]$$

#### Función de Valor

La función de valor que se propone para este indicador es creciente porque a medida que aumenta la puntuación más necesario es realizar la actuación. En este caso se utiliza la función convexa que se muestra en la figura 6.4, con el punto de mínima satisfacción situado en (1 ; 0) y el de máxima satisfacción en (125 ; 1).

Se ha escogido esta función porque permite dar relevancia a la falta de cualquier servicio, por pequeña que sea la región afectada y por poco que dure la interrupción. Además, es una función altamente discriminante entre aquellas cuantificaciones que oscilan entre 1 y 45 puntos, rango en el que se va a mover SEA por norma general. Se debe tener en cuenta que va a ser difícil que las variables ATI y tIS superen simultáneamente los 3 puntos.

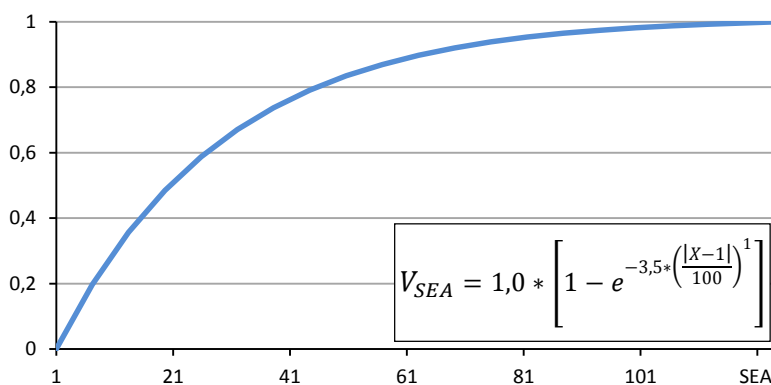


Figura 6.4.- Función de valor del indicador Servicios Esenciales Afectados

#### 6.2.2.1.- Perjuicios Materiales y Económicos (PME) - I<sub>2</sub>.C<sub>2</sub>.R<sub>1</sub>

##### Objetivo

Cualquier ente, público o privado, que tenga intereses en el entorno de la presa que presenta daños puede ver como se reduce el valor de aquello que era su propiedad o derecho como consecuencia de los daños aparecidos, ocasionándole un detrimento material y/o económico.

El indicador *Perjuicios Materiales y Económicos* (PME) tiene por objetivo determinar las propiedades que pueden sufrir daños materiales o pérdidas económicas, ya sean de forma directa (destrucción de elementos) o indirecta (reducción de la producción o imposibilidad de explotación), como consecuencia de la aparición de daños en la estructura.

##### Estrategia

La presencia de un daño en la presa puede alterar tanto su función principal, el almacenamiento de agua, como todas las actividades que de ella se derivan: abastecimiento humano<sup>2</sup>, control de avenidas, derivación, abastecimiento de industrias, producción energética, riego, pesca y recreo, según indica la Dirección General del Agua (2006).

<sup>2</sup> La falta de abastecimiento a la población humana no se considera en este indicador. Al tratarse de un servicio esencial se tiene en cuenta en el indicador anterior.

Sin ser necesario que se dé un desastre, la inadecuada retención del agua, o la incapacidad para regular una avenida puede generar aguas abajo el deterioro físico de bienes patrimoniales (casas, almacenes... por ligeras inundaciones), materias primas o productos varios (frutas, hortalizas...), alterando la actividad humana y económica. En esta misma línea, la incapacidad de servir agua o energía a una industria, o de abastecer de agua de riego a una explotación agraria puede provocar que se reduzca involuntariamente una actividad económica causando perjuicio a los empresarios.

Similar es el caso de la pesca y el recreo. Aunque solamente existe un perjuicio material o económico si se impide la actividad de alguna concesión autorizada a explotar las aguas del embalse, considerándose, a efectos de este análisis, la empresa concesionaria como si de una industria se tratase.

### Forma de medición

Este indicador propone evaluar los perjuicios materiales y económicos en función de la cantidad (en número o superficie) de propiedades que pueden verse afectadas por el daño, por el hecho de encontrarse en la zona de influencia de la presa.

Teniendo en cuenta los trabajos de la Dirección General de Obras Hidráulicas (1997) y del Washington State-Department of Ecology (2007), las distintas tipologías de propiedades que pueden quedar afectadas son:

- *Viviendas (V)*: espacios cubiertos y cerrados, construidos y habilitados para ser habitados por personas que se encuentran en territorio urbano.
- *Instalaciones industriales, ganaderas y propiedades rústicas (I)*: instalaciones vinculadas a actividades económicas de índole diversa como pueden ser la transformación de materias primas en productos elaborados o semielaborados o el manejo de animales con fines productivos. También quedan clasificadas en este grupo las edificaciones situadas en terrenos no urbanos.
- *Cultivos de secano (S)*: explotaciones agrarias en las que la aportación de agua depende exclusivamente de las precipitaciones atmosféricas.
- *Cultivos de regadío (R)*: explotaciones agrarias que han sido efectivamente regadas durante la siembra o desarrollo del producto. Su rendimiento es superior al de los cultivos de secano.

Nótese que no se valoran los daños que pueden ocasionarse en las infraestructuras de transporte. Este tipo de afectación ya se ha tenido en cuenta en el indicador anterior, al considerarse que su misión es dar un servicio público de interés general.

En función de la cantidad de propiedades afectadas, se asocia a cada tipología una puntuación que puede ser 1, 3 ó 5, según los intervalos establecidos en la tabla 6.8. Como en los indicadores anteriores, a mayores consecuencias, más puntuación asignada. Los

intervalos definidos en la tabla para puntuar la afectación a *industrias, ganaderías y propiedades rústicas, cultivos de secano y regadío* corresponden a los establecidos por la Dirección General de Obras Hidráulicas (1997), añadiéndole solamente un valor numérico al atributo conceptual utilizado para valorar cada intervalo. Las *viviendas*, cuyos daños aparecían evaluados en cinco grupos en Washington State-Department of Ecology (2007), se han reagrupado en tres para ajustar su puntuación a la del resto de elementos.

Propiedades (variable)		Daños Materiales/Económicos		
		Muy Importantes	Importantes	Moderados
Edificaciones (número)	Viviendas (V)	$n^{\circ} > 100$	$100 > n^{\circ} > 10$	$10 > n^{\circ}$
	Industrias, ganaderías y propiedades rústicas (I)	$n^{\circ} > 50$	$50 > n^{\circ} > 10$	$10 > n^{\circ}$
Cultivos (superficie)	Secano (S)	Sup. $> 10.000 \text{ hm}^2$	$3.000 \text{ hm}^2 < \text{Sup.} < 10.000 \text{ hm}^2$	Sup. $< 3.000 \text{ hm}^2$
	Regadío (R)	Sup. $> 5.000 \text{ hm}^2$	$1.000 \text{ hm}^2 < \text{Sup.} < 5.000 \text{ hm}^2$	Sup. $< 1.000 \text{ hm}^2$
<b>Puntuación</b>		<b>5</b>	<b>3</b>	<b>1</b>

Tabla 6.8.- Puntuación asignada a la variable PME

Ante un mismo problema, los daños materiales y económicos que se pueden ocasionar en una instalación industrial o en una instalación ganadera (dónde incluso podría perder la vida el ganado) son superiores (aunque sólo sea por la extensión) que aquellos que pueden darse en una vivienda, de ahí que los intervalos establecidos para este tipo de edificaciones sean con límites superiores a los establecidos para el grupo compuesto por industrias, ganaderías y propiedades rústicas.

La puntuación final del indicador *Perjuicios Materiales y Económicas (PME)* se obtiene mediante la ecuación 6.5, sumatorio de las puntuaciones asignadas a cada tipología de instalación, cuyo valor es multiplicado por valor del DñE. Se añade el coeficiente DñE porque cuanto mayor sea el daño en la estructura más fácil es que se generen pérdidas en las instalaciones de la zona.

$$PME = (V + I + S + R) \cdot DñE \quad [\text{ec. 6.5}]$$

#### Función de Valor

La función de valor que se propone para este indicador es creciente porque a medida que aumenta la puntuación más necesario es realizar la actuación. En este caso se utiliza la función lineal que se muestra en la figura 6.5, con el punto de mínima satisfacción situado en (4 ; 0) y el de máxima satisfacción en (100 ; 1).

Se ha escogido una función lineal porque la necesidad de actuar aumenta gradualmente con el número de puntos asignados al indicador *PME*. Cuantos más sean los

bienes afectados, en peor lugar queda la compañía y más esfuerzo deberá realizar para repararlos o restituirlos.

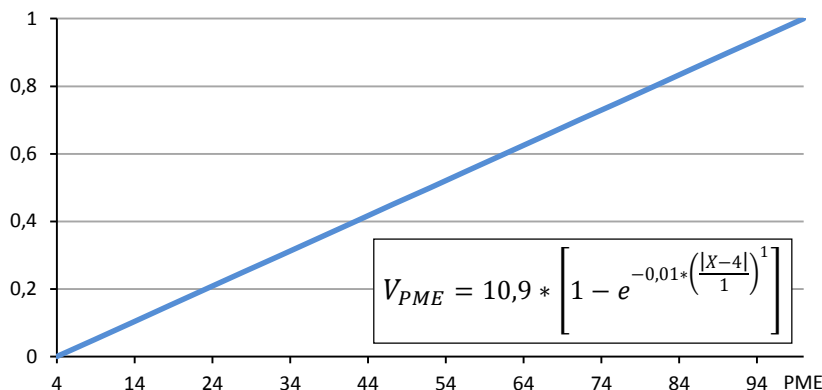


Figura 6.5.- Función de valor del indicador Perjuicios Materiales y Económicos

### 6.3.- REQUERIMIENTO MEDIO AMBIENTAL - R<sub>2</sub>

Este requerimiento, como ya se explicó, se utiliza para evaluar los posibles efectos generados sobre el medio ambiente como consecuencia de una modificación no prevista en el entorno natural. A tal fin se establece un único criterio, *Impacto ambiental*, que se divide en dos indicadores, tal y como se muestra en la tabla 6.9.

Requerimiento	Criterios	Indicadores
Medio ambiental	Impacto ambiental	Repercusión Negativa del Daño (RND)
		Valor Añadido Actuación (VAA)

Tabla 6.9.- Rama del requerimiento Medio ambiental

#### 6.3.1.- Impacto Ambiental - C<sub>1</sub>.R<sub>2</sub>

Este criterio pretende evaluar las consecuencias negativas y positivas de carácter presumible que pueden derivarse, tanto de la presencia del daño como de las medidas que se tomen para corregirlo en cualquier ambiente físico (agua, suelo, paisaje, etc.) o biótico (fauna, flora, biota acuática, etc.). Para realizar esta tarea se proponen los indicadores *Repercusión Negativa del Daño (RND)* y *Valor Añadido de la Actuación (VAA)*:

- El indicador *Repercusión Negativa del Daño (RND)* valora los efectos que podría causar el daño en caso de no repararse.
- El indicador *Valor Añadido de la Actuación (VAA)* valora el provecho indirecto que podría obtenerse de la actuación.



### Estrategia

Teniendo en cuenta que los dos indicadores que conforman este criterio tienen la misma misión, para simplificar el trabajo se propone establecer una estrategia única para ambos y evaluarlos con las mismas cuatro variables: *Intensidad del Impacto* (InI), *Extensión del Impacto* (ExI), *Duración del Impacto* (DuI) y *Tipología del Espacio Natural* (TEN).

- La *Intensidad del Impacto* (InI) evalúa el grado de incidencia de la acción sobre la calidad ambiental.
- La *Extensión del Impacto* (ExI) evalúa el área de influencia teórica de la afectación, es decir, la cantidad de naturaleza afectada en relación al conjunto que conforma el entorno de la estructura.
- La *Duración del Impacto* (DuI) evalúa el espacio de tiempo en que puede permanecer activo el impacto.
- La *Tipología de Espacio Natural* (TEN) evalúa la relevancia del territorio afectado según la protección que tiene por el hecho de contener sistemas o elementos naturales representativos, frágiles, amenazados o de especial interés ecológico, paisajístico, científico o educativo.

Las tres primeras variables que se proponen surgen del estudio y síntesis de los métodos presentados en ICOLD (1980), Arboleda (1994), Gómez Orea (1988 y 2003) y Conesa (2009). La última, en cambio, proviene de la legislación vigente española en materia de impacto ambiental.

La *Intensidad del Impacto* (InI) solamente establece, de acuerdo con Gómez Orea (1988), tres categorías para clasificar la potencia del impacto: alta, media y baja, tal y como puede verse en la tabla 6.10. Cuanto mayor es la modificación del medio natural más puntuación se asigna a esta variable.

Variable	Atributo	Definición	Puntos
<i>Intensidad del Impacto</i> (InI)	Alta	Afectación muy significativa (incluso total) de cualquier unidad natural	5
	Media	Afectación que ocasiona unas repercusiones que están comprendidas en las categorías de alta y baja	3
	Baja	Afectación mínima del medio natural, aunque no del todo despreciable	1

Tabla 6.10.- Puntuación asignada a los atributos de la variable InI

A modo de ejemplo, la interrupción total del caudal ecológico por una disfunción del desagüe de fondo presenta un impacto de intensidad total (alta) ya que se imposibilita el desarrollo de la vida aguas abajo de la presa. Por el contrario, una disfunción en la toma

de agua en una altura determinada presenta una intensidad baja, a lo sumo media, ya que el vertido no se realiza según las condiciones previstas, pero en ningún caso se paraliza la salida de agua del embalse.

La *Extensión del Impacto (ExI)* se evalúa, de acuerdo con Arboleda (1994) y Conesa (2009), con los intervalos que se presentan en la tabla 6.11, donde a mayor dominio de la afectación, más puntuación se asigna a la variable.

Variable	Atributo	%	Puntos
<i>Extensión del Impacto (ExI)</i>	Muy grande	> 80%	5
	Grande	60 < % < 80	4
	Media	40 < % < 60	3
	Pequeña	20 < % < 40	2
	Muy pequeña	< 20%	1

Tabla 6.11.- Puntuación asignada a los atributos de la variable ExI (Arboleda, 1994)

La *Duración del Impacto (Dul)* se evalúa según los intervalos que se presentan en la tabla 6.12, establecidos por Arboleda (1994). Para su concreción, se entiende que el impacto está activo desde el momento que se empiezan a manifestar las primeras consecuencias ambientales hasta que duren los efectos sobre el medio natural.

Variable	Atributo	Tiempo	Puntos
<i>Duración del Impacto (Dul)</i>	Muy larga o permanente	> 10 años	5
	Larga	7 < años < 10	4
	Media	4 < años < 7	3
	Corta	1 < años < 4	2
	Muy corta	< 1 año	1

Tabla 6.12.- Puntuación asignada a los atributos de la variable Dul (Arboleda, 1994)

La variable *Tipología de Espacio Natural (TEN)* se basa en la ley 42,2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad para clasificar y puntuar, según puede verse en la tabla 6.13, los distintos tipos de espacios naturales. Aunque el texto no es del todo claro, de su interpretación se puede extraer la importancia relativa de unas tipologías respecto a las otras.

**Parques:** áreas naturales que en razón a la belleza de sus paisajes, la representatividad de sus ecosistemas o la singularidad de su flora, de su fauna o de su diversidad geológica, incluidas sus formaciones geomorfológicas, poseen unos valores ecológicos, estéticos, educativos y científicos cuya conservación merece una atención preferente.

Variable	Atributo	Puntos
Tipología de Espacio Natural (TEN)	Parques	2,0
	Reservas Naturales	1,8
	Áreas Marinas Protegidas	1,6
	Monumentos Naturales	1,4
	Paisajes Protegidos	1,2
	Espacios NO protegidos	1,0

Tabla 6.13.- Puntuación asignada a los atributos de la variable TEN

Reservas Naturales: espacios naturales cuya finalidad es la protección de ecosistemas, comunidades o elementos biológicos que, por su rareza, fragilidad, importancia o singularidad merecen una valoración especial.

Áreas Marinas Protegidas: espacios naturales designados para la protección de ecosistemas, comunidades o elementos biológicos o geológicos del medio marino, incluidas las áreas intermareal y submareal, que en razón de su rareza, fragilidad, importancia o singularidad, merecen una protección especial.

Monumentos Naturales: espacios o elementos de la naturaleza constituidos básicamente por formaciones de notoria singularidad, rareza o belleza, que merecen ser objeto de una protección especial. Se considerarán también Monumentos Naturales los árboles singulares y monumentales, las formaciones geológicas, los yacimientos paleontológicos y mineralógicos y demás elementos que reúnan un interés especial por la singularidad o importancia de sus valores científicos, culturales o paisajísticos.

Paisajes Protegidos: partes del territorio que las Administraciones competentes, a través del planeamiento aplicable, por sus valores naturales, estéticos y culturales, y de acuerdo con el Convenio del paisaje del Consejo de Europa, consideren merecedores de una protección especial.

En algunos casos los técnicos pueden tener problemas para puntuar esta variable. La legislación española es particular y, tal y como explica Tolón y Lastra (2008), las Comunidades Autónomas, sin un criterio común, han creado figuras de protección que pueden crear cierta confusión. En cualquier caso, el error de interpretación afectaría a un nivel del escalado de la tabla 6.13, lo cual no tendrá gran repercusión en la decisión final.

#### 6.3.1.1.- Repercusión Negativa del Daño (RND) - I<sub>1</sub>.C<sub>1</sub>.R<sub>2</sub>

##### Objetivo

El indicador *Repercusión Negativa del Daño* (RND) tiene como objetivo analizar los perjuicios que puede ocasionar en el medio cualquier tipo de daño que se haya presentado en la presa (estructura) o en el embalse. Unos perjuicios que pueden afectar tanto a la zona de aguas arriba de la estructura, como a la de aguas abajo. No se diferencia entre las

repercusiones directas (a corto plazo) y aquellas que puedan tener una repercusión indirecta (a largo plazo).

### Estrategia

La construcción de una presa suscita la realización de estudios preventivos con el objetivo de permitir solamente la realización de aquellos proyectos que aseguran en condiciones normales, por sí mismos o mediante medidas correctoras, la sostenibilidad del entorno natural. La aparición de un daño en la estructura puede modificar estas condiciones y provocar ciertos inconvenientes en el medio. Ante la voluntad de los gestores de que la afectación sea lo menor posible, se van a priorizar aquellas actuaciones que, de no ser corregidas, puedan ocasionar un mayor inconveniente para el entorno natural.

Por otro lado se debe señalar que toda actuación que sea obligatoria para que la estructura cumpla con la legalidad vigente en materia de impacto ambiental quedará excluida del proceso de análisis, ya que debe realizarse obligatoriamente.

### Forma de medición

Tal y como se ha explicado en la contextualización del criterio, las variables utilizadas para determinar la puntuación final de este indicador son: *Intensidad del Impacto* (InI), *Extensión del Impacto* (ExI), *Duración del Impacto* (DuI) y *Tipología del Espacio Natural* (TEN). En este caso, se acompañan del DñE, porque el proyecto de rehabilitación es más necesario cuanto más relevante es el daño a corregir, pues mayores pueden ser sus consecuencias derivadas.

Estas cinco variables quedan relacionadas según la ecuación 6.6, un producto entre *TEN* y el sumatorio ponderado de las variables InI, ExI y DuI, que se subordina mediante multiplicación al DñE. Los coeficientes de mayoración de las variables InI y ExI se obtienen de Gómez Orea (1988).

$$RND = (TEN \cdot (3 \cdot InI + 2 \cdot ExI + DuI)) \cdot DñE \quad [\text{ec. 6.6}]$$

### Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es creciente porque a medida que aumenta la puntuación más problemas se pueden causar en el medio, y por tanto más necesario es realizar la actuación. En este caso se utiliza la función "S" que se muestra en la figura 6.6, con el punto de mínima satisfacción situado en (6 ; 0) y el de máxima satisfacción en (300 ; 1). Se ha escogido esta función para restar importancia a las puntuaciones extremas.

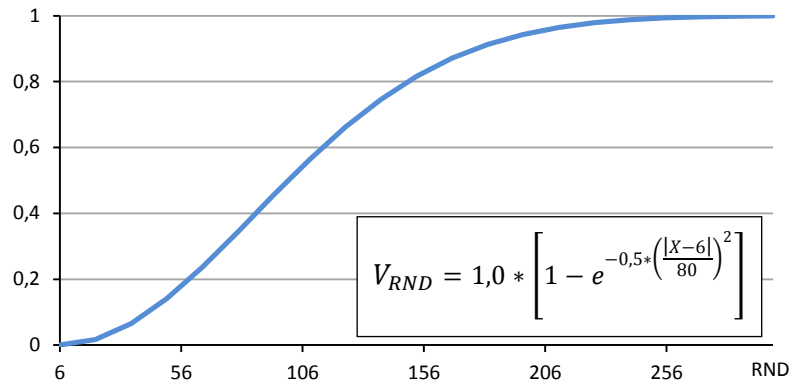


Figura 6.6.- Función de valor del indicador Repercusión Negativa del Daño

La parte cóncava de la función, delimitada por un punto de inflexión en abscisas relativamente bajo (80), tiene la misión de impedir que impactos residuales en espacios con baja consideración medio ambiental obtengan valores del indicador elevados, y así evitar que se realicen actuaciones que no son del todo trascendentes.

El tramo convexo de la función se alarga en abscisas desde los 80 hasta los 300 puntos, asignándose un valor muy cercano a 1 a todo impacto negativo que sobrepase los 200 puntos. Si bien es cierto que la puntuación puede llegar hasta 300, serán escasas las ocasiones en que se sobrepasen los 200 puntos por la propia definición de las variables, de ahí que sea necesario que la función discrimine sobretodo hasta esta puntuación.

#### 6.3.1.2.- Valor Añadido de la Actuación (VAA) - I<sub>1</sub>.C<sub>2</sub>.R<sub>2</sub>

##### Objetivo

El indicador *Valor Añadido de la Actuación* (VAA) analiza de forma general las ventajas ambientales generadas, aguas arriba y aguas abajo de la presa, como consecuencia de la materialización de una actuación correctora que se puede realizar en la estructura o en la zona del embalse. El objetivo final es estimar la contribución suplementaria, en materia de medio ambiente, que acarrea de forma intrínseca el proyecto.

##### Estrategia

La obligación principal de los gestores de la presa es conservar el entorno natural de la mejor manera posible. Aun así, algunas actuaciones, de forma indirecta, van a reportar un aumento de “riqueza” en el medio ambiente en lo que se considera el *valor añadido* del proyecto. Este beneficio, aunque sea “inesperado”, debe capitalizarse y evaluarse. La intención es premiar aquellas actuaciones que, además de reducir el riesgo ambiental asociado al daño, contribuyen a mejorar las condiciones en que se desarrolla la vida.

En la decisión, el peso asignado a la *Repercusión Negativa del Daño* (RND) siempre debe ser considerablemente superior al peso asignado al *Valor Añadido de la Actuación*

(VAA), principalmente por la obligación que tienen los entes gestores de conservar, no de mejorar, el entorno natural. Una realidad normativa que va a provocar que algunas actuaciones no reporten valor añadido. Para evitar una sobreestimación de tales actuaciones, antes de iniciar la valoración de las variables se debe decidir si el proyecto aporta o no valor añadido. Si se considera que la aportación es nula, la valoración del indicador será automáticamente cero.

### Forma de medición

Tal y como se ha explicado en la contextualización del criterio, las variables utilizadas para cuantificar este indicador son: *Intensidad del Impacto* (InI), *Extensión del Impacto* (ExI), *Duración del Impacto* (DuI) y *Tipología del Espacio Natural* (TEN). Todo beneficio que pueda ocasionarse es independiente del daño que se corrige, de ahí que en ningún caso se tome en consideración el valor del DñE.

La puntuación final del indicador *Valor Añadido de la Actuación* (VAA) se calcula según la ecuación 6.7. Si la actuación no aporta beneficio, VAA es nulo. Si la actuación aporta beneficio, VAA se obtiene del producto entre TEN y el sumatorio ponderado de las variables InI, ExI y DuI. Los coeficientes de mayoración de las variables InI y ExI son los mismos que en el caso anterior, y derivan de Gómez Orea (1988).

$$VAA = \begin{cases} 0 & \text{sin valor añadido} \\ TEN \cdot (3 \cdot InI + 2 \cdot ExI + DuI) & \text{con valor añadido} \end{cases} \quad [\text{ec. 6.7}]$$

### Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es creciente porque a medida que aumenta la puntuación, mejor es realizar la actuación propuesta, al obtenerse un beneficio ambiental mayor. En este caso se utiliza la función convexa que se muestra en la figura 6.7, con el punto de mínima satisfacción situado en (6 ; 0) y el de máxima satisfacción en (60 ; 1).

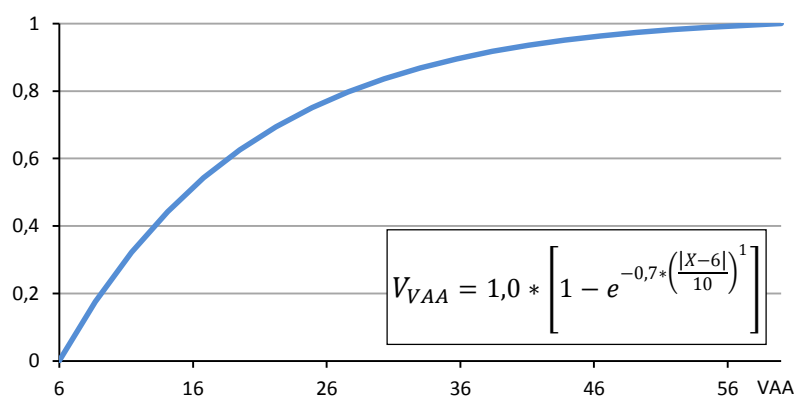


Figura 6.7.- Función de valor del indicador Valor Añadido de la Actuación

Se ha escogido esta función porque permite dar relevancia a aquellas actuaciones que aportan valor añadido al medio ambiente, al considerarse que lo importante es contribuir, aunque no sea de forma considerable, a la mejora ambiental. Se valora, por tanto, positivamente cualquier actitud proactiva en esta materia. Además, se debe tener en cuenta que va a ser complicado que este indicador presente puntuaciones elevadas.

#### 6.4.- REQUERIMIENTO ECONÓMICO - R<sub>3</sub>

El análisis de este requerimiento se realiza únicamente desde la óptica de la sección empresarial encargada tanto de la conservación de las instalaciones como de la generación de electricidad, teniéndose en cuenta solamente las obligaciones que atañen a ésta. El estudio económico del proyecto a ejecutar se va a realizar mediante la evaluación de dos criterios: *Inversión y Retorno de la inversión* que genera la misma, tal y como se muestra en la tabla 6.14.

Requerimiento	Criterios	Indicadores
Económico	Inversión	Coste Anual Unitario (CAU)
	Retorno de la inversión	Ahorro Mantenimiento y Vigilancia (AMV)
		Incremento Producción Estimado (IPE)

Tabla 6.14.- Rama del requerimiento Económico

##### 6.4.1.- Inversión - C<sub>1</sub>.R<sub>3</sub>

Este criterio recoge el conjunto de los gastos en los que debe incurrir el gestor para asegurar el óptimo mantenimiento de sus instalaciones, con el objetivo de evitar consecuencias indirectas en la población y el medio, y para garantizar la obtención/generación del producto o servicio en torno al cual gira su negocio.

La inversión se estudia únicamente a través de un único indicador, el *Coste Anual Unitario* de la actuación (CAU).

##### 6.4.1.1.- Coste Anual Unitario (CAU) - I<sub>1</sub>.C<sub>1</sub>.R<sub>3</sub>

###### Objetivo

El indicador *Coste Anual Unitario* (CAU) pretende alcanzar los siguientes objetivos:

- Cuantificar la inversión inicial que debe realizar la propiedad para la realización de la actuación de mantenimiento o conservación.
- Relacionar el coste de la inversión con el daño a eliminar.
- Realizar una distribución temporal de la inversión.

Estrategia

Cualquier análisis económico en este ámbito debe iniciarse con la certeza, no suposición, de que la empresa que explota una estructura hidráulica actúa en beneficio del interés general. Los intereses de la sociedad se imponen siempre a los intereses de los individuos particulares o entes privados. En este marco, no se puede aplicar un análisis financiero tradicional, donde la evaluación de proyectos de inversión se realiza, básicamente, mediante una comparativa entre los costes generados por la realización del proyecto y los ingresos económicos que de él se derivan, con las pertinentes actualizaciones del valor monetario.

Para poder examinar de forma ecuánime un proyecto de estas características, como señala Rus (2008), no se deben comparar costes con ingresos, debiéndose realizar una aproximación diferente al problema. En estos casos se aconseja realizar un análisis *Coste-Beneficio*. En él son necesarias ciertas particularidades y simplificaciones para transformar el análisis real hacia un modelo manejable, que refleje, eso sí, lo esencial de la realidad, normalmente, más compleja.

Forma de medición

Este indicador se evalúa a partir las dos variables *coste anual* y *beneficio*, que se relacionan entre sí mediante un ratio.

El *Coste Anual* es la amortización que cada año se realiza de la Inversión Inicial (IIn) durante la Vida Útil de la actuación (ViU), transformándose así, según la ecuación 6.8, un gasto puntual en un gasto diferido a lo largo del tiempo. De esta manera se pueden comparar inversiones que van a explotarse en periodos de tiempo de distinta duración.

$$\text{Coste Anual} = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Vida útil}} = \frac{IIn}{ViU} \quad [\text{ec. 6.8}]$$

La *Inversión Inicial* (numerador) es la cantidad económica que los técnicos estiman que va a costar la actuación. Este valor se puede extraer directamente del presupuesto anual de la empresa. La *vida útil* (denominador) de la actuación es, según el ASTM E 632-82 (1996), el periodo de tiempo estimado en que las prestaciones y propiedades esenciales del elemento en que se actúa permanecerán superiores al valor mínimo aceptable con un mantenimiento rutinario. A nivel únicamente de *coste*, cuanto menor sea el importe de esta variable (menos euros/año de gasto) más adecuado es realizar la actuación.

El *Beneficio* es la contrapartida que se obtiene de realizar el dispendio económico. En este ámbito, el daño eliminado es la ganancia de carácter intangible que se valora a partir de la puntuación asignada al DñE (ver ecuación 6.9). A nivel únicamente de beneficio, cuanto más daño se elimine, mejor.

$$\text{Beneficio} = \text{DñE} \quad [\text{ec. 6.9}]$$



Nótese que solamente debe considerarse el beneficio directo, no el indirecto. El beneficio indirecto se tiene en cuenta en el resto de indicadores, ya sea valorando las posibles consecuencias que se evitan con la actuación (PoE, PCR, SEA, PME y RND), ya sea valorando la aportación extra que se presupone a la actuación (VAA, AMV y IPE). De no hacerse así se incurriría en un error grave, al definirse un indicador redundante.

La cuantificación final del indicador *Coste Anual Unitario (CAU)* se obtiene de realizar el análisis *Coste-Beneficio*, mediante el cociente que se presenta en la ecuación 6.10, en el que se relativiza el *Coste Anual* (numerador) con la puntuación del DñE (denominador). El CAU reporta los euros anuales necesarios para eliminar una unidad de daño.

$$CAU = \frac{\text{Coste Anual}}{\text{Beneficio}} = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Vida útil} \cdot \text{DñE}} = \frac{I_{In}}{ViU \cdot \text{DñE}} \quad [\text{ec. 6.10}]$$

La ventaja de relacionar la inversión inicial con la vida útil y con el DñE es que se consigue un indicador relativo capaz de valorar la rentabilidad anual de la operación, evitándose, además, la utilización de la cantidad monetaria absoluta de la inversión para definir el valor del indicador, que penalizaría las actuaciones que tienen un mayor coste (se les asignaría un valor bajo del indicador) que en algunos casos pueden ser más necesarias que otras consideradas más “baratas”.

En este indicador, según lo establecido hasta el momento, dos partidas económicas iguales que resolvieran el mismo problema en dos presas diferentes obtendrían la misma valoración. Siendo irrelevantes las características de la presa y de su entorno, factores que ya se tienen en cuenta en los otros dos requerimientos.

#### Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es decreciente porque a medida que disminuye la puntuación del indicador más rentable es realizar la actuación. En este caso se utiliza la función cóncava que se muestra en la figura 6.8, con el punto de máxima satisfacción situado en (0 ; 1) y el de mínima satisfacción en (100.000 ; 0). Se escogió una función cóncava porque se pretende dar la mayor relevancia posible a aquellas actuaciones que con un gasto anual menor reducen un mayor daño.

Las inversiones a analizar en este indicador pueden ir de los pocos miles de euros (30.000 – 40.000 euros) hasta los varios millones de euros. Para poder contemplar todas las puntuaciones posibles, de la más baja a la más alta, se necesitaría una función de valor con un eje de abscisas muy amplio, que supondría tener una función de valor poco discriminante. Para evitar este problema, y teniendo en cuenta que una gran inversión solamente tiene sentido si elimina un riesgo elevado durante un periodo largo de tiempo, se decidió, analizando varias actuaciones millonarias, que toda puntuación superior a 100.000 debe ser valorada con un cero.

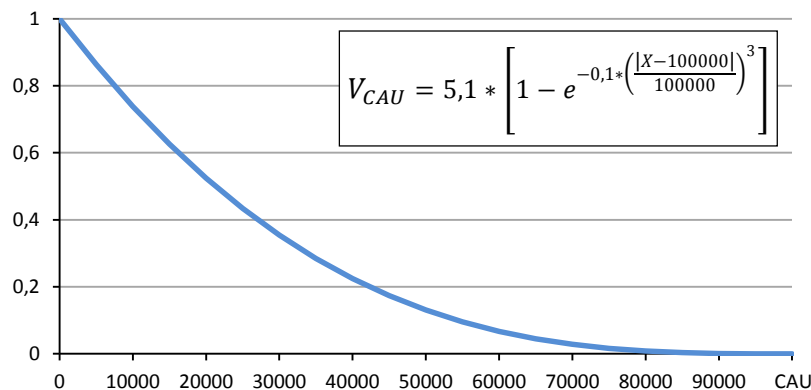


Figura 6.8.-Función de valor del indicador Coste Anual Unitario

#### 6.4.2.- Retorno de la inversión (C<sub>2</sub>.R<sub>3</sub>)

Este criterio tiene por objetivo determinar los beneficios económicos que se estima que obtiene la empresa derivados de la reparación del daño existente en la estructura. Con ello se pretenden corregir las situaciones que penalizan a nivel económico a la empresa propietaria de la presa en su explotación ordinaria. Este criterio va a considerar los indicadores: *Ahorro en Mantenimiento y Vigilancia e Incremento de Producción Estimado*.

Eliminando el daño se reduce la probabilidad de generar perjuicios a la sociedad y/o al medio ambiente, con lo que se reduce teóricamente la partida económica destinada a pagar posibles indemnizaciones. De todas formas, este no es un concepto que se haya incluido en el árbol de requerimientos. El principal motivo que ha llevado a esta decisión es que los posibles perjuicios ya han sido valorados en otros indicadores (como son PoE, PCR, SEA, PME y RND), por tanto lo único que se conseguiría sería definir un indicador redundante, cuya aportación sería únicamente dar una cuantificación monetaria a una problemática valorada ya desde una óptica moral.

##### 6.4.2.1.- Ahorro Mantenimiento y Vigilancia (AMV) - I<sub>1</sub>.C<sub>2</sub>.R<sub>3</sub>

###### Objetivo

El indicador *Ahorro Mantenimiento y Vigilancia* (AMV) tiene por objetivo estimar el dinero que dejaría de gastarse la empresa en los trabajos ordinarios de mantenimiento<sup>3</sup> y vigilancia<sup>4</sup> como consecuencia de la eliminación del daño presente en la estructura.

###### Estrategia

Todas las presas españolas se encuentran bajo un régimen de control exhaustivo, implantado para prevenir problemas estructurales que pueden aparecer con los años. Por

<sup>3</sup> Comprende el conjunto de operaciones a realizar periódicamente en el complejo hidráulico para garantizar que pueda desarrollar la labor que tiene encomendada.

<sup>4</sup> Comprende el conjunto de trabajos de observación del comportamiento. Debe ser constante y diferida en el tiempo, pudiéndose realizar manual y/o automáticamente.

ello, todas las presas generan un gasto en vigilancia que debe sufragar el gestor que las explota. En el caso que aparezca alguna anomalía, y siempre que esta sea detectada, normalmente se acentúa la vigilancia, incrementado el coste anual de esta partida. Además, en algunos casos se hacen pequeñas reparaciones de mantenimiento orientadas, por un lado, a corregir los defectos menores que el daño ha ocasionado y, por el otro, a evitar males mayores en la estructura.

Puede darse el caso de que, en un momento dado, se decida realizar una actuación extraordinaria porque se considere que puede mejorarse de forma sustancial la situación en la que se encuentra cualquier elemento del complejo hidráulico. Una vez realizada la actuación, el riesgo se elimina, reduciéndose, por norma general, tanto los gastos de mantenimiento (en principio a cero) como los de vigilancia (al mínimo).

De todas formas, es posible que, en una fase inicial, los costes de vigilancia se mantengan fijos (incluso podrían aumentar) con el objetivo de evaluar la ejecución de la actuación realizada. Aunque, sin duda, pasado el periodo de control inicial, si la actuación satisface los objetivos previstos, los costes de vigilancia se reducen al mínimo, con lo cual el coste general de la partida de mantenimiento y vigilancia es inferior a la que se debía hacer frente antes de la actuación. Para evitar posibles distorsiones, a ese nivel, es necesario elevar el estudio a una fase temporal amplia, recomendándose a este respecto entre 3 y 5 años.

#### Forma de medición

Se propone medir este indicador mediante dos variables que tienen en cuenta tanto el *Gasto Soportado Anualmente (GSA)* como *Gasto Anual Previsto (GAP)*:

- El *Gasto Soportado Anualmente (GSA)* cuantifica la partida económica ordinaria que se ha destinado al mantenimiento y vigilancia de un daño hasta la fecha en que se realiza la actuación.
- El *Gasto Anual Previsto (GAP)* cuantifica el posible gasto en vigilancia que deberá realizarse una vez efectuada la actuación de reparación del daño.

Se utiliza este sistema para evitar tener que realizar una previsión detallada de gastos que no sería más precisa que la actual y, en cambio, conllevaría un mayor trabajo para los técnicos.

El *Gasto Soportado Anualmente (GSA)* se obtiene, por norma general, de calcular el valor medio de la partida económica destinada a tal fin en los últimos tres ejercicios económicos. De todas formas se contempla la opción de utilizar el coste del último ejercicio por distintas razones:

- el daño se ha acentuado de forma considerable durante el último ejercicio por lo que los costes de mantenimiento no pueden relacionarse con los años anteriores;
- no existen registros detallados de costes anteriores a los dos últimos años;

- no se había realizado mantenimiento hasta el último o penúltimo ejercicio.

Así, GSA es el máximo valor entre el coste medio de las tres últimas partidas económicas y el coste del último ejercicio (año<sub>-1</sub>), tal y como se muestra en la ecuación 6.11.

$$GAS = \max \left[ \frac{\sum_{i=-3}^{i=-1} (\text{coste año}_i)}{3}, \text{coste año}_{-1} \right] \quad [\text{ec. 6.11}]$$

En el supuesto caso de que el daño no haya requerido mantenimiento hasta el momento, GAS se obtiene de encargar un presupuesto a los técnicos para cuantificar el coste futuro, visto y estudiado el estado en que se encuentra la estructura.

El *Gasto Anual Previsto (GAP)* para los próximos  $n$  años es una aproximación y se obtiene gracias a la experiencia de los técnicos de la empresa, que deben ser capaces de obtener cantidades fiables y razonables. Si los técnicos no son capaces de establecer una previsión de costes, su juicio experto debe permitirles determinar, al menos, una tasa de ahorro en porcentaje, obteniéndose *GAP* según la expresión ecuación 6.12.

$$GAP = GSA (1 - \zeta) \quad [\text{ec. 6.12}]$$

siendo:  $\zeta$  = la tasa de ahorro en tanto por ciento (%)

La cuantificación final del indicador *Ahorro Mantenimiento-Vigilancia (AMV)* se obtiene de la diferencia existente entre el GSA y GAP, según se indica en la ecuación 6.13.

$$AMV = GSA - GAP = GAS \cdot \zeta \quad [\text{ec. 6.13}]$$

Desde la óptica de este indicador, para que una inversión tenga sentido, el valor de los costes de los últimos años debe ser superior a la previsión de costes para los próximos años. Toda actuación que no tenga esta condición será evaluada con un cero en este indicador.

#### Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es creciente porque a medida que aumenta el ahorro más rentable resulta realizar la actuación. En este caso se utiliza la función convexa que se muestra en la figura 6.9, con el punto de mínima satisfacción situado en (0 ; 0) y el de máxima satisfacción en (60.000 ; 1).

El objetivo que se persigue es impulsar las actuaciones que incentivan el ahorro de la empresa. Se ha escogido una función cóncava precisamente porque penaliza los ahorros pequeños respecto a aquellos más cuantiosos.

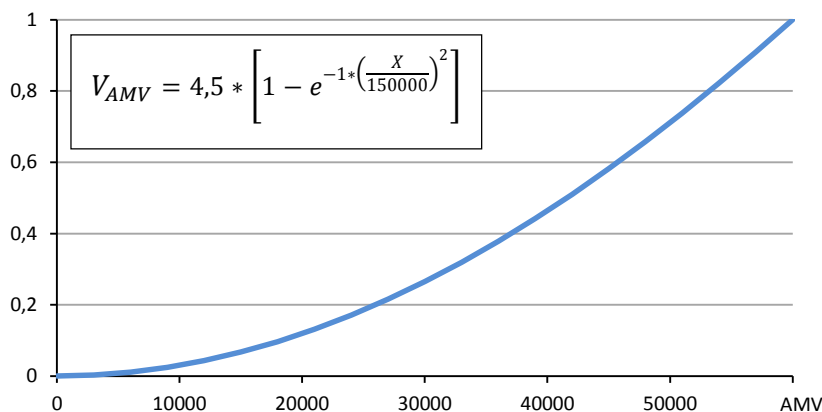


Figura 6.9.- Función de valor del indicador Ahorro Mantenimiento y Vigilancia

#### 6.4.2.2.- Incremento de Producción Estimado (IPE) - I<sub>2</sub>.C<sub>2</sub>.R<sub>3</sub>

##### Objetivo

El objetivo del indicador *Incremento de Producción Estimada* (IPE) es evaluar la afectación positiva (valor añadido) que la actuación aporta al sistema de producción eléctrico del complejo hidráulico.

##### Estrategia

El agua es uno de los grandes recursos energéticos con que cuenta la sociedad actual. La energía hidroeléctrica es la que proviene del aprovechamiento de la energía potencial acumulada en el agua. Existen empresas que tienen como negocio el desarrollar actividades de generación, transporte, distribución y comercialización de electricidad que se produce gracias al agua.

Uno de los conceptos básicos que ha de estudiarse para determinar si una inversión debe o no de realizarse, en función de las otras presupuestadas, es la afectación a la capacidad de generar energía del complejo hidráulico. Un estudio que teóricamente puede realizarse desde dos ópticas distintas: mejoras en el *rendimiento del personal* y mejoras en el *estado de la instalación*.

Rendimiento Personal. El daño existente en una estructura puede alterar el día a día de los trabajadores de la empresa, modificando rutinas, cambiando protocolos, etc. Todos estos cambios pueden ocasionar pérdidas de tiempo que repercuten sin duda en el rendimiento de la explotación. Si la actuación restablece la situación ideal de conservación de la estructura, todos los posibles contratiempos que de ella se deriven en esta materia deberían quedar eliminados, mejorándose la capacidad productiva de los equipos humanos.

Aun considerándose que este aspecto es importante, finalmente se ha decidido no considerarlo en el modelo. El cálculo del incremento de rendimiento/producción del personal es muy farragoso y queda totalmente desdibujado y sin prácticamente valor

cuando se compara con el incremento de producción conseguido mejorando el estado de las instalaciones.

Estado instalación. En el caso de sufrir daños, la infraestructura necesaria para desarrollar la actividad eléctrica puede dejar de funcionar correctamente, pudiendo incluso paralizarse la instalación, alterando los valores normales de producción, reduciendo la capacidad de la entidad de ofrecer un servicio, y por tanto modificando la capacidad de negocio de la empresa. Las actuaciones presupuestadas pueden generar mejoras en la infraestructura que conlleven la corrección de las deficiencias productivas. Para el caso de estudio, se supone que mediante la actuación se va a conseguir, como mucho, restituir el estado óptimo de la instalación, por lo que es impensable que la producción sea mayor que la de proyecto.

La unidad de referencia en este estudio es la eléctrica, GWh, facilitándose así la labor a los técnicos. En el caso de que el precio de la electricidad fuera variable según los territorios donde se encuentran las presas se podría plantear la utilización de una unidad monetaria, por ejemplo el €.

#### Forma de medición

Para poder obtener el valor de este indicador, en primer lugar se debe determinar el *Incremento de Producción Potencial* (IPP) que cuantifica, de forma aproximada, el máximo incremento posible de producción alcanzable en la instalación. Se proponen dos sistemas para determinar este indicador:

- Calcular las pérdidas de producción
- Definir un porcentaje de la producción máxima de proyecto

El primer sistema entiende que el *Incremento de Producción Potencial* (IPP) es igual a la pérdida de producción que ha sufrido la instalación con el paso del tiempo. Para determinar su valor se calcula la diferencia existente entre producción máxima alcanzada por la instalación y su producción actual, según se indica en la ecuación 6.14. En el caso de que las pérdidas no sean recientes, la capacidad actual de producción se obtiene del valor de producción medio de los últimos ejercicios (máximo tres).

$$IPP = \max GWh_{instalación} - \frac{\sum_{i=-1}^{i=-g} (GWh_i)}{g} \quad [\text{ec. 6.14}]$$

donde  $i$  = ejercicios contables anteriores al actual  
 $g \leq 3$

El segundo sistema solamente debe utilizarse si no se dispone del registro histórico de la producción eléctrica de la instalación. Ante la falta de datos, el *Incremento de Producción Potencial* (IPP) puede asimilarse a un porcentaje de la producción máxima de proyecto, tal y como se muestra en la ecuación 6.15.

$$IPP = \max (GWh_{proyecto}) \cdot \frac{FIP}{100} \quad [\text{ec. 6.15}]$$

El *Factor de Incremento de Producción* (FIP), utilizado para establecer el porcentaje de incremento de producción, se determina a partir de la tabla 6.15, inspirada en Conesa (2010). En ella se describen cinco grados distintos de afectación de las instalaciones. A más daño, menos capacidad de producir y en consecuencia, más capacidad de mejora, hasta llegar a la máxima de proyecto. A cada estado de la instalación se le asocia un incremento de producción en tanto por ciento. Una instalación que esté parada puede tener un incremento del 100%, en cambio, una instalación que funciona perfectamente, obtendrá un incremento de producción del 0% cuando se haya corregido el daño.

Estado actual (o previsto) de la instalación	FIP
Instalaciones con graves daños o en colapso. Interrupción de la producción por período de tiempo indefinido.	100
Instalaciones dañadas y/o con riesgo de colapso. Funcionalidad con estrictas limitaciones a la explotación. Producción sujeta a severas restricciones y/o paros temporales.	75
Instalaciones dañadas sin riesgo de colapso. Funcionalidad con limitaciones a la explotación. Producción sujeta a ciertas restricciones.	50
Instalaciones con daños menores, con alguna afección a su funcionalidad. Producción sujeta a limitaciones ocasionales.	25
La funcionalidad de las instalaciones no está afectada. No se interrumpe/reduce la producción.	0

Tabla 6.15.- Tanto por ciento de posible incremento de producción según el grado de daño

Puede darse el caso de que la pérdida de producción no sea causada por el daño que se corrige, o que no sea solamente causada por ese daño. Es imposible, en esta coyuntura, restablecer los valores de la producción hasta los niveles de proyecto. Otra posibilidad factible es que la actuación no tenga la capacidad de solucionar por completo el problema existente con lo cual tampoco sería posible recuperar el 100% de la producción.

Para tener en consideración esta casuística, al *Incremento de Producción Potencial* (IPP) se le aplica un coeficiente  $\pi$ , corrector, según la ecuación. 6.16, de donde se obtiene la cuantificación final del indicador *Incremento de Producción Estimada* (IPE), una aproximación más real del valor añadido que puede obtenerse mediante la actuación.

$$IPE = IPP \cdot \pi \quad [\text{ec. 6.16}]$$

El coeficiente  $\pi$ , los valores del cual se presentan en la tabla 6.16, evalúa la capacidad que tiene la actuación de corregir la pérdida de producción y de mejorar las condiciones de explotación. El coeficiente debe estimarse por consenso entre los técnicos responsables de la actuación y los técnicos responsables de la explotación.

$\pi$	Limitaciones Actuación
1	Se conseguirá el total del incremento posible
3/4	Solamente se conseguirá un 75% del incremento posible
1/2	Solamente se conseguirá un 50% del incremento posible
1/4	Solamente se conseguirá un 25% del incremento posible
0	Imposible mejorar las condiciones actuales de explotación

Tabla 6.16.- Valores de  $\pi$

### Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es creciente porque cuanto más grande sea el posible incremento de producción energética más rentable resulta realizar la actuación. En este caso se utiliza la función cóncava que se muestra en la figura 6.10, con el punto de mínima satisfacción situado en (0 ; 0) y el de máxima satisfacción en (900 ; 1).

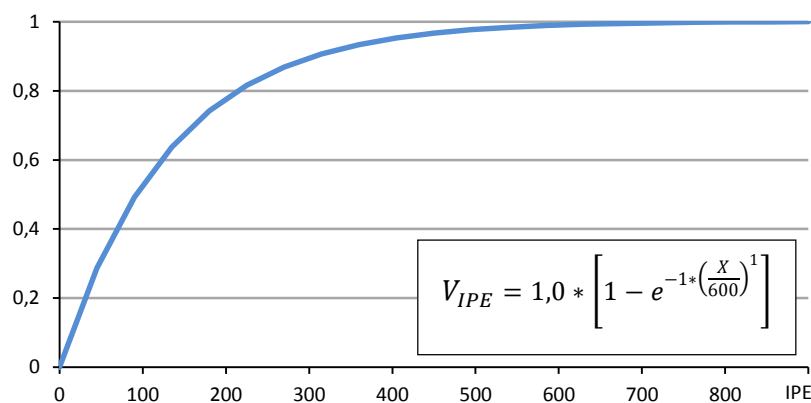


Figura 6.10.- Función de valor del indicador Incremento de Producción Estimado

Las instalaciones hidroeléctricas existentes en España tienen producciones en año medio que pueden oscilar entre los 5 y los 900 GWh, aunque la inmensa mayoría de las centrales se sitúan en el intervalo que va desde los 5 a los 250 GWh, según datos de la Comisión Nacional de la Energía (2007) y de Buil y Batlle (2007). Esta realidad indica que los incrementos de producción que pueden darse con mayor frecuencia son los que se sitúan en el entorno de 0 a 250 GWh. La única función que es capaz de cubrir todo el eje de abscisas, siendo especialmente discriminante en su tercio inicial, es una función cóncava como la utilizada.





## CAPÍTULO 7

# CONTRASTACIÓN DEL MODELO DE DECISIÓN: PRIORIZACIÓN DE ACTUACIONES

### 7.1.- INTRODUCCIÓN

En los capítulos 5 y 6 se ha presentado una metodología de ayuda a la decisión, basada en el *Índice de Priorización en la Gestión de Obras Hidráulicas* (IPGOH), que tiene la finalidad de ordenar las actuaciones de conservación y mantenimiento programadas en estructuras hidráulicas en función de su contribución al desarrollo sostenible.

El principal objetivo de este capítulo es contrastar la validez y efectividad de la metodología de priorización mediante su aplicación en una serie de actuaciones reales planteadas tanto por una empresa privada como por una administración pública. De esta manera se pretende demostrar, también, la versatilidad de la herramienta porque al tener estas dos entidades unas líneas estratégicas que difieren ligeramente (los intereses del privado y del público no suelen coincidir) los árboles del modelo de decisión, a pesar de tener la misma estructura, van a presentar pesos diferentes. Estos pesos se han definido entre los técnicos de cada organización y los expertos de la universidad, de acuerdo con sus principios rectores.

Así, el IPGOH se utiliza para evaluar doce actuaciones planteadas por Endesa, para quien fue concebida la herramienta y quién colaboró por mediación de sus técnicos en el desarrollo de la misma. Endesa, perteneciente al Grupo Enel, es la empresa líder del sector eléctrico español y la primera multinacional eléctrica del sector privado de América latina,

según fuentes de la misma compañía ([www.endesa.com](http://www.endesa.com)). Para el desarrollo de este negocio son fundamentales las centrales hidroeléctricas y las presas que éstas tienen asociadas. Siendo, por tanto, necesario su correcto funcionamiento para el buen devenir de la empresa. Esta compañía, a pesar de ser privada, ha mostrado siempre una disposición particular por cuidar y promover el interés general que se ha materializado dando una protección especial a las personas y al medio ambiente.

También se evalúan siete actuaciones de la Agencia Catalana de l'Aigua (ACA), empresa pública que tuvo a bien colaborar desinteresadamente en la validación de la metodología. La ACA es, según su propia web (<https://aca-web.gencat.cat>) una empresa pública de la Generalitat de Catalunya. Su misión es gestionar y planificar el ciclo integral del agua según los criterios establecidos en la Directiva Marco del Agua, siendo la sostenibilidad el principio básico que rige su política. En el marco de sus atribuciones, en materia de abastecimiento de agua, explota y controla la seguridad de las presas y embalses que tiene adscritos, con el fin de dar un servicio de calidad al ciudadano.

El capítulo, perteneciente al tercer bloque de esta tesis (§1.4), se divide en seis grandes apartados:

- Asignación de pesos a los componentes del árbol (§7.2)
- Actuaciones a priorizar (§7.3)
- Evaluación y priorización de actuaciones de Endesa (§7.4)
- Evaluación y priorización de actuaciones de la ACA (§7.5)
- Análisis de sensibilidad (§7.6)
- Conclusiones generales (§7.7)

## **7.2.- ASIGNACIÓN DE PESOS A LOS COMPONENTES DEL ÁRBOL**

En este apartado se definen los pesos de los distintos componentes del árbol de decisión. La asignación de pesos se ha realizado en orden descendente, es decir, primero se ha determinado el peso de los requerimientos, después el de los criterios y finalmente el de los diferentes indicadores. Para determinar el peso de los tres requerimientos se ha utilizado el método AHP (Saaty, 1980), de la misma manera que se utilizó en el apartado 5.3.5 para calcular el valor de los coeficientes del DñE. Este sistema no se utiliza para el cálculo de los pesos de los criterios y de los indicadores. La forma más razonable de determinar sus pesos es por asignación directa, porque de ningún requerimiento dependen más de dos criterios, como, tampoco, de ningún criterio dependen más de dos indicadores.

En primer lugar se establecieron los pesos del árbol de Endesa, con la participación directa de sus técnicos. Una vez hecha esta asignación y en base a la experiencia adquirida, se sugirieron unos pesos a los técnicos de la ACA, que se modificaron y adaptaron a su juicio. Por tanto en ambos casos ha sido fundamental la participación de los técnicos de las

dos compañías para conseguir que el árbol refleje sus criterios decisionales y se convierta en una herramienta útil.

En la figura 7.1 se presenta un único árbol de decisión con los pesos definidos para Endesa (se sitúan encima de las flechas, y se acompañan de un subíndice “E”) y con los definidos para la ACA (se sitúan debajo de las flechas y presentan como elemento distintivo un subíndice “A”) para priorizar sus respectivas actuaciones. El proceso de cálculo y asignación de pesos se presenta en el anexo 6. Para poder diferenciar qué pesos se utilizan en el árbol a la hora de priorizar, también, se utilizarán los subíndices “E” y “A”. Así, cuando la priorización se realice con los pesos de Endesa, se hablará IPGOH<sub>E</sub>, mientras que cuando se utilicen los pesos definidos por la ACA, se hablará de IPGOH<sub>A</sub>.

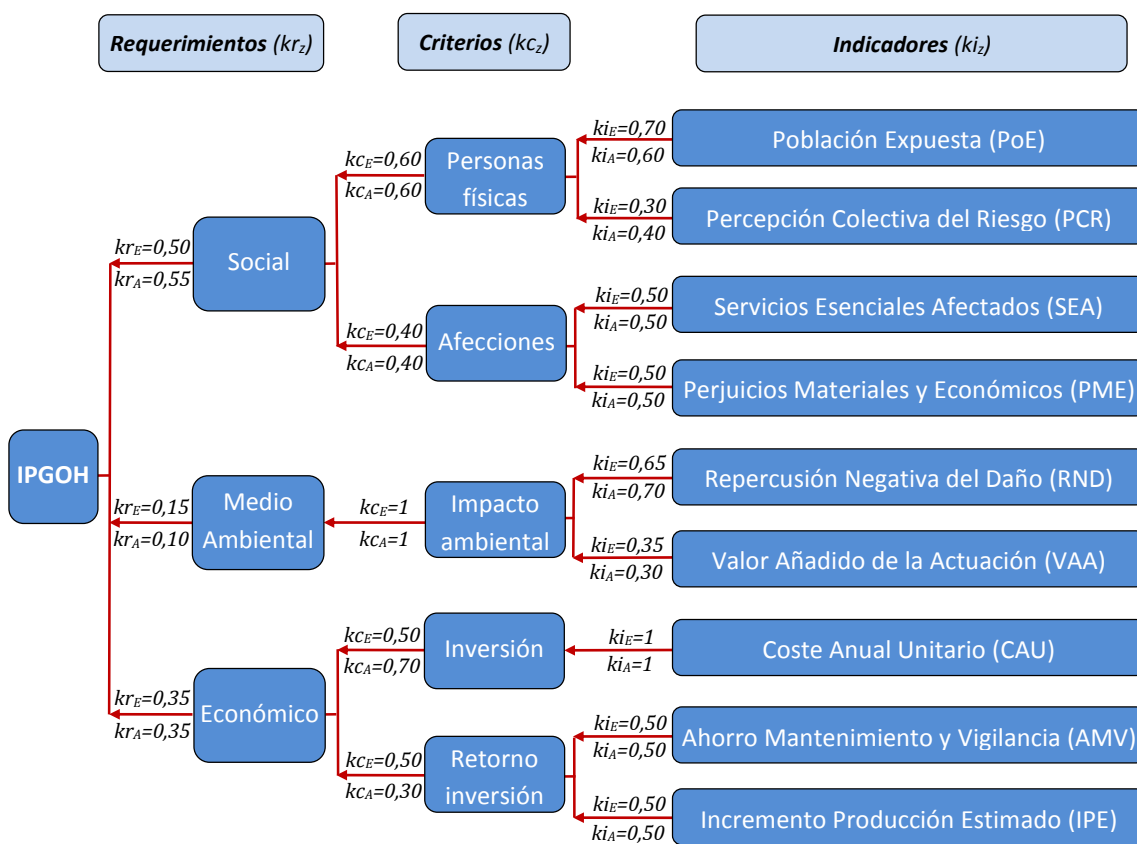


Figura 7.1.- Árbol de decisión desarrollado con los pesos de los componentes

Si se observa con detalle el árbol puede verse que las líneas estratégicas de ambas entidades se asemejan notablemente. La única diferencia existente en el peso de los requerimientos es que el *Social* es un 5% mayor en árbol de la ACA, porcentaje que pierde el requerimiento *Medio Ambiental* con respecto al árbol de Endesa.

En la figura anterior es fácil comparar los pesos relativos de los distintos componentes del árbol, pero resulta complicado comparar los pesos totales de los indicadores una vez se ha repercutido sobre ellos el peso del requerimiento y criterio correspondientes. Para facilitar este ejercicio se presenta la tabla 7.1, donde puede verse, en porcentaje, el peso relativo y total de todos los indicadores. En las dos últimas

columnas de la tabla se presenta directamente la diferencia de pesos entre un árbol y el otro.

Indicadores	Pesos Endesa (%)		Pesos ACA (%)		Diferencia (%)*	
	Relativo	Total	Relativo	Total	Relativo	Total
PoE	70	21	60	19,8	10	1,2
PCR	30	9	40	13,2	-10	-4,2
SEA	50	10	50	11,0	0	-1
PME	50	10	50	11,0	0	-1
RND	65	9,75	70	7,0	-5	2,75
VAA	35	5,25	30	3,0	5	2,25
CAU	100	17,5	100	24,5	0	-7
AMV	50	8,75	50	5,25	0	3,5
IPE	50	8,75	50	5,25	0	3,5
<i>Total</i>	-	100%	-	100%	-	0

\* Diferencia = Peso ENDESA - Peso ACA

Tabla 7.1.- Los indicadores de la decisión con sus pesos

En el árbol de Endesa el indicador que tiene un mayor peso es *Población Expuesta* (PoE) con un 21%, mientras que en el de la ACA es el indicador *Coste Anual Unitario* (CAU) con un 24,5%. Aunque el CAU sea el indicador con más peso, no significa que se dé más valor al requerimiento *Económico* que al *Social*, pues con el conjunto de indicadores sigue siendo mayor la relevancia del requerimiento *Social*.

El indicador CAU, a nivel individual, es el que presenta mayor diferencia entre un árbol y otro. Ésta es debida al peso asignado a los criterios del requerimiento *Económico*. En el árbol de Endesa el criterio *Inversión* tiene un peso del 50%, que se traduce en un peso del 17,5% del total. En cambio, en el árbol de la ACA este criterio tiene un peso del 70%, que se traduce en el 24,5%.

También es de destacar la diferencia del 4,2% existente en el peso del indicador *Percepción Colectiva del Riesgo* (PCR), siendo éste favorable al árbol de la ACA. La diferencia es debida al mayor peso del requerimiento *Social* en éste árbol y al mayor peso que recibe el propio indicador (el peso del criterio *Personas Físicas* es idéntico en ambos árboles y por tanto no contribuye a generar diferencia).

### 7.3.- ACTUACIONES A PRIORIZAR

En el presente apartado se enumeran las distintas actuaciones programadas por Endesa (12) y por la ACA (7) que se pretenden priorizar mediante el IPGOH, el objetivo es dar al lector una visión general de las actuaciones que se pueden analizar con la metodología. A tal fin, en la tabla 7.2, para cada actuación a estudiar, se enumeran las siguientes características: presa, referencia actuación, tipología, uso, altura de la presa, longitud de coronación, volumen del embalse y unidad estructural afectada

- **Presa:** Identifica la presa donde se ubica la estructura en la que se pretende realizar la actuación con una letra. Las presas de Endesa reciben letras de la A a la G, y las de la ACA, letras de la H a la M.
- **Referencia Actuación (Ref):** Código de identificación de cada una de las actuaciones que se deben priorizar. Es una combinación de la letra de la presa y el número de actuación en dicha presa. A modo de ejemplo, el código de la primera actuación de Endesa sería: A\_1, que significa que es la actuación 1 a realizar en la presa A. Todo ello refleja el hecho de que en una presa pueden plantearse  $n$  actuaciones diferentes.
- **Tipología (Tip):** Clasificación de la presa según la forma de su estructura y el tipo de material empleado. En este caso se consideran los tipos siguientes: Gravedad (GR), Bóveda (BV), Arco-Gravedad (AG), Contrafuertes (CN) y Materiales Suelos (MS).
- **Uso:** Utilidad que se le da a la presa y al embalse donde se ha propuesto la actuación. En este trabajo se consideran los usos siguientes: Abastecimiento (Ab), Hidroeléctrico (Hi), Riego (Ri) y Regulación (Re).
- **Altura de la Presa (Al):** Distancia en metros que separa los cimientos y el punto más alto de la coronación.
- **Longitud de Coronación (LC):** Distancia en metros que separa los dos estribos siguiendo la traza que marca la coronación de la presa.
- **Volumen del Embalse (VE):** Cantidad de agua, medida en  $\text{hm}^3$ , que es capaz de almacenar el embalse en condiciones normales.
- **Unidad Estructural Afectada (UEA):** Elemento de la presa o de su entorno que es sujeto de la actuación. Las unidades consideradas son las establecidas en el apartado 5.2.1: Cuerpo de Presa (CP), Estribos (ES), Cimentación (CM), Vaso (VS) y Órganos Afines (OA).

Por razones de confidencialidad, ajenas a este trabajo, no se menciona ni el nombre ni la ubicación de la presa. Los datos técnicos se han obtenido de datos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2014).

	Presa	Ref.	Tip	Uso	Al (m)	LC (m)	VE (hm <sup>3</sup> )	UEA
Actuaciones Endesa	A	A_1	MS	Hi-Re	25,9	109	31,0	CP
	B	B_1	Gr	Re	10,6	26,5	0,005	CP
	C	C_1	Gr	Hi-Ri	103,0	215,9	163,4	Cm-Es
		C_2	Gr	Hi-Ri	103,0	215,9	163,4	CP
	D	D_1	Gr	Hi	40,0	64,7	0,05	OA
	E	E_1	Bv	Ab-Hi-Ri	135,0	510,0	233,4	Vs
		E_2	Bv	Ab-Hi-Ri	135,0	510,0	233,4	OA
	F	F_1	Gr	H-Ri-Ab	79,0	461,0	1.530,0	OA
		F_2	Gr	Hi-Ri-Ab	79,0	461,0	1.530,0	CP
	G	G_1	Bv	Hi-Ri	151,0	210,0	678,0	Vs
G_2		Bv	Hi-Ri	151,0	210,0	678,0	CP	
G_3		Bv	Hi-Ri	151,0	210,0	678,0	Es	
Actuaciones ACA	H	H_1	Gr	Ab-Ri-Hi	59,5	311,0	24,3	OA
	I	I_1	Gr	Ab-Hi	83,0	260,0	151,2	Es
	J	J_1	Gr	Ab-Hi	62,9	250,0	60,1	OA
	K	K_1	Gr	Ab-Ri	62,7	274,4	12,4	CP
		K_2	Gr	Ab-Ri	62,7	274,4	12,4	OA
	L	L_1	Gr	Ab-Ri	38,0	190,8	3,7	Es
	M	M_1	Bv	Ab-Ri	122,0	326,0	79,4	Vs

Tabla 7.2.- Contextualización genérica de las actuaciones a priorizar

En la tabla 7.3 se describe, de forma muy simplificada, el objetivo de las actuaciones de Endesa que se deben priorizar y su coste previsto. Las doce actuaciones propuestas se sitúan en 7 presas distintas, todas ellas con características técnicas diversas. Cinco de estas doce actuaciones se plantean en la zona del Cuerpo de Presa, tres están vinculadas a los Órganos Afines, dos más al Vaso y las dos últimas a los Estribos, aunque una de estas también considera la Cimentación. El coste de las actuaciones a priorizar también es bastante dispar, desde inversiones que van de los 150.000 € hasta los 7.000.000 €, poniéndose a prueba la versatilidad de la herramienta.

Para el caso de la ACA se sigue el mismo procedimiento. En la tabla 7.4 se detalla la esencia de cada actuación y su coste. De las siete actuaciones a evaluar, tres de éstas son actuaciones que servirían para corregir deficiencias de los Órganos Afines, dos están vinculadas a los Estribos, una al Vaso y una al Cuerpo de Presa. Las siete actuaciones se reparten en seis presas distintas. El coste de las actuaciones es bastante amplio, aunque de un orden de magnitud inferior a las de Endesa, así, la actuación más económica necesita de una inversión de 13.500 €, y la más costosa se eleva hasta los 858.000 €.

Ref	Actuación	Coste (€)
A_1	Tratamiento y sellado de fisuras y desconchones que afecta dos tercios de la presa más acusado hacia la zona del estribo izquierdo.	$2 \cdot 10^5$
B_1	Reconstrucción de un vano lateral derrumbado por una avenida.	$4,3 \cdot 10^5$
C_1	Campaña de inyecciones de impermeabilización realizadas con microcemento para reducir las filtraciones que se dan a través de la cimentación y uno de los estribos, y que son consecuencia de un proceso de disolución.	$2,5 \cdot 10^5$
C_2	Inyecciones de lechada de cemento para impermeabilizar y consolidar el cuerpo de presa, con el objetivo de frenar la pérdida de cohesión, el aumento de la porosidad, la erosión y desprendimientos superficiales de hormigón que dejan el árido visto.	$3 \cdot 10^5$
D_1	Actuación conjunta que consiste en reparar la galería forzada que conecta el embalse con la central hidroeléctrica e instalación de una válvula de toma entre el embalse y dicha galería. El estado actual de la galería es precario, cualquier intervención en la misma o cualquier rotura imprevista significarían el vaciado completo del embalse al carecerse de un elemento de seccionamiento.	$5,5 \cdot 10^5$
E_1	Estabilización puntual de rocas inestables y colocación de malla protectora en la zona del embalse que da acceso a la presa donde se han detectado desprendimientos localizados.	$1,5 \cdot 10^5$
E_2	Sustitución de las válvulas de los desagües de fondo por otras que cumplan los criterios de diseño. Las actuales sufren un deterioro generalizado debido al envejecimiento de los equipos. Se ha comprobado, asimismo, que las mariposas son incapaces de cerrar a partir de una altura de embalse determinada, lo que introduce una incertidumbre a la hora de su maniobra. Además las fugas son considerables.	$4,2 \cdot 10^6$
F_1	Reparación y refuerzo de un muro de contención de tierras en la calzada de acceso a la Central, donde se detectó la movilización de una cuña de suelo en su trasdós, evidenciando una rotura y desplazamiento considerables.	$1,5 \cdot 10^5$
F_2	Inyección de juntas frías del cuerpo de presa, abiertas por la acción combinada de la expansión del hormigón por ataque químico y subpresión.	$3 \cdot 10^5$
G_1	Ejecución de trabajos de estabilización de una ladera del embalse basados en el movimiento de tierras de una importante masa deslizable. En caso de deslizamiento, generación de ola que se propagaría afectando a la cresta del embalse y al cuerpo de presa.	$5 \cdot 10^6$
G_2	Ejecución de trabajos de inyección de juntas frías por donde se dan filtraciones en la zona del cuerpo de presa.	$2,5 \cdot 10^5$
G_3	Ejecución de un muro para reforzar el macizo rocoso donde queda estribada la presa. El objetivo es aumentar los coeficientes de seguridad, y así evitar su deslizamiento.	$7 \cdot 10^6$

Tabla 7.3.- Características básicas de las actuaciones de Endesa a priorizar



Ref	Actuación	Coste (€)
H_1	Reparación de los desagües de medio fondo de la presa para poder regular con mayor precisión el caudal ecológico. El envejecimiento es evidente y ha causado una falta notable de estanqueidad, y provoca incertidumbre en su maniobrabilidad.	$8,58 \cdot 10^5$
I_1	Análisis de estabilidad de los bloques de roca situados en la zona de estribos de la presa. Se han registrado signos que indican que podría producirse algún deslizamiento.	$1,35 \cdot 10^4$
J_1	Reparación de la compuerta vagón 1,4 x 1,8 m. El estado de conservación de los elementos laterales de rodadura y de los sistemas de sellado impiden que pueda utilizarse como elemento de seccionamiento entre la presa y la central. La compuerta no está considerada como un elemento estratégico de seguridad de la presa.	$2,45 \cdot 10^4$
K_1	Obra de mejora y reparación de la red de drenaje de la presa ante el importante grado de colmatación que presentan los drenes. Instalación de una red piezométrica para el control de subpresiones y la efectividad de la nueva red de drenaje.	$2,84 \cdot 10^5$
K_2	Reparación de los desagües fondo de la presa para poder asegurar la maniobrabilidad y regular con mayor precisión el caudal ecológico. A causa del notable envejecimiento, existe una falta evidente de estanquidad.	$7,55 \cdot 10^5$
L_1	Consolidación de una plataforma terraplenada donde se ubica una estación meteorológica mediante el dragado y limpieza de fangos y lodos en la zona de desprendimiento de gaviones en el estribo izquierdo de la presa.	$1,92 \cdot 10^4$
M_1	Obra de protección para frenar un desprendimiento masivo de bloques en la margen derecha de la presa, cerca del estribo y que podría generar una ola que causaría daños en la estructura.	$5,14 \cdot 10^4$

Tabla 7.4.- Características básicas de las actuaciones de la ACA a priorizar

## 7.4.- EVALUACIÓN Y PRIORIZACIÓN DE ACTUACIONES DE ENDESA

En el presente apartado se presenta la evaluación y la priorización realizadas con el IPGOH<sub>E</sub> de las actuaciones de Endesa propuestas en la tabla 7.3. Para que el lector se familiarice con el procedimiento utilizado, en primer lugar, se detalla la evaluación de una de las actuaciones (§7.4.1), para, a posteriori, mostrar de forma conjunta, en forma de tabla, la evaluación del resto de actuaciones (§7.4.2). Una evaluación que va a servir para establecer la priorización. Todas las evaluaciones se han realizado a partir de una serie de informes facilitados por Endesa de forma totalmente desinteresada.

### 7.4.1.- Evaluación de un caso particular. Ejemplo de aplicación

Con el objetivo de ejemplificar la evaluación de una actuación cualquiera, en este apartado se analiza pormenorizadamente la actuación E\_2 según la metodología presentada en los capítulos 5 y 6. Se ha escogido este ejemplo por su claridad y capacidad didáctica.

La actuación, como ha quedado especificado en la tabla 7.3, consiste en sustituir las válvulas de los desagües de fondo existentes en la presa por otras que cumplan los criterios de diseño dado que las actuales sufren un deterioro generalizado debido al envejecimiento de los equipos. Además, se ha comprobado que las mariposas son incapaces de cerrar a partir de una altura de embalse determinada, lo que introduce una incertidumbre a la hora de su maniobra. Este conjunto de problemas provoca que las fugas registradas en esta zona de la estructura hayan sido considerables. Por otro lado no se descarta que llegue un momento en que no puedan cerrarse los desagües. En ese caso se vertería al río un caudal que oscilaría entre 40 y 160 m<sup>3</sup>/s lo que significaría un caudal diez veces mayor al característico del río, que significaría el vaciado del embalse.

El proceso de análisis, tal y como se ha visto, se divide en dos etapas: la fase 1, *Evaluación Homogénea del Daño*; y la fase 2, cálculo del *Índice de Priorización en la Gestión de Obras Hidráulicas* (IPGOH).

#### 7.4.1.1.- Fase 1. Evaluación homogénea del daño

##### Grado de Daño (GrD)

El estado actual de los desagües de fondo se puede definir como *Grave*, pues no se puede garantizar su funcionalidad como consecuencia del nivel de daño, por lo que ha debido bajarse el nivel del embalse. Aunque la situación es crítica, no existe peligro de fallo. Por tanto, según la tabla 5.1, **GrD=4**.

##### Ubicación del Daño (UbD)

El daño se presenta en una zona *Crítica* pues afecta a un elemento esencial de la presa como es el desagüe de fondo, cuya operatividad es de importancia decisiva para evitar consecuencias negativas. Así, según la tabla 5.2, **UbD=5**.

##### Extensión del Daño (ExD)

La extensión, en este caso, se valora por unidades afectadas. Los cuatro desagües de fondo se encuentran en el mismo estado de conservación, lo que significa que la afectación es *Total*. En consecuencia, de acuerdo con la tabla 5.3, **ExD=5**.

##### Evolución del Daño (EvD)

Se trata de un proceso natural de envejecimiento que se viene desarrollando desde hace algún tiempo, si bien se han identificado nuevos signos de daño recientemente, aunque no han requerido de mayores medidas cautelares. Por esta razón, se ha definido el proceso como *Latente*. Por tanto, por la tabla 5.4, **EvD=3**.

### Daño Estructural (DñE)

Mediante los valores obtenidos en esta fase, y a partir de la ecuación 5.12, puede establecerse que, en esta actuación, **DñE=4,25**, que representa un valor alto de daño.

#### 7.4.1.2.- Fase 2. Índice de Priorización en la Gestión de Obras Hidráulicas

##### Población Expuesta (PoE)

En el caso que se vaciara el embalse, el caudal que se vertería al río sería peligroso, pudiendo causar daños físicos (heridos, sobre todo leves) en un número intermedio de personas, 6 - 30, que pudieran encontrarse cerca del cauce aguas abajo en las distintas poblaciones que el río atraviesa a lo largo de su recorrido hasta el mar. Es importante remarcar que no existe ningún embalse aguas abajo que puede mitigar la avenida. Por tanto, de acuerdo con la tabla 6.2, **NPE=3**.

Aguas abajo de la presa se sitúan distintos Núcleos Urbanos de Población, siendo más fácil que el vaciado pueda sorprender desprevenidos a algunos ciudadanos. Así, según lo establecido en la tabla 6.3, **TOE=5**.

Con la puntuación de estas dos variables y teniendo en cuenta el DñE calculado previamente, por la ecuación 6.1 puede obtenerse **PoE=14,45**, puntuación que una vez introducida en la función de valor de la figura 6.2 permite obtener el valor del indicador, **V<sub>PoE</sub> = 0,891**.

##### Percepción Colectiva del Riesgo (PCR)

El estado actual de las válvulas permite observar, con cierta facilidad, Manchas de Humedad causadas por las filtraciones en la zona próxima a los desagües. Además, en el resto de la presa también puede verse alguna mancha del mismo estilo. Según lo establecido en la tabla 6.3, **DOC<sub>1</sub>=2**. El segundo signo de daño que se observa son las propias Filtraciones, en consecuencia, por la misma tabla 6.3, **DOC<sub>2</sub>=4**. Mediante una observación algo más detallada puede detectarse una ligera fisuración, que va a contribuir a configurar una imagen general del estado en que se encuentra la estructura, aunque su aparición no tenga relación, en este caso, con la conservación de los desagües de fondo. Por tanto, y una vez más, según dicta la tabla 6.3, **DOC<sub>3</sub>=3**. Con DOC<sub>1</sub>, DOC<sub>2</sub> y DOC<sub>3</sub> puede obtenerse, mediante la ecuación 6.2, que **DOC=11,4**.

En los últimos 25 años no se recuerdan incidentes remarcables ni en esta presa ni en las que se encuentran a su alrededor. Por esta razón, según lo que establece la tabla 6.5, **Hic=1**.

Con la puntuación de DOC e Hic, por la ecuación 6.3, puede obtenerse que **PCR=12,4**, puntuación que una vez introducida en la función de valor de la figura 6.3 permite obtener el valor del indicador, **V<sub>PCR</sub> = 0,711**.

### Servicio Esenciales Afectados (PCR)

En un problema grave de maniobra en que se diera el vaciado del embalse se perdería la reserva de agua para un núcleo poblacional de más de 1 millón de personas. En consecuencia, y de acuerdo con la tabla 6.6, **ATI=5**.

Se estima que la interrupción del servicio podría durar entre 12 y 24 horas, pues, aunque se recircularía agua de otras reservas para abastecer esta población, la activación de un protocolo de estas dimensiones no sería ni instantáneo ni automático, y siempre manteniendo ciertas restricciones en el consumo. Por tanto, **tIS=4**, tal y como establece la tabla 6.7.

Con la puntuación de estas dos variables, y teniendo en cuenta el DñE calculado previamente, por la ecuación 6.4, puede obtenerse **SEA=85**, puntuación que una vez introducida en la función de valor de la figura 6.4 permite obtener el valor del indicador, **V<sub>SEA</sub> = 0,959**.

### Perjuicios Materiales-Económicos (PME)

Un proceso de vaciado del embalse causaría dos tipos de perjuicios, los provocados directamente por el caudal que circularía, debido a su importancia, por fuera del cauce tradicional del río en algunos tramos, y los provocados por la falta de suministro de agua.

Las viviendas que se sitúan en las inmediaciones del río son numerosas, es sumamente complicado definir con precisión aquellas que pueden padecer algún perjuicio por la acción del agua. Se entiende que con relativa facilidad el número de viviendas afectadas se va a situar entre 10-100. Por tanto, por la tabla 6.8, **V=3**.

El conjunto industrias, ganaderías y propiedades rústicas sería el más perjudicado en el caso de que se diera el vaciado del embalse. La imposibilidad de disponer de agua afectaría a su capacidad productiva. Dada la configuración del territorio y teniendo en cuenta que también, se verían afectados los comercios de los núcleos poblacionales, se estima que en conjunto el número de industrias, ganaderías y propiedades rústicas afectadas sería superior a 50. Por tanto, **I=5**, según establece la misma tabla 6.8.

Los cultivos de secano serían los menos afectados por la avenida causada por un posible vaciado del embalse. En este sentido, se estima que la superficie afectada de cultivos de secano no superaría los 3.000 hm<sup>2</sup>, pues solamente quedarían dañados aquellos terrenos colindantes al cauce del río destinados a este tipo del cultivo. Así, de acuerdo con la tabla 6.8, **S=1**.

Distinta es la situación que afectaría a los cultivos de regadío, en este caso, además de la afectación física causada por la avenida, debe sumarse la imposibilidad de regar dichos cultivos por la posible falta de agua. Una falta que, si bien en las ciudades puede recuperarse rápidamente, puede afectar de forma indefinida a estas explotaciones agrarias. Teniendo en cuenta la configuración del territorio, se estima que la superficie

afectada de cultivos de regadío sería superior a los 5.000 hm<sup>2</sup>. Por tanto, según lo establecido en la tabla 6.8, **R=5**.

Con la puntuación de estas cuatro variables, y teniendo en cuenta el DñE calculado previamente, por la ecuación 6.5 puede obtenerse **PME=59,5**, puntuación que una vez introducida en la función de valor de la figura 6.5 permite obtener el valor del indicador, **V<sub>PME</sub> = 0,578**.

#### Repercusión Negativa del Daño (RND)

El funcionamiento del río en régimen de avenida durante tiempo prolongado, provocado por la imposibilidad de cerrar los desagües de fondo, ocasionaría graves daños en la morfología del cauce, la biota acuática, la fauna y la flora. Ante tal posibilidad, se considera que la intensidad del impacto es Alta. En consecuencia, de acuerdo con la tabla 6.10, **InI=5**.

Este impacto va a extenderse aguas arriba de la presa, en la parte del valle que está inundada y que quedaría sin agua; y aguas abajo, donde la avenida puede generar un notable desorden natural. Así, se considera que la extensión del impacto va a superar el 80% del territorio natural vinculado directamente al embalse. Por tanto, según lo establecido en la tabla 6.11, **ExI=5**.

Cuesta muchos esfuerzos reconducir una situación de tanta relevancia. Aun así no es sencillo estimar un tiempo de recuperación. En este caso, para no magnificar el impacto, se ha optado por considerar un tiempo de recuperación medio (4 < años < 7). Por tanto, por la tabla 6.12, **DuI=3**.

El territorio natural en el que queda encuadrada la afectación que causaría el daño presente en la presa tiene un marco de protección. Las administraciones públicas han estimado oportuno considerar la zona de la ribera del río como Parque Natural. Así, **TEN=2**, de acuerdo con la tabla 6.13.

Con la puntuación de estas cuatro variables, teniendo en cuenta el DñE calculado previamente, por la ecuación 6.6 puede obtenerse **RND=238**, puntuación que una vez introducida en la función de valor de la figura 6.6 permite obtener el valor del indicador, **V<sub>RND</sub> = 0,986**.

#### Valor Añadido de la Actuación (VAA)

La reparación de las válvulas de los desagües de fondo permitiría, de un lado regular de forma más eficiente el caudal ecológico que debe mantener, aguas abajo, las características intrínsecas de la ribera adyacente al embalse, y, del otro, recuperar capacidad de almacenamiento, al poderse aumentar la cota de embalse y al reducir al mínimo la pérdida de agua por filtraciones. Estas mejoras ambientales se considera que van a tener un impacto de intensidad Media en el entorno natural, siendo especialmente positiva la mejora en la regulación del caudal ecológico. Por tanto, por la tabla 6.10, **InI=3**.

Este impacto va a extenderse aguas abajo de la presa (caudal ecológico) y aguas arriba (mayor capacidad de embalse). De esta manera, se puede considerar que la extensión del impacto va a superar el 80% del territorio natural vinculado directamente al embalse. Por tanto, por la tabla 6.11, **ExI=5**.

Si no hay problemas inesperados, esta actuación va a consolidar unas mejoras ambientales que pueden considerarse de carácter Permanente (duraran más de 10 años). Ante esta situación, **DuI=5**, según dicta la tabla 6.12.

La ribera del río, principal beneficiaria de la actuación, como ya se ha especificado, tiene la consideración de Parque Natural. Por esta razón, de la misma manera que en el indicador anterior, por la tabla 6.13, **TEN=2**.

Con la puntuación de estas cuatro variables y, en este caso, sin tomar en consideración el DñE, por la ecuación 6.7 puede obtenerse **VAA=48**, puntuación que una vez introducida en la función de valor de la figura 6.7 permite obtener el valor del indicador, **V<sub>VAA</sub> = 0,969**.

#### Coste Anual Unitario

Se estima, según los informes de la propia compañía, que el coste de la actuación que va a permitir cambiar las válvulas de los desagües de fondo va a ascender a 4.200.000 euros. Por tanto, **IIn=4.200.000**.

Esta actuación está previsto que pueda amortizarse durante, al menos, 50 años. En consecuencia, **ViU=50**.

Definidas estas dos variables, y teniendo en cuenta el DñE que en este caso es el beneficio que se obtiene de realizar la inversión, por la ecuación 6.10 puede obtenerse **CAU=19764,7**, puntuación que introducida en la función de valor de la figura 6.8 permite obtener el valor del indicador, **V<sub>CAU</sub> = 0,529**.

#### Ahorro Mantenimiento-Vigilancia (AMV)

Se estima, por falta de información detallada, que el gasto que la empresa ha realizado anualmente en mantenimiento y, sobre todo, en vigilancia de los desagües de fondo en esta presa asciende a 50.000 euros. Por tanto, **GaS=50.000**.

Al considerarse que el daño es un problema puntual que una vez resuelto no debería causar mayores problemas, se estima que el gasto se podrá reducir un 70%. En consecuencia, **ζ=0,7**. Es decir que se prevé un gasto anual en vigilancia y mantenimiento ordinario de 15.000 euros.

Definidas estas dos variables, por la ecuación 6.13 puede obtenerse **AMV=35.000**, puntuación que una vez introducida en la función de valor de la figura 6.9 permite obtener el valor del indicador, **V<sub>AMV</sub> = 0,358**

### Incremento de Producción Estimado (IPE)

Las instalaciones se encuentran con daños menores que afectan ligeramente a su funcionalidad, lo que ha provocado alguna limitación ocasional de producción. Por tanto, por la tabla 6.15, **FIP=25**.

Las instalaciones asociadas a esta presa tienen de proyecto una producción máxima de 180 GWh. Por tanto, **Max GWh<sub>instalación</sub> =180**. Definidos los valores de las variables FIP y Max GWh<sub>instalación</sub>, puede obtenerse que **IPP=45**, según lo establecido en la ecuación 6.15.

Las limitaciones a la producción son debidas únicamente a los problemas asociados a la operatividad de las válvulas del desagüe de fondo. Se prevé que resolviendo dicho problema, objetivo único de la actuación evaluada, se consiga el total incremento de producción posible. Por tanto, por la tabla 6.16,  **$\pi=1$** .

Establecidas las variables IPP y  $\pi$ , por la ecuación 6.16 puede obtenerse **IPE=45**, puntuación que una vez introducida en la función de valor de la figura 6.10 permite obtener el valor del indicador, **V<sub>AMV</sub> = 0,286**.

### **Índice de Priorización en la Gestión de Obras Hidráulicas (IPGOH<sub>E</sub>)**

Con los valores de cada indicador obtenidos en esta fase y a partir de la ecuación 5.13, puede establecerse que, en este actuación, **IPGOH<sub>E</sub>=0.701**.

Para agilizar y facilitar todo el proceso de cálculo, se ha desarrollado una herramienta de soporte en Excel con el árbol de decisión, adjunta en el anexo 7. Este programa permite, definidas todas las variables, calcular el valor final del IPGPH<sub>E</sub> de cada actuación, además de facilitar la puntuación y el valor de cada indicador. Asimismo, el programa analiza de forma conjunta todas las actuaciones que el usuario desea, y ordena, de forma automática, las actuaciones según el valor de IPGOH<sub>E</sub> que han obtenido, de más a menos prioritaria.

#### **7.4.2.- Evaluación conjunta y priorización de actuaciones de Endesa**

En este apartado se presenta, para cada una de las doce actuaciones de Endesa a priorizar, el valor final del IPGOH<sub>E</sub>, así como la puntuación de todas las variables necesarias para calcularlo. Recuérdese que el IPGOH<sub>E</sub> representa el grado en que cada actuación contribuye al desarrollo sostenible. Aunque no se detalla, este ejercicio se ha realizado siguiendo el ejemplo expuesto en el apartado anterior. Con el objetivo de darle trazabilidad al trabajo, en el anexo 8 se presenta una ficha resumen con la información más relevante de cada una de las actuaciones propuestas que debería permitir la reproducción de la evaluación.

En primer lugar, en la tabla 7.5, correspondiente a la fase 1 de análisis, se presenta la puntuación asignada a las cuatro variables que permiten obtener el *Daño Estructural*

(DñE), así como el valor calculado del propio DñE, presentado en las casillas resaltadas en amarillo. Las puntuaciones asignadas a las distintas variables engloban prácticamente todo el rango de valores posibles. La única puntuación que no se ha asignado es el "1" a la variable GrD (UbD y EvD no admiten, en principio, ni 2 ni 4 puntos).

Variable	Actuaciones											
	A_1	B_1	C_1	C_2	D_1	E_1	E_2	F_1	F_2	G_1	G_2	G_3
GrD	2	5	3	4	5	3	4	4	2	4	2	2
UbD	1	5	3	3	5	1	5	1	3	5	3	5
ExD	4	5	3	4	5	1	5	2	3	2	3	3
EvD	3	1	3	3	3	3	3	5	3	5	3	3
<b>DñE</b>	<b>2,05</b>	<b>4,20</b>	<b>3,00</b>	<b>3,45</b>	<b>4,60</b>	<b>2,10</b>	<b>4,25</b>	<b>2,95</b>	<b>2,65</b>	<b>4,35</b>	<b>2,65</b>	<b>3,35</b>

*Tabla 7.5.- Puntuación del DñE y de las variables que lo determinan*

La combinación de estas puntuaciones ha permitido obtener unos valores de DñE que oscilan entre 2,05 (A\_1) hasta 4,60 (D\_1), existiendo una notable variabilidad entre ambos valores, más si se tiene en cuenta que el mínimo es 1 y el máximo 5. Esto significa que las variables utilizadas son claramente discriminantes. Es difícil que se obtengan valores próximos a los extremos, sobre todo al extremo inferior. Los proyectos que podrían obtener puntuaciones muy bajas tendencialmente no se analizan, al ser descartados de antemano por parte de los técnicos de la compañía que los juzgan según su criterio ingenieril. Por otro lado, tampoco es sencillo obtener puntuaciones superiores a 4,65. Una puntuación de esta índole solamente se obtiene ante un daño de carácter extraordinario, que, precisamente, por su anormalidad suele ser corregido con carácter de urgencia.

Los resultados de la segunda fase de evaluación pueden verse en la tabla 7.6. En ella, además de las puntuaciones de las 27 variables que definen los nueve indicadores del árbol de decisión, se presenta la puntuación de cada uno de los indicadores, así como su valor final, que oscila entre 0 y 1, una vez transformada la puntuación mediante la función de valor definida para cada uno de ellos. Finalmente, en la última fila de la misma tabla se presenta el IPGOH<sub>E</sub> de cada actuación propuesta, valor que permite realizar la priorización de las actuaciones de manera objetiva.

El IPGOH<sub>E</sub> calculado para las distintas actuaciones estudiadas muestra la gran capacidad discriminante de la herramienta. Los valores obtenidos se sitúan entre 0,174 (A\_1) y 0,701 (E\_2), lo que representa un rango de valores de 0,554, magnitud muy importante si se tiene en cuenta que el rango máximo en el que se van a mover los valores va a ser 0,7. La herramienta es muy exigente en la evaluación, siendo muy complicado que las actuaciones obtengan valores elevados (>0,8). Son muchos los conceptos estudiados, y es complicado obtener una puntuación elevada en todos ellos. Además, esta puntuación debería coincidir con un caso en el que el valor del DñE fuera notablemente elevado. En el otro extremo, las actuaciones que podrían obtener menos de 0,1 difícilmente van a ser evaluadas con esta metodología, pues suelen descartarse de antemano, ante su previsible falta de contribución al desarrollo sostenible.



Variable	Actuaciones											
	A_1	B_1	C_1	C_2	D_1	E_1	E_2	F_1	F_2	G_1	G_2	G_3
NPA	1	1	1	1	2	2	3	2	1	5	1	5
TOE	1	1	2	2	5	2	5	2	1	5	1	5
PoE	2,05	4,2	3,6	4,2	11,96	4,2	14,45	5,9	2,65	21,75	2,65	16,75
V <sub>PoE</sub>	0,013	0,117	0,079	0,113	0,770	0,117	0,891	0,254	0,032	0,995	0,032	0,952
DOC <sub>1</sub>	2	5	4	5	4	3	2	3	3	3	4	3
DOC <sub>2</sub>	3	4	2	2	0	5	4	5	2	1	2	0
DOC <sub>3</sub>	0	3	0	3	0	1	3	1	0	0	3	0
Hic	1	5	2	2	1	1	1	1	1	5	5	5
PCR	8,05	20,9	10,7	15,2	7	13,25	12,4	13,25	8,2	10,85	16,7	9,5
V <sub>PCR</sub>	0,357	1	0,584	0,867	0,267	0,766	0,711	0,766	0,370	0,596	0,922	0,483
ATI	1	2	1	3	3	2	5	2	1	3	1	4
tIS	1	5	1	2	5	3	4	3	1	5	1	5
SEA	2,05	42	3	20,7	69	12,6	85	17,7	2,65	65,25	2,65	67
V <sub>SEA</sub>	0,036	0,771	0,06	0,504	0,919	0,338	0,959	0,448	0,056	0,906	0,056	0,912
V	1	1	1	1	1	1	3	1	1	3	1	5
I	1	3	1	1	3	1	5	1	1	3	1	5
S	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	5
R	1	1	1	1	1	1	5	1	1	3	1	5
PME	8,2	25,2	12	13,8	27,6	8,4	59,5	11,8	10,6	52,2	10,6	67
V <sub>PME</sub>	0,043	0,220	0,083	0,102	0,245	0,045	0,578	0,081	0,068	0,502	0,068	0,656
InI	1	1	1	1	5	1	5	1	1	5	1	5
ExI	1	1	2	1	5	1	5	1	1	4	3	5
DuI	1	1	5	1	5	1	3	1	1	3	5	5
TEN	1	1,8	1,2	1	1,8	1	2	1	1	1,8	1,8	1,8
RND	12,30	45,36	43,2	20,7	248,4	12,6	238	17,7	15,9	203,58	66,78	180,9
V <sub>RND</sub>	0,003	0,114	0,102	0,016	0,991	0,003	0,986	0,010	0,007	0,953	0,250	0,909
InI	1	3	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1
ExI	1	5	1	1	5	1	5	1	1	2	1	1
DuI	1	5	1	1	5	1	5	1	1	5	1	1
TEN	1	1,8	1,2	1	1,8	1	2	1	1	1,8	1	1
VAA	6	43,2	21,6	6	43,2	6	48	6	6	21,6	6	6
V <sub>VAA</sub>	0	0,947	0,082	0	0,947	0	0,969	0	0	0,679	0	0
IIn	2,0·10 <sup>5</sup>	4,3·10 <sup>5</sup>	2,5·10 <sup>5</sup>	3,0·10 <sup>5</sup>	3,0·10 <sup>5</sup>	1,5·10 <sup>5</sup>	4,2·10 <sup>6</sup>	3,0·10 <sup>5</sup>	3,0·10 <sup>5</sup>	5,0·10 <sup>6</sup>	2,5·10 <sup>5</sup>	7,0·10 <sup>6</sup>
ViU	10	50	10	15	50	20	50	30	10	50	15	50
CAU	9,7·10 <sup>3</sup>	2,0·10 <sup>3</sup>	8,3·10 <sup>3</sup>	5,7·10 <sup>3</sup>	1,3·10 <sup>3</sup>	3,5·10 <sup>3</sup>	1,9·10 <sup>4</sup>	3,3·10 <sup>3</sup>	1,1·10 <sup>4</sup>	2,2·10 <sup>4</sup>	6,2·10 <sup>3</sup>	4,1·10 <sup>4</sup>
V <sub>CAU</sub>	0,744	0,943	0,779	0,842	0,963	0,901	0,529	0,906	0,707	0,469	0,830	0,205
GAS	10000	0	2,0·10 <sup>4</sup>	3,0·10 <sup>4</sup>	2,5·10 <sup>4</sup>	1,0·10 <sup>4</sup>	5,0·10 <sup>4</sup>	1,0·10 <sup>4</sup>	2,0·10 <sup>4</sup>	5,0·10 <sup>4</sup>	1,5·10 <sup>4</sup>	5,0·10 <sup>4</sup>
ζ	0,50	0	0,80	0,50	0,80	1	0,70	100	0,70	0,70	75	0,70
AMV	5·10 <sup>3</sup>	0	1,6·10 <sup>4</sup>	1,5·10 <sup>4</sup>	2,0·10 <sup>4</sup>	1,0·10 <sup>4</sup>	3,5·10 <sup>4</sup>	1,0·10 <sup>4</sup>	1,4·10 <sup>4</sup>	3,5·10 <sup>4</sup>	1,5·10 <sup>4</sup>	3,5·10 <sup>4</sup>
V <sub>AMV</sub>	0,007	0	0,076	0,067	0,119	0,029	0,358	0,029	0,058	0,358	0,067	0,358
max GWh <sub>p</sub>	54,9	85,6	173	173	27,4	180	180	745	745	126	126	126
FIP	0	100	25	25	0	25	25	25	25	25	25	25
π	0	1	0,5	0	0	0	1	0	0,5	0,75	0	0,5
IPE	0	85,6	21,625	0	0	0	45	0	93,125	23,625	0	15,75
V <sub>IPE</sub>	0	0,474	0,149	0	0	0	0,286	0	0,503	0,162	0	0,111
IPGOH <sub>E</sub>	0,174	0,482	0,255	0,317	0,628	0,293	0,701	0,337	0,227	0,660	0,275	0,566

Tabla 7.6.- IPGOH<sub>E</sub> de cada actuación y puntuación de las variables que lo determinan

En la figura 7.2 se presenta un gráfico con el valor del  $IPGOH_E$  de cada una de las actuaciones evaluadas, siendo la media aritmética ( $\bar{x}$ ) de dichas evaluaciones 0,410 y la desviación típica ( $\sigma$ ) 0,187. En cada barra se señala con colores diversos la contribución de cada uno de los requerimientos al valor final de la actuación.

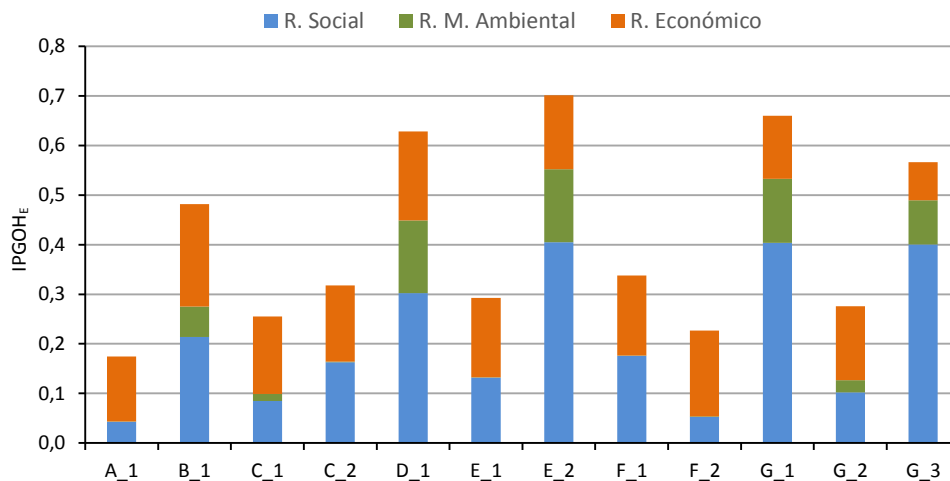


Figura 7.2.- Representación gráfica del IPGOH de las actuaciones de Endesa

Para facilitar la interpretación del resultado global en la tabla 7.7 se presenta la priorización de las doce actuaciones estudiadas. La primera (E\_2), es la que más contribuiría a un desarrollo sostenible en el caso de que se materializara; mientras que la última (A\_1) es la que contribuiría de manera menos significativa al desarrollo sostenible. Las unidades estructurales afectadas (UEA) se reparten indistintamente a lo largo de la lista ordenada, siendo, esto, sinónimo de que la fase de homogeneización permite comparar realidades muy diferentes sin miedo a que alguna unidad pueda quedar penalizada. En la última columna de la tabla, en función del  $IPGOH_E$ , se asigna un nivel de prioridad a cada actuación según el criterio establecido en la tabla 5.10.

En la figura 7.3 se presenta un gráfico de barras con la priorización de actuaciones. En él puede verse con relativa facilidad que existen, en base a las puntuaciones obtenidas, tres grupos de actuaciones; una realidad que se podía intuir con los datos de la tabla 7.7. En primer lugar, existe un grupo delantero, formado por las actuaciones de Nivel B y C, que serían las que deberían realizarse en un horizonte temporal reducido. Después, se sitúa un segundo grupo formado por las actuaciones del Nivel D que, aun siendo necesarias, pueden demorarse ligeramente en el tiempo. Y finalmente, algo descolgada, queda la actuación de Nivel E, una actuación que formaría el tercer grupo y que a corto plazo no tiene porqué realizarse. En todo caso, al margen de interpretaciones, existe un escalonado en el resultado que permite discriminar con relativa facilidad entre unas actuaciones y otras.

Posición	Actuación	UEA	IPGOH <sub>E</sub>	Nivel
1	E_2	OA	0,701	B
2	G_1	Vs	0,660	B
3	D_1	OA	0,628	B
4	G_3	Es	0,566	C
5	B_1	CP	0,482	C
6	F_1	OA	0,338	D
7	C_2	CP	0,318	D
8	E_1	Vs	0,293	D
9	G_2	CP	0,275	D
10	C_1	Cm-Es	0,247	D
11	F_2	CP	0,227	D
12	A_1	CP	0,174	E

Tabla 7.7.- Priorización de actuaciones de Endesa según IPGOH<sub>E</sub>

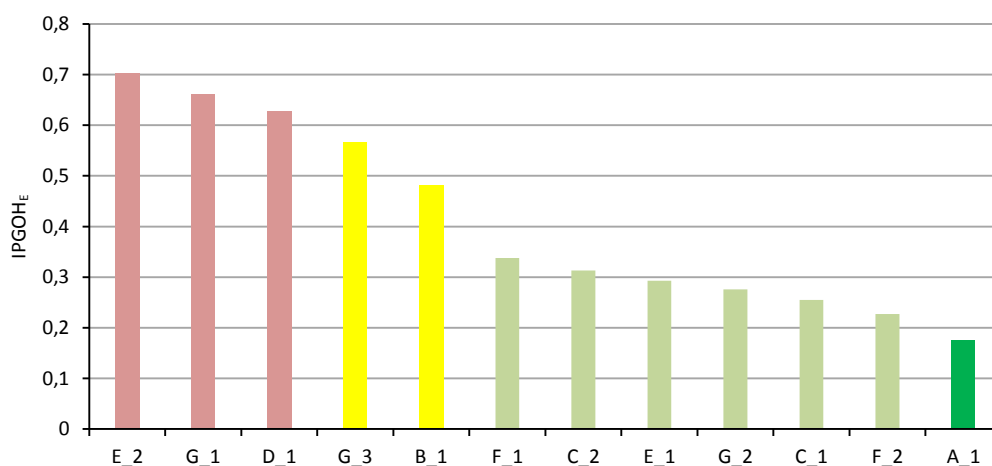


Figura 7.3.- Priorización gráfica de las actuaciones de Endesa según el IPGOH<sub>E</sub>

### 7.4.3.- Análisis de resultados

Para cerrar este apartado dedicado a la priorización de las actuaciones de Endesa se hace un análisis más pormenorizado de los resultados, en primer lugar con carácter general, para acabar con un análisis particular de las distintas actuaciones.

#### 7.4.3.1.- Valoración global de la priorización

La primera y más importante valoración que se debe resaltar es que la priorización obtenida mediante el IPGOH<sub>E</sub> es coherente con los planteamientos y la experiencia práctica de los técnicos de Endesa, quienes son los mayores expertos en sus propias

estructuras. La mayor prueba de tal afirmación es que en junio de 2014, fecha de cierre del presente capítulo, la actuación E\_2 (1ª clasificada) ya se ha realizado, y la actuación D\_1 (3ª clasificada) está programada para finales del presente año. Asimismo, se están ultimando los detalles que deberían permitir la materialización de la actuación G\_1 (2ª clasificada). De momento no está previsto realizar la actuación G\_3 (4ª clasificada), aunque se sigue con detenimiento su evolución.

La segunda forma de cotejar el resultado obtenido es comparándolo con la priorización que se obtiene utilizando el sistema propio de Endesa (denominado de ahora en adelante IP\_End), resultado que se presenta en la tabla 7.8, y que se desconocía cuando se realizó la evaluación mediante el IPGOH<sub>E</sub>. El IP\_End se basa en un índice de estado como los presentados en el apartado 2.5.2.

Posición	Actuación	Posición	Actuación
1	G_1	7	E_1
2	G_3	8	C_2
3	E_2	9	G_2
4	D_1	10	C_1
5	B_1	11	F_2
6	F_1	12	A_1

Tabla 7.8.- Priorización de actuaciones por el método Endesa (IP\_End)

Este método realiza de forma muy simple la evaluación de las consecuencias sociales y ambientales, además de presentar dos grandes deficiencias conceptuales. Por un lado, utiliza sistemas de evaluación diferentes en función del elemento estructural que analiza (lo que imposibilita a nivel teórico la comparación entre unidades estructurales afectadas) y, por otro, no hace una evaluación económica de la actuación. Por tanto, no es de extrañar que el resultado de uno y otro método sea ligeramente diferente. Sobre todo si se tiene en cuenta que son muchas más las variables evaluadas en el IPGOH<sub>E</sub>, lo que le transfiere un mayor grado de precisión.

Aun así, la esencia de la clasificación es la misma. En la tabla 7.9 se presenta una comparativa entre la posición que ocupa cada actuación en función del método utilizado para realizar la priorización. Seis de las doce actuaciones quedan clasificadas en el mismo lugar por ambos métodos. De las otras seis, cuatro cambian solamente una unidad su posición, y las dos restantes cambian su posición en 2 unidades, tal y como puede verse en la última columna de la tabla. Esta variación de posiciones puede verse en la figura 7.4.

Actuación	Posición		
	IPGOH <sub>E</sub>	IP_End	IPGOH <sub>E</sub> vs IP_End
E_2	1	3	▲ 2
G_1	2	1	▼ 1
D_1	3	4	▲ 1
G_3	4	2	▼ 2
B_1	5	5	=
F_1	6	6	=
C_2	7	8	▲ 1
E_1	8	7	▼ 1
G_2	9	9	=
C_1	10	10	=
F_2	11	11	=
A_1	12	12	=

Tabla 7.9.- Comparativa entre la priorización del IPGOH<sub>E</sub> y la del IP\_End

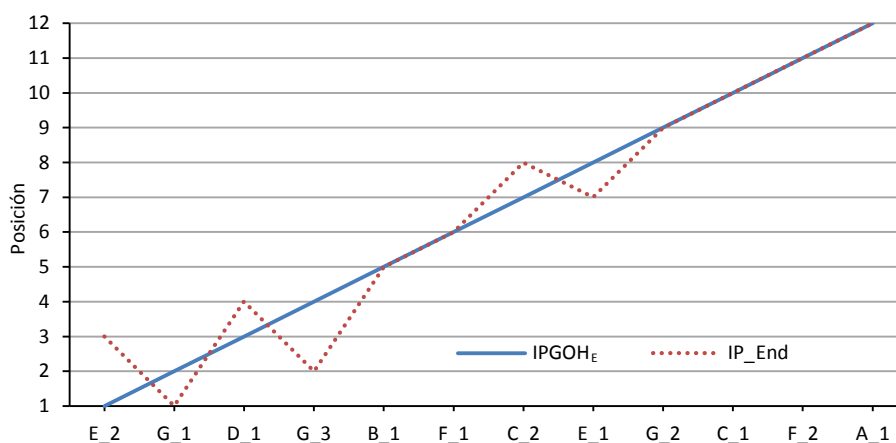


Figura 7.4.- Variación de posición de las actuaciones en función del sistema de cálculo

Aunque sean seis las actuaciones que se sitúan en posiciones diferentes, el IPGOH<sub>E</sub> solamente provoca tres cambios que automáticamente generan los otros tres. El primer cambio lo ocasiona el ascenso de dos posiciones del E\_2 que provoca que G\_1 pase al segundo lugar, donde se quedará, y G\_3 pase de forma temporal al tercer lugar. El segundo cambio es el ascenso de D\_1 que pasa del cuarto lugar al tercero, provocando, así, el descenso de otra posición de G\_3, dejando esta actuación en cuarto lugar. Finalmente, el tercer movimiento se da entre las actuaciones C\_2 y E\_1 que intercambian sus posiciones.

A pesar de la ligera diferencia entre el resultado obtenido por ambos métodos, parece ser que actualmente el criterio que sigue la compañía se asemeja algo más al resultado del IPGOH que no al resultado de su propia metodología, como así lo demostrarían las decisiones que se han materializado recientemente.

Para evitar juicios injustos hacia la compañía, debe señalarse que ésta ha tenido y tiene muchas otras actuaciones a realizar que no se han contemplado en este estudio. Por esta razón, no puede utilizarse el resultado obtenido en este trabajo para cuestionar la tarea de unos técnicos y de una empresa que en todo momento han actuado y actúan de manera muy profesional para asegurar el bienestar de la población y la correcta conservación del medio natural.

7.4.3.2.- Trascendencia del DñE

En este apartado se analiza uno de los elementos más singulares del sistema de decisión, el DñE. La naturaleza de esta unidad, definida para realizar la fase de homogeneización, suscita dos cuestiones que obligan al estudio detallado:

- ¿El resultado de la priorización sería el mismo si se utilizase únicamente el DñE?
- ¿EL resultado de la priorización sería el mismo sin el DñE?

Para dar respuesta a la primera duda se adjunta la tabla 7.10 donde se compara el resultado obtenido con el IPGOH<sub>E</sub> y la priorización que se obtendría si únicamente se utilizaran los valores del DñE presentados en la tabla 7.5. Esta clasificación se denomina IP\_DñE. En esta hipótesis, nueve actuaciones cambiarían de posición, unos cambios notables, tal y como puede verse en la última columna de dicha tabla.

Actuación	Posición		
	IPGOH <sub>E</sub>	IP_DñE	IP_DñE vs IPGOH
E_2	1	3	▼ 2
G_1	2	2	=
D_1	3	1	▲ 2
G_3	4	6	▼ 2
B_1	5	4	▲ 1
F_1	6	8	▼ 2
C_2	7	5	▲ 2
E_1	8	11	▼ 3
G_2	9	9	=
C_1	10	7	▲ 3
F_2	11	10	▲ 1
A_1	12	12	=

Tabla 7.10.- Comparativa entre la priorización del IPGOH y la del IP\_DñE

De los numerosos cambios constatados, deben destacarse algunas particularidades. La actuación que queda mejor valorada por el DñE es D\_1 que se sitúa en tercer lugar en el IPGOH<sub>E</sub> y en la cuarta en el IP\_End. En segundo lugar cabe destacar la

nueva posición de C\_2, que valorando únicamente el DñE pasaría a formar parte del grupo más prioritario de actuaciones, en detrimento de a la actuación G\_3. Asimismo es muy importante el cambio de posición que experimentan C\_1, que con el DñE ganaría tres posiciones, y la actuación E\_1 que, en cambio, perdería tres posiciones.

Todas estas modificaciones hacen que la clasificación quede desdibujada y por tanto no es recomendable que la priorización se haga teniendo en cuenta únicamente el DñE. El menosprecio de las consecuencias que el daño ocasionaría, valoradas en el árbol de decisión, aportan una información fundamental en el momento de establecer el orden de prioridades.

Analizar el resultado obtenido solamente con el DñE es bastante automático a la vez que sencillo, en cambio, determinar si el resultado de la priorización sería el mismo sin el DñE no es ni automático ni sencillo. La primera reflexión que es necesaria hacer es remarcar que conceptualmente la comparación sin la homogeneización es impropio. Este apartado se lleva a la práctica para visualizar numéricamente los cambios que ocasionaría dicho procedimiento, aunque se insiste en que se comete un error teórico.

Para poder evaluar las actuaciones solamente con el árbol de decisión, se han dividido los intervalos de las funciones de valor por 5 (valor máximo del DñE), y se han realizado los ajustes necesarios para mantener la esencia de las mismas. Estas medidas correctivas, que solamente se han aplicado en aquellos indicadores en los que interviene el DñE, eran necesarias porque, sin el DñE, las puntuaciones no podían llegar hasta los mismos valores. Debido a la modificación realizada en el árbol de decisión, esta nueva priorización va a denominarse IP\_AM.

El resultado de analizar las actuaciones solamente con el árbol de decisión se presenta en la tabla 7.11. Sorprende la poca discriminación que evoca el resultado en referencia a las tres primeras actuaciones. De hecho, con tal resultado es muy difícil establecer un orden de prioridad.

Posición	Actuación	IP_AM	Posición	Actuación	IP_AM
1	G3	0,590	7	E1	0,268
2	E2	0,589	8	F1	0,220
3	G1	0,585	9	C2	0,197
4	D1	0,470	10	C1	0,098
5	G2	0,409	11	F2	0,082
6	B1	0,360	12	A1	0,032

Tabla 7.11.- Priorización de actuaciones con el árbol modificado (IP\_AM)

En la tabla 7.12 se compara la priorización realizada con el árbol modificado sin DñE (IP\_AM) con la priorización del IPGOH<sub>E</sub>. Nueve son las actuaciones que varían su posición, lo que, sin duda, es una diferencia notable. De todas formas, son dos los casos remarcables. El primero es el de la actuación G\_3, que pasa del cuarto lugar al primero.

Otro caso muy llamativo es el de la actuación G\_2 que en el IPGOH<sub>E</sub> se situaba en noveno lugar (el mismo que ocupaba en IP\_DñE) y que en la priorización del IP\_AM se sitúa en quinto, lo que significa que gana 4 posiciones y entraría a formar parte del grupo delantero, lo que haría con cierta solvencia numérica.

Actuación	Posición		
	IPGOH <sub>E</sub>	IP_AM	IP_AM vs IPGOH <sub>E</sub>
E_2	1	2	▼ 1
G_1	2	3	▼ 1
D_1	3	4	▼ 1
G_3	4	1	▲ 3
B_1	5	6	▼ 1
F_1	6	8	▼ 2
C_2	7	9	▼ 2
E_1	8	7	▲ 1
G_2	9	5	▲ 4
C_1	10	10	=
F_2	11	11	=
A_1	12	12	=

Tabla 7.12.- Comparativa entre la priorización del IP\_AM y la del IPGOH<sub>E</sub>

A modo de resumen se presenta la figura 7.5 donde se hace una representación gráfica de la variación de posición de las distintas actuaciones estudiadas según sea el sistema de análisis, IP\_DñE o IP\_AM con respecto a IPGOH<sub>E</sub>.

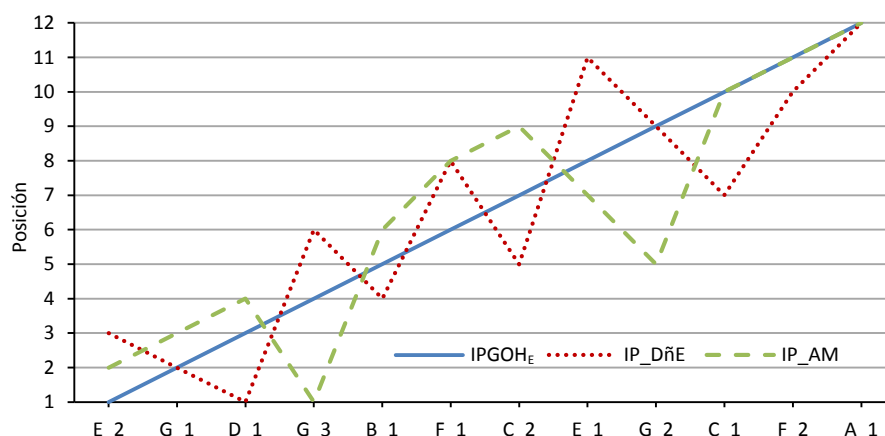


Figura 7.5.- Variación de posición de las actuaciones en función del sistema de cálculo

Por todo lo expuesto, es razonable afirmar que la fase de homogeneización es necesaria a nivel teórico y determinante en la obtención de resultados, aunque no se puede hacer la priorización solamente con ella.



#### 7.4.4.- Estudio estadístico

Obtenidos los primeros resultados con el IPGOH<sub>E</sub> se deben analizar desde un punto de vista estadístico algunos resultados de la metodología para extraer conclusiones de carácter general. En este sentido, es fundamental estudiar tanto la capacidad discriminante del IPGOH<sub>E</sub>, como la capacidad discriminante de cada uno de los indicadores.

##### 7.4.4.1.- Capacidad discriminante del IPGOH<sub>E</sub>

Para que el sistema metodológico tenga sentido en sí mismo, es necesario que la IPGOH<sub>E</sub> sirva para clasificar las múltiples actuaciones que se evalúen con esta herramienta. De nada serviría el trabajo realizado si el resultado del IPGOH<sub>E</sub> fuera, por norma general, muy similar para todas las actuaciones, pues la herramienta no facilitaría la decisión del técnico que la implementase.

En base a los resultados obtenidos en la primera priorización, se realiza un pequeño estudio con el objetivo de demostrar que la herramienta es discriminante, es decir, que tiene la facultad de generar diferencia entre la valoración de una actuación y la de las otras, teniendo en cuenta que cuanta más variabilidad en el resultado, mucho mejor.

Para hacer una valoración de este tipo, con carácter de conjunto, la estadística descriptiva suele utilizar el Coeficiente de Variación de Pearson (Cv), que expresa la desviación típica ( $\sigma$ ) como porcentaje de la media aritmética ( $|\bar{x}|$ ), según se muestra en la ecuación 7.1.

$$Cv = \frac{\sigma}{|\bar{x}|} \cdot 100 \quad [\text{ec. 7.1}]$$

En este tipo de estudios se entiende, por norma general, que un  $Cv > 25\%$  representa una muestra con dispersión, siendo ésta muy alta si  $Cv > 50\%$ . Algunos autores son algo más restrictivos, como puede ser Acuña (2010), considerando que solamente se puede afirmar que existe dispersión cuando  $Cv > 30\%$ . El objetivo es demostrar que la dispersión de resultados es alta ( $Cv > 30\%$ ) para, así, poder asegurar que el IPGOH<sub>E</sub> es discriminante.

Otra manera de analizar de forma relativa la capacidad discriminante es la que plantea Morales (2008), que consiste en comparar la desviación típica del IPGOH<sub>E</sub> con su desviación típica máxima, que es la mitad del rango de valores en los que el IPGOH<sub>E</sub> puede situarse, tal y como se indica en la ecuación 7.2. En este caso el rango máximo es 0,7, pues la puntuación mínima que se considera razonable es 0,1 y la máxima es 0,8. Este nuevo coeficiente, al que se va a denominar Coeficiente de Discriminación (Cd), expresa la desviación típica ( $\sigma$ ) como porcentaje de la desviación típica máxima ( $\sigma_{\max}$ ), según se muestra en la ecuación 7.3. La interpretación de dicho porcentaje se puede realizar en base al mismo criterio que el utilizado para el Coeficiente de Variación.

$$\sigma_{\max} = \frac{\text{Puntuación máx posible} - \text{Puntuación min posible}}{2} = \frac{\text{Rango}}{2} \quad [\text{ec. 7.2}]$$

$$Cd = \frac{\sigma}{\sigma_{\max}} \cdot 100 = \frac{\sigma}{\frac{\text{Rango}}{2}} \cdot 100 \quad [\text{ec. 7.3}]$$

En la tabla 7.13 se presenta el Coeficiente de Variación (Cv) y el Coeficiente de Discriminación (Cd) del IPGOH<sub>E</sub>, así como los datos necesarios para calcularlos. Como puede verse, ambos coeficientes superan el 30 %, y además el Cd supera el 50 %, lo que significa que existe una dispersión de resultados que aseguran la discriminación entre alternativas, como ya se intuía en los resultados presentados en la tabla 7.7 y en el gráfico 7.4.

	$ \bar{x} $	$\sigma$	$\sigma_{\max}$	Cv	Cd
IPGOH <sub>E</sub>	0,410	0,187	0,35	<b>45,58 %</b>	<b>53,33 %</b>

Tabla 7.13.- Coeficiente de Variación (Cv) y Coeficiente de Dispersión (Cd) del IPGOH<sub>E</sub>

Con el objetivo de poder asegurar que esta capacidad discriminante se va a repetir en las distintas aplicaciones del IPGOH<sub>E</sub>, se calcula el intervalo de confianza del 95% para el Cv y para el Cd.

El IPGOH<sub>E</sub>, al obtenerse del sumatorio de muchas variables, presenta las características propias de una distribución normal, de la que se desconoce la varianza de la población y en la que la muestra es pequeña (<30), por tanto, para calcular intervalo de confianza del Coeficiente de Variación de la población ( $\gamma_v$ ) debe utilizarse la distribución T de Student, tal y como indica Abdi (2010), según se muestra en la ecuación 7.4.

$$\gamma_v = \widehat{Cv} \pm t_{\alpha,v} \cdot \widehat{S_{Cv}} \quad [\text{ec. 7.4}]$$

donde:  $\widehat{Cv} = \left(1 + \frac{1}{4 \cdot m}\right) \cdot Cv$ , con  $m$  = tamaño de la muestra

$$\widehat{S_{Cv}} = \frac{\widehat{Cv}}{\sqrt{2m}}$$

$t_{\alpha,v}$  es la T de Student con una significación  $\alpha$  y con  $v = m-1$  grados de libertad

aquí:  $\widehat{Cv} = \left(1 + \frac{1}{48}\right) \cdot 0,4558 = 0,4652$

$$\widehat{S_{Cv}} = \frac{\widehat{Cv}}{\sqrt{2 \cdot 12}} = \frac{0,4652}{\sqrt{24}} = 0,0949$$

$$t_{0,95,11} = 2,201$$

$$\gamma_v = \widehat{Cv} \pm t_{\alpha,v} \cdot \widehat{S_{Cv}} = 0,4652 \pm 2,201 \cdot 0,0949 = 0,4652 \pm 0,2047 \quad [\text{ec. 7.5}]$$

En consecuencia se puede concluir que el valor del Coeficiente de Variación de la población ( $\gamma_v$ ) va a encontrarse con un 95% de probabilidad en el intervalo [0,2562 ,

0,6742] lo que garantiza que va a ser discriminante, al encontrarse todo el intervalo por encima del 0,25, si se hace el razonamiento en tanto por uno.

Un planteamiento similar puede aplicarse para calcular el intervalo de confianza en que se encontraría el Coeficiente de Discriminación de la población ( $\psi_v$ ) con un 95% de probabilidades, tal y como se muestra en la ecuación 7.6.

$$\psi_v = \widehat{Cd} \pm t_{0,95,11} \cdot \widehat{S_{Cd}} = 0,5444 \pm 2,201 \cdot 0,1111 = 0,5444 \pm 0,2396 \quad [\text{ec. 7.6}]$$

aquí:  $\widehat{Cd} = \left(1 + \frac{1}{48}\right) \cdot Cd = 0,5444$

$$\widehat{S_{Cd}} = \frac{\widehat{Cd}}{\sqrt{2 \cdot 12}} = \frac{0,5444}{\sqrt{24}} = 0,1111$$

$$t_{0,95,11} = 2,201$$

En consecuencia se puede concluir que el valor del Coeficiente de Discriminación de la población ( $\psi_v$ ) va a encontrarse con un 95% de probabilidad en el intervalo [0,2998 , 0,7898] lo que garantiza que va a ser discriminante, al encontrarse todo el intervalo por encima del 0,25, si, como en el caso anterior, se hace el razonamiento en tanto por uno.

#### 7.4.4.2.- Capacidad discriminante de los indicadores

Una vez se ha demostrado que el IPGOH<sub>E</sub> tiene la facultad de crear diferencia entre las distintas alternativas es el momento de realizar un estudio, con un carácter similar, para valorar si los indicadores por separado también poseen esta cualidad. Si un indicador no contribuye a diferenciar actuaciones en el conjunto del estudio, por muy importante que sea la información que aporta, esta no es significativa a la hora de tomar la decisión, y en consecuencia, en su medición se realiza un esfuerzo que es en vano.

Para el desarrollo de dicho estudio se necesita conocer la aportación que realiza cada indicador al IPGOH<sub>E</sub> de cada actuación. Esta información se presenta en la tabla 7.14, además se especifica el rango en el que se puede mover el valor del indicador, un rango que es igual al peso de dicho indicador. Para facilitar la visualización de estos datos, en la figura 7.6 se adjunta un gráfico de barras para cada actuación donde se representa la información de la tabla anterior.

En esta serie de gráficos puede verse que en mayor o menor medida todos los indicadores contribuyen al IPGOH<sub>E</sub>. Son, eso sí, el PoE y el CAU los que lo hacen en mayor medida, siendo totalmente lógico, al ser los indicadores con más peso en el árbol de decisión. Es de destacar la inmensa importancia del PoE en la valoración de G\_3, G\_2, E\_1 y D\_1, que son las cuatro actuaciones que quedan mejor clasificadas por el IPGOH<sub>E</sub>.

Los indicadores que aportan menos valor al IPGOH<sub>E</sub> son el VAA, AMV e IPE, aunque su aportación no se puede menospreciar, ya que en algunos casos es bastante importante. Así por ejemplo, esta suma llega a valores de 0,107, 0,092 y 0,081 en las actuaciones E\_2,

B\_1 y G\_1 respectivamente. Siendo especialmente importante en el caso de B\_1 donde el 0,092 representa el 19% del valor total (0,482) asignado a la actuación.

Indicador	Rango	Actuaciones											
		A_1	B_1	C_1	C_2	D_1	E_1	E_2	F_1	F_2	G_1	G_2	G_3
PoE	0-0,210	0,003	0,025	0,017	0,024	0,162	0,025	0,187	0,054	0,007	0,209	0,007	0,200
PRC	0-0,090	0,032	0,090	0,053	0,078	0,024	0,069	0,064	0,069	0,033	0,054	0,083	0,044
SEA	0-0,100	0,004	0,077	0,007	0,050	0,092	0,034	0,096	0,045	0,006	0,091	0,006	0,091
PME	0-0,100	0,004	0,022	0,008	0,010	0,025	0,005	0,058	0,008	0,007	0,050	0,007	0,066
RND	0-0,097	0,000	0,011	0,010	0,002	0,097	0,000	0,096	0,001	0,001	0,093	0,024	0,089
VAA	0-0,052	0,000	0,050	0,004	0,000	0,050	0,000	0,051	0,000	0,000	0,036	0,000	0,000
CAU	0-0,17	0,130	0,165	0,136	0,147	0,169	0,158	0,093	0,159	0,124	0,082	0,145	0,036
AMV	0-0,087	0,001	0,000	0,007	0,006	0,010	0,003	0,031	0,003	0,005	0,031	0,003	0,031
IPE	0-0,087	0,000	0,042	0,013	0,000	0,000	0,000	0,025	0,000	0,044	0,014	0,000	0,010
<b>IPGOH<sub>E</sub></b>	<b>0-1</b>	<b>0,174</b>	<b>0,482</b>	<b>0,255</b>	<b>0,317</b>	<b>0,628</b>	<b>0,293</b>	<b>0,701</b>	<b>0,337</b>	<b>0,227</b>	<b>0,660</b>	<b>0,275</b>	<b>0,566</b>

Tabla 7.14.- Contribución de los indicadores al valor final del IPGOH<sub>E</sub>

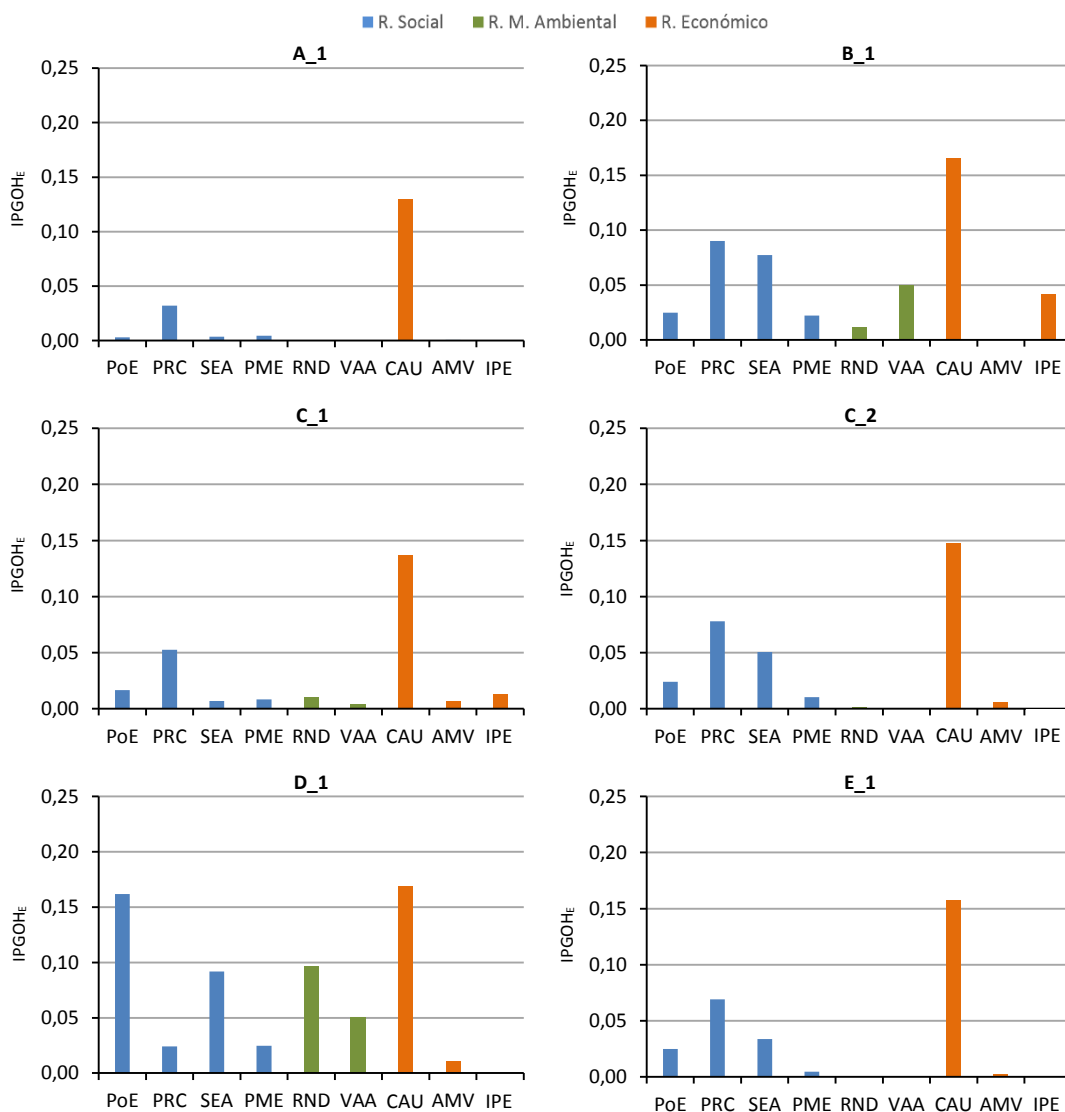


Figura 7.6.-Contribución de cada indicador al IPGOH<sub>E</sub>

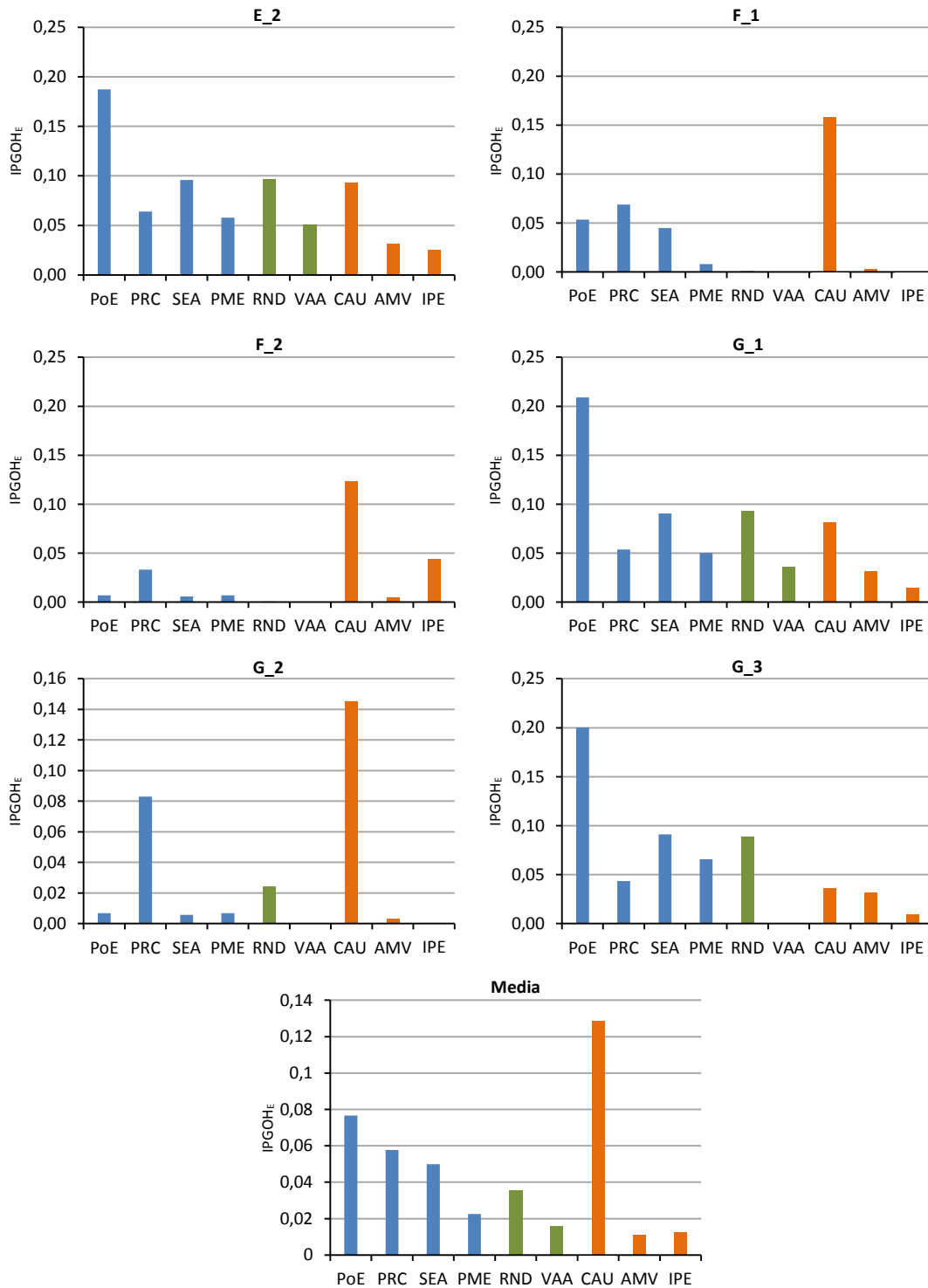


Figura 7.6 (Cont.)- Contribución de cada indicador al IPGOH<sub>E</sub>

El análisis de la capacidad discriminante de cada indicador se plantea en base a la misma filosofía que el del IPGOH<sub>E</sub>, es decir, se sustenta en el análisis de parámetros relativos aunque, de las medidas utilizadas en el apartado anterior, solamente se utiliza el Coeficiente de Discriminación. Al tenerse que analizar los indicadores por separado, pero bajo una visión de conjunto, se descarta el Cv porque no incluye el peso (rango) del indicador, con lo cual no puede valorarse el grado en que la posible variabilidad del indicador va a contribuir a realizar diferencia en el resultado final del IPGOH<sub>E</sub>.

En la tabla 7.15 se presenta el coeficiente de discriminación de cada indicador con el objetivo de verificar su capacidad para generar diferenciación entre una alternativa y las otras en el resultado final del IPGOH<sub>E</sub>. El Cd se ha calculado con el procedimiento explicado en el apartado anterior. El resultado se muestra de forma gráfica en la figura 7.7, donde en línea continua se marca el límite más restrictivo del 30% y en discontinua el límite más generalizado del 25%.

Indicador	Peso	$\sigma_{max}$	$\sigma$	Cd (%)
PoE	0,21	0,105	0,085	<b>81,09</b>
PRC	0,09	0,045	0,021	<b>47,45</b>
SEA	0,10	0,05	0,038	<b>76,90</b>
PME	0,10	0,05	0,023	<b>45,06</b>
RND	0,0975	0,0487	0,044	<b>89,34</b>
VAA	0,0525	0,0262	0,023	<b>87,51</b>
CAU	0,1750	0,0875	0,040	<b>45,50</b>
AMV	0,0875	0,0437	0,012	<b>28,57</b>
IPE	0,0875	0,0437	0,016	<b>37,35</b>

Tabla 7.15.- Coeficiente de dispersión (Cd) de cada indicador

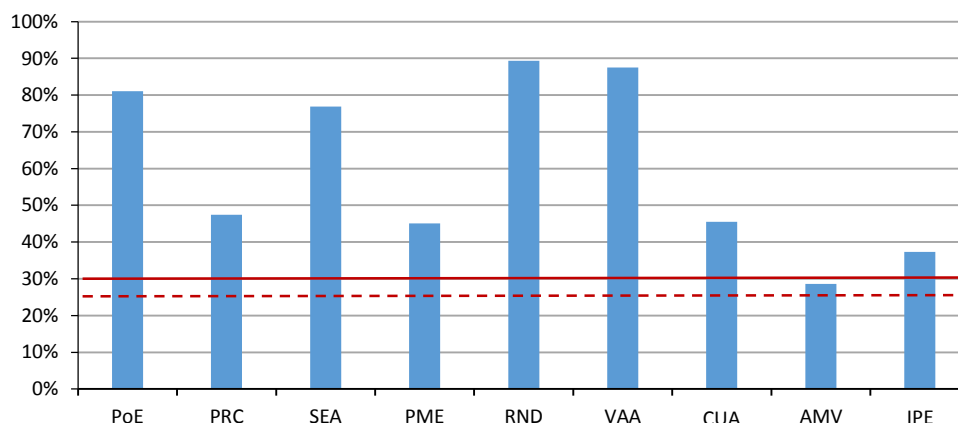


Figura 7.7.- Coeficiente de dispersión (Cd) de cada indicador

El Cd calculado demuestra que los indicadores tienen capacidad discriminante en el sí del IPGOH<sub>E</sub>. Todos tienen un Cd > 30%, a excepción del AMV que, en todo caso, es superior 25%, tal y como puede verse en la figura 7.7. Por tanto, puede asegurarse que todos los indicadores contribuyen a la discriminación entre las actuaciones, a pesar de que los pesos den más representatividad a unos indicadores que a otros. Así, los que más contribuyen a crear diferenciación son: RND, VAA y PoE, mientras que los que menos contribuyen son IPE y AMV. El indicador CAU, al aportar un valor significativo a todas las actuaciones, no es de los indicadores más discriminantes y presenta un Cd relativamente bajo (45,5). En cambio, RND y VAA se han rebelado como los dos indicadores más discriminantes cuando su aportación, en valor absoluto, al conjunto del IPGOH<sub>E</sub> no era excesivamente significativa.

## 7.5.- EVALUACIÓN Y PRIORIZACIÓN DE ACTUACIONES DE LA ACA

En el presente apartado se presenta de forma conjunta la evaluación y priorización realizadas con el  $IPGOH_A$  de las actuaciones de la ACA, propuestas en la tabla 7.4. El objetivo es comprobar la capacidad de la herramienta de adaptarse a unos criterios de decisión que distan ligeramente de los que condujeron el desarrollo del  $IPGOH_E$  y que se materializan con la variación de los pesos de algunos componentes del árbol de decisión.

El desarrollo del apartado es similar al del 7.4, si bien la exposición de resultados se presenta de forma más directa. Sirva como ejemplo el hecho que en esta aplicación práctica no se analiza de forma detallada ningún caso de estudio dado que la sistemática es exactamente la misma que la presentada en el apartado 7.4.1. Asimismo, en el anexo 8 también se presenta una ficha resumen con la información más relevante de cada una de las actuaciones evaluadas.

### 7.5.1.- Evaluación conjunta y priorización de actuaciones de la ACA

Tal y como establece la metodología propuesta, la evaluación de las siete actuaciones de la ACA a priorizar se va a dividir en la Fase 1, de homogeneización, y en la Fase 2, donde se calcula el  $IPGOH_A$ .

En la tabla 7.16, se presenta la puntuación asignada a las cuatro variables que permiten calcular el *Daño Estructural* (DñE) de cada actuación. Al tener menos actuaciones a priorizar que en el caso de Endesa, las variables que conforman el DñE tienen unas evaluaciones con menor variación de puntuaciones. Esto redundaría en que el propio DñE se encuentre en un intervalo de valores algo más reducido, de 2,80 (actuación I\_1) hasta 4,25 (actuación K\_2), aunque sigue permitiendo diferenciar unas actuaciones de las otras.

Variable	Actuación						
	H_1	I_1	J_1	K_1	K_2	L_1	M_1
GrD	4	2	4	4	4	5	3
UbD	3	5	3	5	5	1	3
ExD	5	3	5	5	5	5	2
EvD	3	3	1	1	3	1	5
<b>DñE</b>	<b>3,55</b>	<b>3,35</b>	<b>3,15</b>	<b>3,85</b>	<b>4,25</b>	<b>2,80</b>	<b>3,30</b>

Tabla 7.16.- Puntuación del DñE y de las variables que lo determinan

La Fase 2 de la evaluación, la que permite obtener el  $IPGOH_A$ , se presenta en la tabla 7.17. En ella se muestra la puntuación de las distintas variables que conforman los indicadores, la puntuación del indicador, el valor del mismo y el resultado final del  $IPGOH_A$  de cada actuación, de forma análoga a como se hizo para el caso de Endesa.

Variable	Actuaciones						
	H_1	L_1	J_1	K_1	K_2	L_1	M_1
NPA	2	1	1	5	2	1	3
TOE	4	3	2	5	5	1	2
PoE	8,52	4,69	4,26	19,25	11,05	2,8	9,24
V <sub>PoE</sub>	0,500	0,153	0,157	0,983	0,641	0,038	0,565
DOC <sub>1</sub>	3	3	5	5	3	1	3
DOC <sub>2</sub>	4	1	4	3	2	0	1
DOC <sub>3</sub>	2	0	3	0	4	0	0
Hic	1	1	5	1	1	1	1
PCR	12,9	6,85	20,9	12,55	12,2	2,5	6,85
V <sub>PCR</sub>	0,744	0,151	1	0,721	0,697	0,010	0,254
ATI	4	2	1	3	3	1	3
tIS	5	2	5	5	5	1	5
SEA	71	13,4	15,75	57,75	63,75	2,8	49,5
V <sub>SEA</sub>	0,925	0,356	0,408	0,874	0,900	0,061	0,827
V	1	1	1	5	1	1	1
I	3	1	1	5	5	1	1
S	1	1	1	3	1	1	1
R	5	1	1	3	3	1	1
PME	35,5	13,4	12,6	61,6	42,5	11,2	13,2
V <sub>PME</sub>	0,328	0,097	0,089	0,600	0,401	0,075	0,095
InI	5	1	1	5	5	1	3
ExI	5	1	1	5	5	1	2
DuI	3	1	1	3	3	1	2
TEN	1	1	1	1	1	1	1
RND	99,4	20,1	18,9	107,8	119	16,8	49,5
V <sub>RND</sub>	0,494	0,015	0,012	0,555	0,631	0,009	0,137
InI	3	1	1	1	3	1	1
ExI	5	1	1	1	5	1	1
DuI	5	1	1	1	5	1	1
TEN	1	1	1	1	1	1	1
VAA	24	6	6	6	24	6	6
V <sub>VAA</sub>	0,733	0	0	0	0,733	0	0
IIn	8,5·10 <sup>5</sup>	13500	24500	2,8·10 <sup>3</sup>	7,5·10 <sup>5</sup>	19200	51400
ViU	20	5	20	10	20	20	20
CAU	1,2·10 <sup>4</sup>	805,9	388,8	7,3·10 <sup>3</sup>	8,8·10 <sup>3</sup>	3,4·10 <sup>2</sup>	7,7·10 <sup>2</sup>
V <sub>CAU</sub>	0,690	0,977	0,988	0,802	0,765	0,990	0,977
GAS	30000	0	30000	30000	25000	0	15000
ζ	70	0	100	50	90	0	100
AMV	21000	0	30000	10000	22500	0	15000
V <sub>AMV</sub>	0,131	0	0,265	0,067	0,150	0	0,067
max GWh <sub>p</sub>	8,20	81,70	8,59	0	0	0	0
FIP	0	0	75	0	0	0	0
π	0	0	1	0	0	0	0
IPE	0	0	6,444	0	0	0	0
V <sub>IPE</sub>	0	0	0,047	0	0	0	0
<b>IPGOH<sub>A</sub></b>	<b>0,568</b>	<b>0,355</b>	<b>0,464</b>	<b>0,691</b>	<b>0,638</b>	<b>0,267</b>	<b>0,500</b>

Tabla 7.17.- IPGOH<sub>A</sub> de cada actuación y puntuación y de las variables que lo determinan



Ante las valoraciones obtenidas por las distintas actuaciones, puede afirmarse, en un análisis preliminar, que el índice de priorización también muestra capacidad discriminante. El  $IPGOH_A$  se sitúa entre 0,267 (L\_1) y 0,691 (K\_1), lo que representa un rango de valores de 0,424, magnitud notable, si bien es menor que el obtenido en la aplicación anterior, como así era de esperar, dado el menor número de casos a estudiar.

El resultado obtenido se muestra de forma gráfica en la figura 7.8, donde las barras muestran, además del resultado conjunto, la aportación numérica de cada requerimiento. En este caso la media aritmética ( $\bar{x}$ ) es 0.497, mientras que la desviación típica ( $\sigma$ ) es 0,151. La media aritmética es ligeramente superior a la que se obtenía en el análisis de las actuaciones de Endesa, sin que este resultado tenga significación alguna, pues como se verá en el apartado 7.6 esta ligera diferencia viene causada solamente por la variación de pesos que existe entre el modelo de Endesa ( $IPGOH_E$ ) y el modelo de la ACA ( $IPGOH_A$ ).

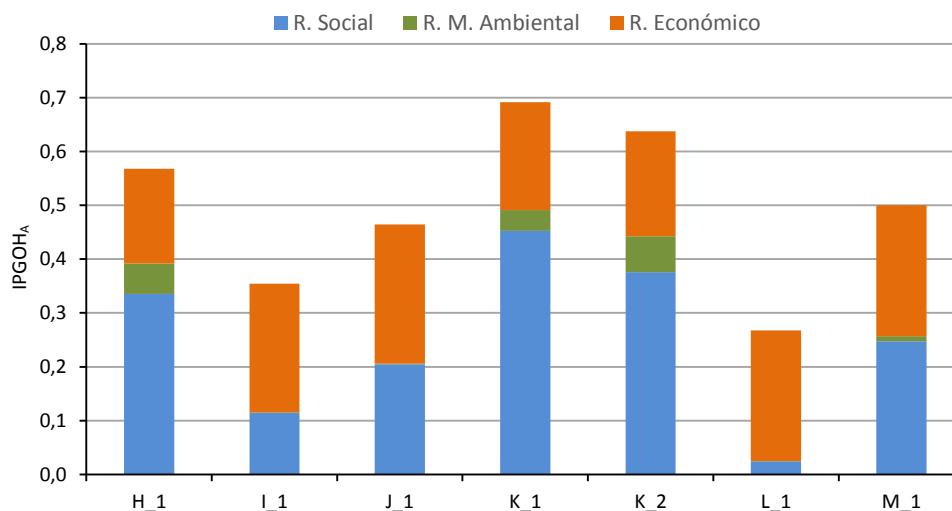


Figura 7.8.- Representación gráfica del  $IPGOH_A$  de las actuaciones de la ACA

En la tabla 7.18 se presentan las siete actuaciones ordenadas en función de su contribución al desarrollo sostenible, es decir, de mayor a menor  $IPGOH_A$ , siendo así más fácil la interpretación de los resultados. Se aprovecha la última columna de la tabla para asignar un nivel de prioridad a cada una de las actuaciones. En este caso, tal y como se prevé que suceda en la mayoría de casos, las actuaciones se agrupan en los tres grupos centrales (B, C y D).

En este caso, a diferencia de la priorización de Endesa, las dos actuaciones mejor valoradas corresponden a la misma presa. Otra diferencia es que la actuación que obtiene una mejor puntuación está vinculada al Cuerpo de Presa, mientras que en el caso anterior era una actuación vinculada a un Órgano Afín, demostrándose que cualquier afectación que sea de relevancia va a quedar bien posicionada, sin ser determinante el elemento afectado. En este sentido se debe resaltar, también, que las unidades estructurales afectadas (UEA) se reparten, una vez más, de forma indistinta a lo largo de la lista ordenada de actuaciones (no se debe dar mayor importancia al hecho que las dos actuaciones vinculadas a los estribos hayan quedado en los dos últimos lugares).

Posición	Actuación	UEA	IPGOH <sub>A</sub>	Nivel
1	K_1	CP	0,691	B
2	K_2	OA	0,638	B
3	H_1	OA	0,568	C
4	M_1	Vs	0,500	C
5	J_1	OA	0,464	C
6	I_1	Es	0,355	D
7	L_1	Es	0,267	D

Tabla 7.18.- Priorización de actuaciones de la ACA según IPGOH<sub>A</sub>

Finalmente, se presenta, en la figura 7.9, un gráfico de barras con la priorización de actuaciones. La barra de cada actuación está representada por el color del nivel en el que ésta queda clasificada.

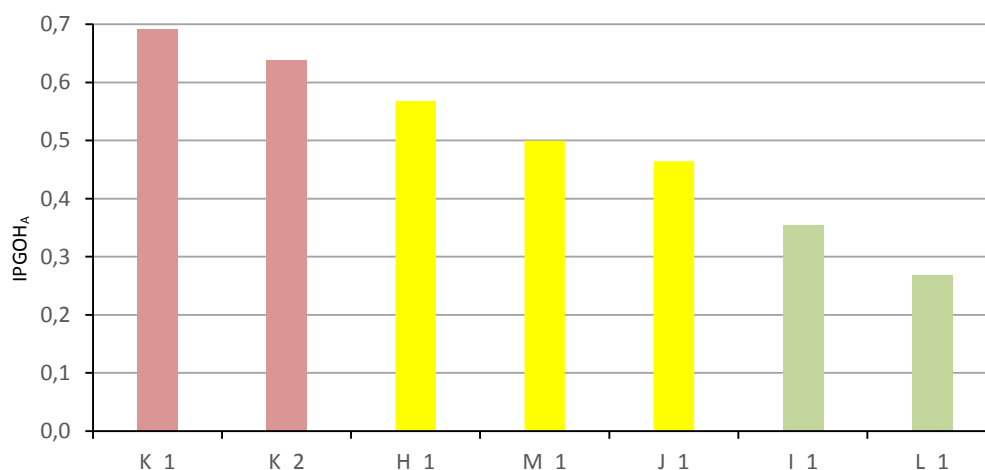


Figura 7.9.- Priorización gráfica de las actuaciones de la ACA según el IPGOH<sub>A</sub>

### 7.5.2.- Análisis general de resultados

Para cerrar este apartado, dedicado a la priorización de las actuaciones de la ACA, se hace un breve análisis de los resultados particulares obtenidos en esta aplicación. Un estudio que intenta ser tan riguroso como el presentado en el apartado anterior, si bien es menos descriptivo, ya que las reflexiones de carácter general no varían de un caso al otro y no se han repetido.

#### 7.5.2.1.- Valoración global de la priorización

La primera y más importante valoración que se debe resaltar es que la priorización obtenida mediante el IPGOH<sub>A</sub> conduce a un resultado lógico, en la opinión de los técnicos de la ACA, que como en el caso de Endesa, son quienes mejor conocen las necesidades de sus estructuras. También los técnicos de la UPC consideran el resultado coherente de acuerdo con los planteamientos y la experiencia adquirida a lo largo de los años.

En este caso la validez de la priorización no puede evaluarse mediante la comparación con el de un método similar, al carecer la ACA de una herramienta propia de priorización. Ante este panorama, debe prevalecer el criterio experto de los técnicos a la hora de valorar la metodología.

Las actuaciones que quedan mejor posicionadas son las tres actuaciones que pueden evitar unas mayores consecuencias sociales, como era de esperar al ser este el requerimiento que más peso tiene en la decisión. Por si esto fuera poco, estas actuaciones, además, son las que mayor esfuerzo hacen por mantener de forma adecuada el medio ambiente, a pesar de que este sea al requerimiento menos valorado.

En las dos actuaciones peor clasificadas (L\_1 y I\_1) el IPGOH<sub>A</sub> se obtiene casi de forma exclusiva del requerimiento económico al tratarse de dos actividades que suponen una inversión muy reducida y que no hacen ninguna aportación significativa a nivel social y ambiental. De esta manera, se demuestra, una vez más, que las actuaciones que no contribuyan al desarrollo sostenible en su dimensión global van a tener dificultades para salir bien posicionadas en la clasificación que establece el IPGOH<sub>A</sub>.

#### 7.5.2.2.- Trascendencia del DñE

En este apartado se vuelve a analizar la importancia del DñE en el resultado final. Para hacerlo en la tabla 7.19 se comprara el resultado obtenido con el IPGOH<sub>A</sub> y la priorización que se obtendría si únicamente se utilizaran los valores del DñE presentados en la tabla 7.16. A simple vista puede verse que la clasificación sufre cambios. A destacar el cambio de posición entre K\_1 y K\_2, siendo la segunda actuación la que pasaría a encabezar la lista de prioridades. También es significativo el cambio de posición que experimentaría la actuación I\_2, que pasaría del penúltimo lugar al cuarto puesto, avanzando 2 posiciones.

Actuación	Posición		
	IPGOH <sub>A</sub>	IP_DñE	IP_DñE vs IPGOH <sub>A</sub>
K_1	1	2	▼ 1
K_2	2	1	▲ 1
H_1	3	3	=
M_1	4	5	▼ 1
J_1	5	6	▼ 1
I_1	6	4	▲ 2
L_1	7	7	=

Tabla 7.19.- Comparativa entre la priorización del IPGOH<sub>A</sub> y la del IP\_DñE

También en esta aplicación práctica se analiza cual sería el resultado sin la fase de homogeneización. Para hacerlo se ha utilizado el mismo árbol que se utilizó en el apartado 7.4.3.2. Se insiste, una vez más, que tal procedimiento es conceptualmente erróneo al compararse unidades estructurales sin relación.

El resultado de analizar las actuaciones solamente con el árbol de decisión modificado (sin DñE) se presenta en la tabla 7.20. Sorprende la poca discriminación que existe entre las actuaciones que se sitúan en la parte media de la tabla (posiciones 2 a 5).

Posición	Actuación	IP_AM	Posición	Actuación	IP_AM
1	K_1	0,567	5	H_1	0,405
2	M_1	0,449	6	I_1	0,271
3	J_1	0,423	7	L_1	0,237
4	K_2	0,411			

Tabla 7.20.-Priorización de actuaciones con el árbol modificado (IP\_AM)

En la tabla 7.21 se compara la priorización realizada con el árbol modificado (IP\_AM) con la priorización del IPGOH<sub>A</sub>. Cuatro de las siete actuaciones cambian de su posición y lo hacen en dos puestos, un cambio nada desdeñable.

Actuación	Posición		
	IPGOH <sub>A</sub>	IP_AM	IP_AM vs IPGOH <sub>A</sub>
K_1	1	1	=
K_2	2	4	▼ 2
H_1	3	5	▼ 2
M_1	4	2	▲ 2
J_1	5	3	▲ 2
I_1	6	6	=
L_1	7	7	=

Tabla 7.21.- Comparativa entre la priorización del IP\_AM y la del IPGOH<sub>A</sub>

A modo de resumen se presenta la figura 7.10 donde se hace una representación gráfica de la variación de posición de las distintas actuaciones estudiadas según sea el sistema de análisis, IP\_DñE o IP\_AM con respecto a IPGOH<sub>A</sub>.

Con todo, como ya se dijo en el apartado 7.4.3.2, la fase de homogeneización no solo es necesaria a nivel teórico sino que es determinante a nivel práctico cuando se desea realizar una priorización.

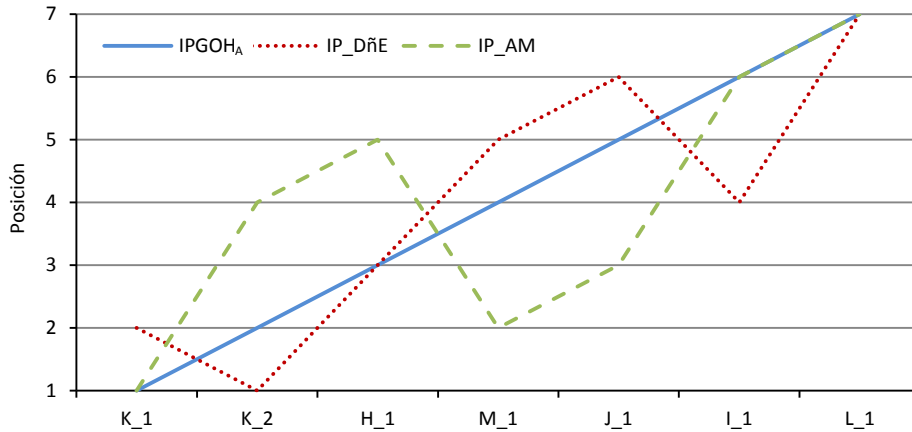


Figura 7.10.- Variación de posición de las actuaciones en función del sistema de cálculo

### 7.5.2.3.- Estudio estadístico

De acuerdo con la teoría expuesta en el apartado 7.4.3, se calcula el Coeficiente de Variación ( $C_v$ ) y el Coeficiente de Discriminación ( $C_d$ ) del  $IPGOH_A$ , cuyos valores se presentan en la tabla 7.22, junto con los datos necesarios para calcularlos. Como puede verse, ambos coeficientes superan el 30% lo que significa que existe una dispersión de resultados que aseguran la discriminación entre alternativas tal y como pudo verse en la tabla 7.18 y en las figuras 7.8 y 7.9, donde se presentaron los resultados obtenidos. Estos valores se encuentran en el interior de los intervalos de confianza calculados con una probabilidad del 95% (§7.4.4.1), constando la validez práctica de ese resultado teórico.

	$\sigma$	$ \bar{x} $	$\sigma_{\max}$	$C_v$	$C_d$
$IPGOH_A$	0,151	0,497	0,35	<b>30,33%</b>	<b>43,12%</b>

Tabla 7.22.- Coeficiente de Variación ( $C_v$ ) y Coeficiente de Dispersión ( $C_d$ ) del  $IPGOH_A$

En esta aplicación particular de la metodología es interesante analizar la aportación que hacen los indicadores a cada una de las actuaciones sobre todo teniendo en cuenta que en la tabla 7.17 ya se puede observar que el indicador IPE no aporta información relevante a la hora de tomar la decisión, pues el  $V_{IPE}$  es igual a cero en seis actuaciones y en la séptima ( $J_1$ ) es prácticamente cero.

Precisamente, para hacer este análisis se presentan la tabla 7.23 y la figura 7.11, donde puede verse de forma numérica y gráfica, respectivamente, la aportación de cada indicador al valor del  $IPGOH_A$  de las distintas actuaciones. Los resultados muestran que los indicadores que menos valor aportan en valor absoluto son VAA, AMV e IPE.

El indicador CAU es el que mayor valor aporta en el  $IPGOH_A$  de todas las actuaciones. Esto es así porque los costes previstos de las actuaciones son bastante reducidos, sobre todo, si se comparan con los costes que tenían las actuaciones que planteaba Endesa, que eran de un orden de magnitud mayor. Este hecho provoca que en este caso se obtengan  $V_{CAU}$  con valores cercanos a 1, de forma sistemática.

Indicador	Actuaciones							
	Rango	H_1	I_1	J_1	K_1	K_1	L_1	M_1
PoE	0-0,210	0,099	0,030	0,018	0,195	0,141	0,008	0,112
PRC	0-0,090	0,098	0,034	0,132	0,095	0,092	0,001	0,034
SEA	0-0,100	0,102	0,039	0,045	0,096	0,099	0,007	0,091
PME	0-0,100	0,036	0,011	0,010	0,066	0,044	0,008	0,011
RND	0-0,097	0,035	0,001	0,001	0,039	0,044	0,001	0,010
VAA	0-0,052	0,022	0,000	0,000	0,000	0,022	0,000	0,000
CAU	0-0,17	0,169	0,239	0,242	0,197	0,188	0,243	0,240
AMV	0-0,087	0,007	0,000	0,014	0,004	0,008	0,000	0,004
IPE	0-0,087	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>IPGOH<sub>A</sub></b>	<b>0-1</b>	<b>0,568</b>	<b>0,355</b>	<b>0,464</b>	<b>0,691</b>	<b>0,638</b>	<b>0,267</b>	<b>0,500</b>

Tabla 7.23.- Contribución de los indicadores al valor final del IPGOH<sub>A</sub>

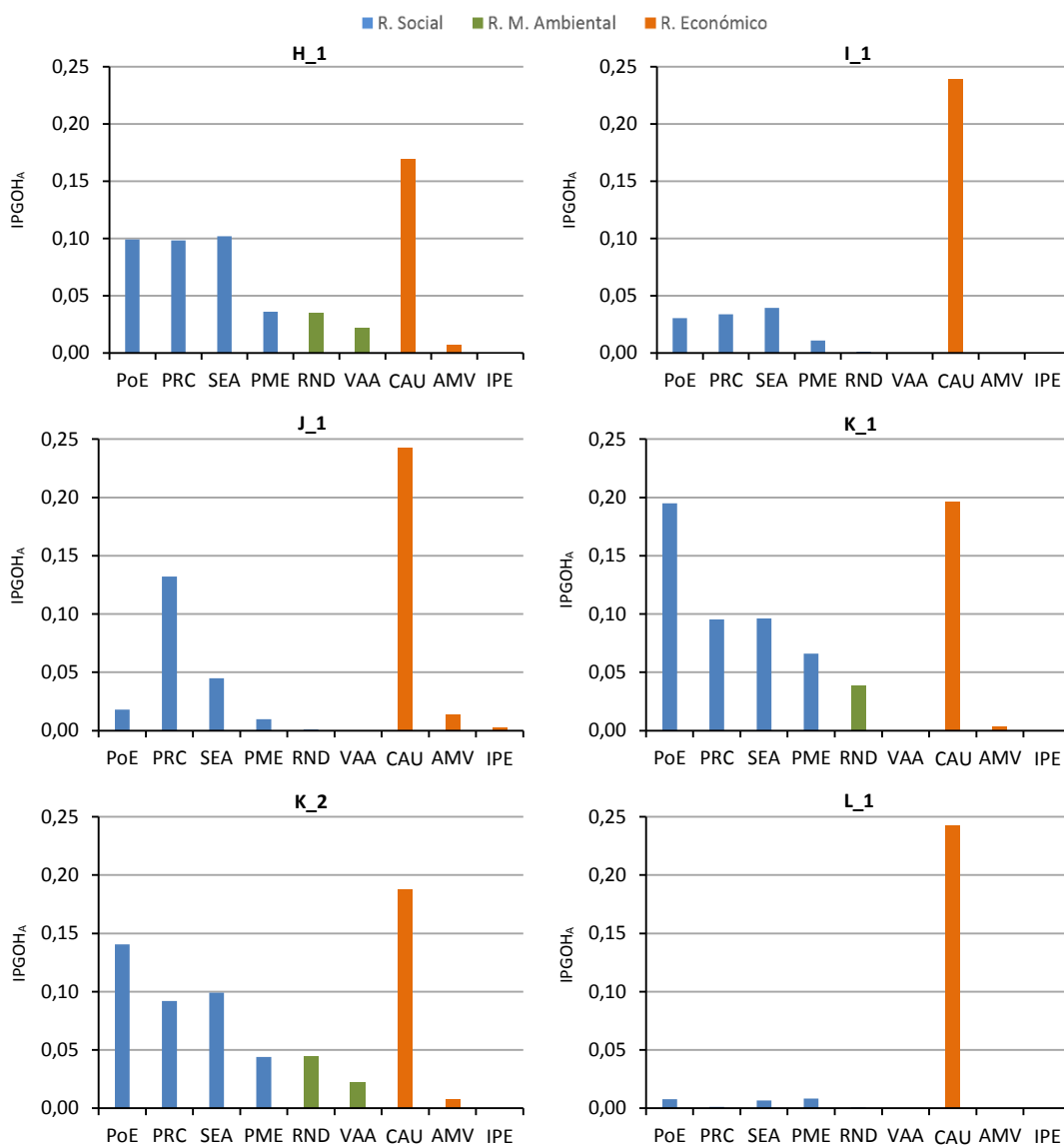


Figura 7.11.-Contribución de cada indicador al IPGOH<sub>A</sub>

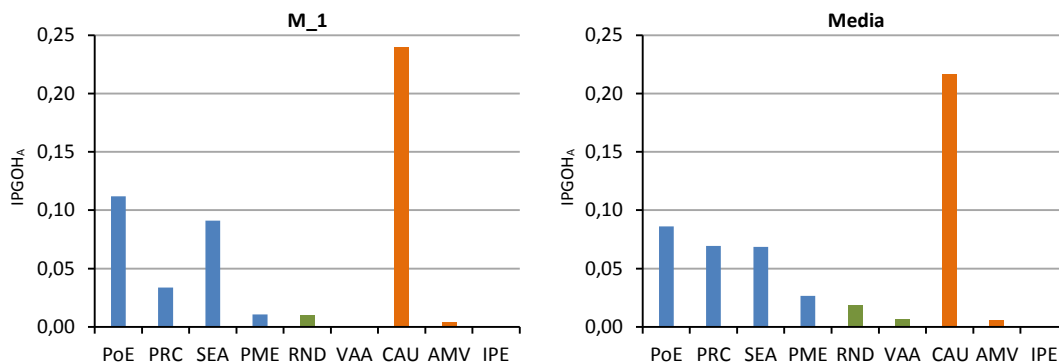


Figura 7.11 (Cont.).-Contribución de cada indicador al IPGOH<sub>A</sub>

En la tabla 7.24 se presenta el Coeficiente de Discriminación de todos los indicadores, completándose la información precedente. Exceptuando los indicadores AMV y, sobre todo, el IPE, que presentan un Cd < 20%, el resto de indicadores contribuyen a generar dispersión en el resultado final del IPGOH<sub>A</sub>, como lo prueba el hecho que presentan un Cd > 30%. A diferencia de lo que se podía pensar, VAA contribuye a la mencionada discriminación, eso sí, lo hace teniendo en cuenta sus modestas posibilidades, al ser el indicador del árbol que menos peso asignado tiene.

Indicador	Peso	$\sigma_{\max}$	$\sigma$	Cd (%)
PoE	0,21	0,105	0,070	<b>66,80%</b>
PRC	0,09	0,045	0,047	<b>103,95%</b>
SEA	0,1	0,05	0,038	<b>75,43%</b>
PME	0,1	0,05	0,023	<b>45,28%</b>
RND	0,0975	0,0487	0,020	<b>40,63%</b>
VAA	0,0525	0,0262	0,011	<b>40,96%</b>
CAU	0,175	0,0875	0,031	<b>35,77%</b>
AMV	0,0875	0,0437	0,005	<b>11,28%</b>
IPE	0,0875	0,0437	0,001	<b>2,14%</b>

Tabla 7.24.- Coeficiente de dispersión (Cd) de cada indicador

La naturaleza de las instalaciones donde se sitúan las actuaciones impide que la deficiencia del IPE pueda corregirse de forma alguna. Si resulta que todo el patrimonio de la ACA tiene características similares (no hay instalaciones hidráulicas de peso asociadas) se podría plantear eliminar este indicador porque en ningún caso ayudaría a tomar una decisión.

Diferente es el caso de AMV. En esta ocasión, y de forma circunstancial, AMV no se ha revelado como un indicador discriminante porque los ahorros se han ajustado muchísimo, con una clara tendencia a la baja. La deficiencia surge del intervalo de valores considerado en la función de valor, [0 , 60.000], un intervalo establecido en base a la experiencia del sector privado que no se ajusta del todo bien a las necesidades particulares de esta aplicación en el sector público. Aunque este es un caso particular que no tendría

por qué repetirse en futuras ocasiones, se podría llegar a plantear la modificación del límite superior de la función de valor (reduciéndolo hasta la mitad) para que se adaptara mejor a las cantidades de ahorro evaluadas.

Es de resaltar el excelente resultado obtenido por el indicador CAU ( $Cd = 35,77\%$ ) a pesar de que las inversiones analizadas se sitúen entre los 10.000 y 1.000.000 de euros, sobre todo cuando la experiencia del sector privado definió una función de valor para discriminar inversiones que costasen entre 100.000 euros y 10.000.000 de euros, es decir, una inversión de un orden de magnitud mayor, como ya se ha comentado. En el caso que se quisiera ajustar el resultado también se podría modificar ligeramente la función de valor para adaptarla a este caso particular, aunque no parece necesario ante la buena respuesta que ha dado el indicador.

## 7.6.- ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Un análisis de sensibilidad consiste, tal y como señala French (2003), en modificar el valor de las variables de un modelo para determinar las consecuencias que puede ocasionar en el resultado final, lo cual se ha revelado fundamental en cualquier metodología de ayuda a la decisión.

El primer estudio consiste en *intercambiar los árboles* analizando los cambios que se generan en la priorización de las actuaciones de Endesa cuando se utiliza el árbol de la ACA y viceversa. Con posterioridad se *modifica el peso de los requerimientos*, los elementos más determinantes en la definición del resultado final de la priorización, analizando su influencia en el resultado final del IPGOH.

Intercambiar los árboles a la hora de priorizar las actuaciones de Endesa y de la ACA permite realizar un análisis de sensibilidad de carácter global, pues existen diferencias múltiples de pesos en requerimientos, criterios e indicadores entre un modelo y el otro. Además, ésta es una variación de pesos surgida del razonamiento técnico, y no de un “juego” matemático, lo que sin duda les transmite mayor importancia dentro de este análisis de sensibilidad.

Para facilitar la interpretación de resultados, en la denominación del IPGOH se va a utilizar un subíndice (como se ha hecho en todo el capítulo) para señalar los pesos que se utilizan en la priorización, y un superíndice para señalar a que compañía pertenecen las actuaciones evaluadas. “E” significa Endesa, y “A” significa ACA. Así, por ejemplo el  $IPGOH_E^A$  mostraría el índice de priorización obtenido de utilizar los pesos de Endesa para priorizar las actuaciones de la ACA.

En la tabla 7.25 y en la figura 7.12a se presenta el resultado obtenido al utilizar los pesos de la ACA para priorizar las actuaciones de Endesa ( $IPGOH_A^E$ ), y se compara con el resultado obtenido en el apartado 7.4.2 al utilizar el árbol de Endesa para priorizar sus propias actuaciones ( $IPGOH_E^E$ ). La priorización obtenida en ambos casos es idéntica, existiendo una ligera modificación en la valoración de las actuaciones. No obstante, las dos



actuaciones mejor valoradas (E\_2 y G\_1) obtienen el mismo valor en el  $IPGOH_A^E$  y en el  $IPGOH_E^E$ .

Actuación	$IPGOH_A^E$		$IPGOH_E^E$	
	Posición	Valor	Posición	Valoración
E_2	1	0,701	1	0,701
G_1	2	0,660	2	0,660
D_1	3	0,656	3	0,628
G_3	4	0,564	4	0,566
B_1	5	0,557	5	0,482
F_1	6	0,434	6	0,338
C_2	7	0,415	7	0,318
E_1	8	0,389	8	0,293
G_2	9	0,365	9	0,275
C_1	10	0,322	10	0,247
F_2	11	0,273	11	0,227
A_1	12	0,242	12	0,174

Tabla 7.25.- Priorización de actuaciones de Endesa según  $IPGOH_A^E$  comparado con  $IPGOH_E^E$

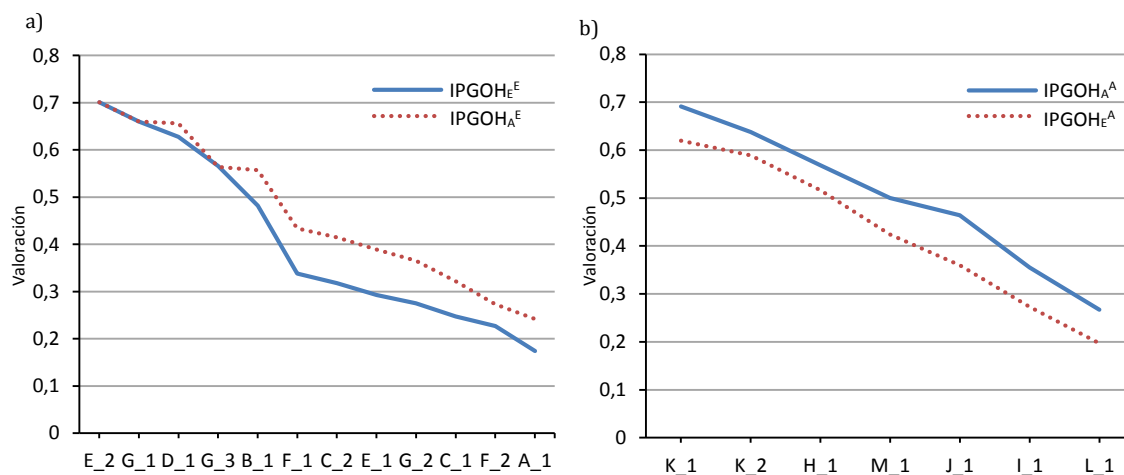


Figura 7.12.-Comparativa de valoraciones: a)  $IPGOH_A^E$  vs  $IPGOH_E^E$ ; b)  $IPGOH_E^A$  vs  $IPGOH_A^A$

Los valores obtenidos en  $IPGOH_A^E$  son de media mayores que los obtenidos por el  $IPGOH_E^E$ , como fácilmente se observa en la figura 7.12a. Al no aumentar el valor de las dos actuaciones mejor valoradas se reduce el intervalo en el que se reparten las actuaciones, disminuyéndose la capacidad discriminante del índice, aunque ésta sigue siendo alta.

En la tabla 7.26 y en la figura 7.12b se presenta el resultado del caso contrario, es decir, el resultado de utilizar los pesos de Endesa para priorizar las actuaciones de la ACA ( $IPGOH_E^A$ ), comparándolo con el resultado obtenido en el apartado 7.5.1 al utilizar el árbol de la ACA para priorizar sus propias actuaciones ( $IPGOH_A^A$ ). Como en el caso

priorización obtenida en ambos casos es idéntica. La única diferencia es la valoración que reciben las distintas actuaciones. Los valores obtenidos en  $IPGOH_E^A$  son menores que los obtenidos en  $IPGOH_A^A$ , como se puede observar en la figura 7.12b, aunque se mantiene el intervalo de valores en el que se reparten las actuaciones.

Actuación	$IPGOH_E^A$		$IPGOH_A^A$	
	Posición	Valoración	Posición	Valoración
K_1	1	0,620	1	0,691
K_2	2	0,589	2	0,638
H_1	3	0,516	3	0,568
M_1	4	0,424	4	0,500
J_1	5	0,360	5	0,464
I_1	6	0,273	6	0,355
L_1	7	0,197	7	0,267

Tabla 7.26.- Priorización de actuaciones de la ACA según  $IPGOH_E^A$  comparado con  $IPGOH_A^A$

Todos los resultados obtenidos hasta el momento demuestran que el modelo de decisión es robusto a cambios en los pesos cuando estos responden a un criterio técnico.

Además, al cruzar los árboles, este análisis de sensibilidad ha permitido que se tengan las actuaciones de Endesa y de la ACA evaluadas por los mismos árboles. Esto posibilita que se haga una valoración de conjunto con los resultados de los parámetros estadísticos globales más significativos, esto es las medias, y los coeficientes de variación y discriminación, que se presentan en la tabla 7.27. Sombreados en azul se presentan los resultados ya mostrados en las tablas 7.13 y 7.22.

	$ \bar{x} $	$\sigma$	$\sigma_{max}$	Cv	Cd
$IPGOH_E^E$	0,410	0,187	0,35	45,58 %	53,33 %
$IPGOH_E^A$	0,425	0,159	0,35	37,46 %	45,55 %
$IPGOH_A^E$	0,464	0,158	0,35	33,99 %	45,15 %
$IPGOH_A^A$	0,497	0,151	0,35	30,33 %	43,12

Tabla 7.27.- Valores de los estadísticos globales más significativos

Cuando las actuaciones de una y otra compañía se evalúan por el mismo árbol las medias que obtienen las actuaciones del Endesa y de la ACA son muy similares, siendo en los dos casos la mínima diferencia favorable a la ACA. Esto significa que las actuaciones que promueven ambas compañías contribuyen de forma muy parecida al desarrollo sostenible. También significa que las políticas desarrolladas por ambas entidades en materia de mantenimiento y conservación son similares. Cabe decir que el árbol de Endesa ( $IPGOH_E$ ) presenta de media aritmética un resultado algo más bajo que el árbol del ACA

(IPGOH<sub>A</sub>) debido, sobre todo, al peso que tienen los indicadores CAU y PCR en el árbol de Endesa.

El valor de los coeficientes de variación (Cd) y discriminación (Cv) que se muestran en la tabla anterior sirven para reforzar la idea de que el modelo de decisión es útil a la hora de discriminar las actuaciones evaluadas, tal y como se había garantizado en a lo largo del capítulo. Esto es así porque el Cv y el Cd se sitúan en todas las combinaciones por encima del 25%, límite inferior que asegura una dispersión suficiente en las evaluaciones

Modificar el peso de los requerimientos permite analizar la sensibilidad del resultado ante posibles cambios en las líneas estratégicas que conducen la política de las entidades que gestionan las estructuras. Para realizar esta tarea se va a modificar el peso de los elementos más relevantes del árbol de Endesa (el original y de referencia) aproximadamente un 20%, porcentaje suficientemente significativo en trabajos de esta índole según indica Piñero (2013). En la tabla 7.28 se muestran los pesos asignados a los requerimientos en las tres variantes propuestas para el estudio.

	Peso Requerimiento		
	Social	M. Ambiental	Económico
IPGOH <sub>E</sub>	0,50	0,15	0,35
Variante 1 (V <sub>1</sub> )	0,40	0,20	0,40
Variante 2 (V <sub>2</sub> )	0,60	0,15	0,25
Variante 3 (V <sub>3</sub> )	0,20	0,40	0,40

Tabla 7.28.- Pesos de los requerimientos utilizados en el análisis de sensibilidad

En la Variante 1 (V<sub>1</sub>) se disminuye el peso del requerimiento social un 20%, pasando su peso de 0,50 a 0,40. El remanente de 0,10 se reparte a partes iguales (0,05) entre el requerimiento medio ambiental y el requerimiento económico, por tanto, el primero experimenta un crecimiento del 33% y el segundo del 14%. El escenario resultante, en el que tienen el mismo peso los requerimientos social y económico, es de difícil materialización, aunque en una situación de gravísima crisis económica podría llegar a plantearse.

En la Variante 2 (V<sub>2</sub>) se aumenta el peso del requerimiento social un 20%, pasando su peso de 0,50 a 0,60. El excedente de 0,10 se reduce solamente del requerimiento económico, que experimenta una modificación porcentual de 29%. En este caso no se ha hecho un reparto equitativo porque el árbol resultante hubiera sido muy parecido al que se definió para priorizar las actuaciones de la ACA. El árbol que se obtiene sería el propio de un periodo en que los recursos económicos son abundantes y no se necesitan excesivas restricciones en esta dirección.

Asimismo, como ejercicio académico, se plantea una Variante 3 ( $V_3$ ) que presenta una distribución de pesos poco realista al reducir un 60% el peso del requerimiento social, hasta dejarlo en un pobre 0,2. En consecuencia, el peso de los otros dos requerimientos aumenta, sobre todo el medio ambiental que crece un 166%, hasta alcanzar un peso de 0,4. El objetivo de la variante es probar que solamente los grandes cambios de pesos repercuten de forma significativa en el resultado final de la priorización.

El resultado obtenido en el análisis de sensibilidad para el caso de las actuaciones de Endesa se muestra en la tabla 7.29. Para cada una de las variantes ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ) se presenta el valor asignado a las distintas actuaciones a priorizar y el orden que ocupan en dicha priorización. También se presenta, para facilitar la comparación el resultado del IPGOH<sub>E</sub><sup>E</sup>.

Actuación	IPGOH <sub>E</sub> <sup>E</sup>		Variante 1 ( $V_1$ )		Variante 2 ( $V_2$ )		Variante 3 ( $V_3$ )	
	Pos.	Valor.	Pos.	Valor.	Pos.	Valor.	Pos.	Valor.
E_2	1	0,701	1	0,690	1	0,740	1	0,724
G_1	2	0,660	3	0,640	2	0,704	3	0,651
D_1	3	0,628	2	0,642	3	0,637	2	0,716
G_3	4	0,566	4	0,527	4	0,624	4	0,484
B_1	5	0,482	5	0,489	5	0,465	4	0,484
F_1	6	0,338	6	0,326	6	0,327	7	0,257
C_2	7	0,318	7	0,308	7	0,306	9	0,245
E_1	8	0,293	8	0,289	8	0,273	10	0,237
G_2	9	0,275	9	0,284	9	0,254	6	0,276
C_1	10	0,247	10	0,265	10	0,227	8	0,250
F_2	11	0,227	11	0,241	11	0,188	11	0,221
A_1	12	0,174	12	0,184	12	0,145	12	0,168

Tabla 7.29.- Resultado del análisis de sensibilidad para el caso de las actuaciones de Endesa

Los resultados de la tabla anterior se presentan de forma gráfica en la figura 7.13. En la figura 7.13a se muestra la valoración que obtienen las distintas actuaciones, mientras que en la figura 7.13b se muestra la posición que ocupa cada una de ellas.

Tanto en la tabla como en las gráficas puede verse que las variantes  $V_1$  y  $V_2$  prácticamente no introducen ninguna modificación en la valoración de las actuaciones. Solamente en el caso de  $V_1$  se experimenta un cambio de posición entre dos actuaciones ( $D_1$  y  $G_1$ ) y la diferencia de puntuación es de 0,002, es decir, prácticamente inexistente. En ambos casos la tendencia de las valoraciones es muy similar a la del IPGOH<sub>E</sub><sup>E</sup>, lo que demuestra, una vez más, la robustez del modelo a cambios lógicos.

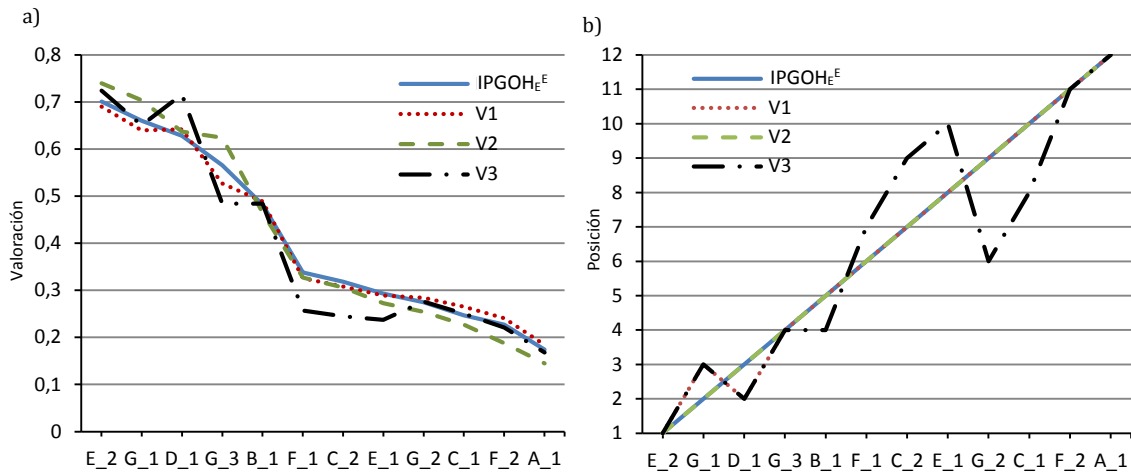


Figura 7.13.-Comparativa entre variantes caso actuaciones de Endesa:

a) Valoraciones; b) Posiciones

Diferente es el caso de la Variante 3. El resultado evoca una notable modificación tanto de las valoraciones como de la priorización. Esta realidad puede detectarse fácilmente en la figura 7.13, donde la línea de ralla-punto negra es la que más se aleja de la tendencia que marca la línea continua azul. Además, esta línea presenta numerosos picos, sinónimos de cambios de posición de actuaciones en la priorización. Por tanto, aunque el modelo se ha comportado de forma robusta ante cambios lógicos en los pesos, el resultado que evoca esta variante alerta de que es sensible cuando se materializan grandes cambios en los pesos, pudiendo alterarse de manera significativa la evaluación y, en consecuencia, la priorización.

El mismo análisis de sensibilidad se plantea con las actuaciones de la ACA, es decir, los pesos utilizados para calcular la aportación a la sostenibilidad de las actuaciones son los mismos que se han presentado en la tabla 7.28, aunque, en este caso, se comparan los resultados con los obtenidos mediante el árbol definido por la ACA ( $IPGOH_A^A$ ). El resultado puede verse en la tabla 7.30 y en las figuras 7.14a y 7.14b.

Actuación	$IPGOH_A^A$		Variante 1 (V1)		Variante 2 (V2)		Variante 3 (V3)	
	Pos.	Valor.	Pos.	Valor.	Pos.	Valor.	Pos.	Valor.
K_1	1	0,691	1	0,575	1	0,662	3	0,479
K_2	2	0,638	1	0,575	2	0,616	1	0,572
H_1	3	0,568	3	0,505	3	0,538	2	0,501
M_1	4	0,500	4	0,407	4	0,421	4	0,332
J_1	5	0,464	5	0,358	5	0,335	5	0,296
I_1	6	0,355	6	0,278	6	0,244	6	0,240
L_1	7	0,267	7	0,217	7	0,152	7	0,210

Tabla 7.30.- Resultado del análisis de sensibilidad para el caso de las actuaciones de la ACA

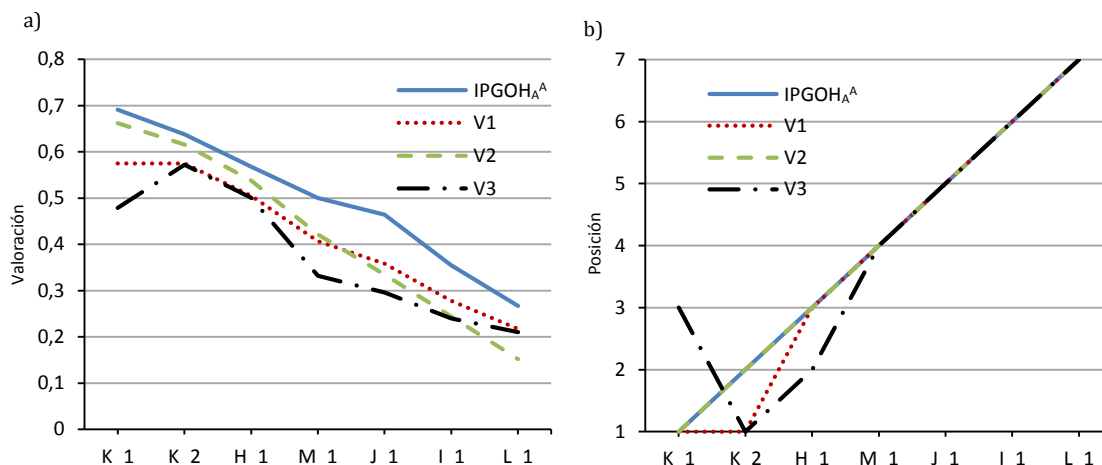


Figura 7.14.-Comparativa entre variantes caso actuaciones de la ACA:  
a) Valoraciones; b) Posiciones

Las conclusiones que se pueden extraer no son distintas a las que se han obtenido en el estudio de las actuaciones de Endesa. El sistema se vuelve a mostrar robusto ante variaciones razonables en los pesos, pues el único cambio en la priorización se ha revelado en V<sub>1</sub>, donde K<sub>1</sub> y K<sub>2</sub> comparten la primera posición.

En cambio, el resultado sí es sensible a grandes variaciones en los pesos. La tendencia de las valoraciones de la V<sub>3</sub> es diferente a la que mostraban tanto IPGOH<sub>A</sub><sup>A</sup> como las variantes V<sub>1</sub> y V<sub>2</sub>, tal y como puede verse en la figura 7.14a, quedando muy agrupadas las puntuaciones de las actuaciones M<sub>1</sub>, J<sub>1</sub>, I<sub>1</sub> y L<sub>1</sub>, hecho que no sucedía en los otros casos. Además, las tres primeras clasificadas intercambian sus posiciones en la priorización (ver figura 7.14b), una modificación que, al afectar a la parte alta de la tabla, causaría un cambio significativo en la política de la compañía a la hora de materializar las actuaciones.

### 7.7.- CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos en este capítulo puede afirmarse que la metodología propuesta en los capítulos 5 y 6 está capacitada para seleccionar las actuaciones de mantenimiento y conservación de obras hidráulicas que de manera más significativa contribuyen a un desarrollo sostenible. Unos resultados que han sido avalados por los conocimientos y la experiencia de los técnicos que gestionan las propias estructuras.

El modelo se ha demostrado versátil. La estructura en árbol permite, con una simple modificación de los pesos de los componentes, priorizar sin problemas actuaciones planteadas por entes públicos y por empresas privadas que, como es sabido, tienen intereses que no siempre son coincidentes, ampliando de esta forma el campo de acción de la herramienta.

A parte de las conclusiones generales señaladas, se pueden presentar las siguientes conclusiones específicas:

- Los resultados obtenidos han demostrado la gran capacidad que tiene la herramienta de discriminar a la hora de seleccionar las actuaciones que son prioritarias. Una propiedad que se intuía en los gráficos de barras presentados en las figuras 7.3 y 7.9, y que se ha constatado con el cálculo de los coeficientes de variación y discriminación presentados en la tabla resumen 7.27.
- Esta capacidad de discriminar es resultado de la aportación individual de los 9 indicadores que forman el árbol de decisión. Todos hacen una aportación fundamental al valor final del IPGOH que contribuye a generar la dispersión en el resultado, tal y como atesoran los resultados de las tablas 7.15 y 7.24. La única excepción es el indicador Incremento de Producción Estimado (IPE) cuando se analizan las actuaciones propuestas por la Agència Catalana de l'Aigua (ACA), al carecer las presas de su propiedad, por norma general, de centrales hidroeléctricas asociadas. Además, se debe resaltar que ningún indicador es suficientemente significativo como para señalar si un proyecto debe quedar seleccionado o descartado.
- El resultado del DñE, como se ha demostrado, es necesario pero no suficiente para realizar la priorización. El valor de esta variable condiciona de tal manera los indicadores del árbol que la priorización de las actuaciones no resulta la misma cuando se prescinde de su valor. Tampoco puede realizarse la priorización solamente con su valor, pues el resultado no es el mismo al perderse toda la información que recogen los indicadores.
- El modelo se ha contrastado con el análisis de 19 actuaciones diferentes, 12 pertenecientes a Endesa (empresa privada) y 7 pertenecientes a la ACA (empresa pública), y en ningún caso ha habido problemas en la evaluación de las variables que conforman el modelo. Una tarea que un evaluador experto puede realizar con garantía de rigor técnico en relativo poco tiempo.
- La metodología utilizada para definir las distintas variables asegura que un técnico, aunque sea poco experimentado, va a poder realizar la evaluación con una notable precisión. El error que se va a cometer va a ser como mucho de un nivel en cada variable, y va a ser sistemático, con lo cual afectará a todas las actuaciones y no va a afectar la capacidad discriminante del modelo. Ayudará en este sentido que los informes técnicos sean detallados
- El modelo de decisión no es sensible a pequeños cambios de pesos que puedan surgir como respuesta a modificaciones en las líneas estratégicas que van a guiar la decisión, demostrando que la herramienta es robusta. Solamente las grandes modificaciones alteran el resultado final de la priorización.

- Finalmente señalar que, de media, los resultados obtenidos en el análisis de las actuaciones de Endesa y de la ACA son muy similares siempre que se usa el mismo árbol. Esto significa, como ya se ha señalado, que las actuaciones programadas por ambas compañías contribuyen de forma muy parecida al desarrollo sostenible.





## CAPÍTULO 8

# CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

### 8.1.- INTRODUCCIÓN

La presente tesis doctoral ha servido para dotar a la comunidad técnica de una herramienta para la gestión de obras hidráulicas en explotación, esencialmente presas de hormigón, surgida de la integración de dos campos de conocimiento distantes: el diagnóstico de daños y la toma de decisiones. Con en ello se compone una estructura que transfiere a la herramienta rigor técnico y una alta aplicabilidad, tal y como se ha visto en las distintas implementaciones prácticas.

El objetivo fundamental de este capítulo, perteneciente al bloque 4 de este documento (§1.4), es presentar las principales conclusiones que se derivan del trabajo realizado en los dos bloques anteriores (capítulos 3 a 7), que son los que forman el cuerpo principal del estudio.

En esta tesitura se presentan unas *conclusiones generales* (§8.2) vinculadas a los objetivos principales de la tesis, enumerados en el primer capítulo, y utilizados como hilo conductor de todo el trabajo. Asimismo se presentan unas *conclusiones específicas* (§8.3) que tratan los aspectos teóricos y prácticos más concretos de los distintos capítulos, remarcando las aportaciones más significativas.

Finalmente, en otro orden de cosas, se presentan las *futuras líneas de investigación* (§8.4) donde se enumeran una serie de sugerencias para dar continuidad a esta tesis en futuros trabajos de investigación.

## 8.2.- CONCLUSIONES GENERALES

La primera conclusión a la que se llega una vez finalizado el desarrollo de la presente tesis doctoral es que se ha alcanzado los objetivos que se establecieron en el primer capítulo.

Se ha desarrollado una metodología de diagnóstico apta para dictaminar una primera hipótesis con el origen de los daños principales que pueden afectar a una presa de hormigón que se encuentre en fase de explotación. La metodología, que consiste en realizar una serie de actividades complementarias y estudios en la presa, es eminentemente práctica y está orientada a los técnicos encargados del mantenimiento y conservación de obras hidráulicas, aunque en ningún momento se han obviado las bases científicas. Esta herramienta subsana una carencia histórica causada por el planteamiento disgregado con que se ha tratado el tema y por la falta de atención que ha dispensado a esta temática la comunidad científico-técnica encargada del estudio de este tipo de estructuras, al centrar, principalmente, su actividad en los estudios de laboratorio y en los modelos numéricos, muy necesarios pero pertenecientes a la fase de constatación de la hipótesis de diagnóstico.

Su implementación puede generar la optimización de procesos tanto desde el punto de vista técnico (gestión del conocimiento en una misma institución) como desde el punto de vista económico (priorización de inversiones de mantenimiento), valorando los diagnósticos realizados en una presa para su potencial adaptación a otra.

La viabilidad práctica de la herramienta se ha contrastado con el estudio y diagnóstico de distintas presas de las que en la tesis se incluye una. El caso particular que se presenta corresponde a una estructura que, con los años, ha sido objeto de algunas actuaciones que no han conseguido detener la evolución de los daños. La hipótesis de diagnóstico establecida con la metodología ha sido validada por los estudios de laboratorio, que han demostrado su utilidad y eficacia.

También se ha desarrollado una metodología de priorización de inversiones que, capitalizando la información obtenida en el proceso de diagnóstico, prioriza de forma objetiva, mediante una evaluación semicuantitativa, las actuaciones de mantenimiento y conservación que se programan con la voluntad de corregir los daños existentes en las estructuras hidráulicas.

Las actuaciones se evalúan en un proceso indivisible constituido de dos fases, la fase 1, de homogeneización, y la fase 2, donde se calcula el *Índice de Priorización en la Gestión de Obras Hidráulicas* (IPGOH) que, en base a un árbol de decisión multicriterio, analiza los tres pilares básicos de la sostenibilidad: la sociedad, el medio ambiente y la

economía. La originalidad y gran aportación de la herramienta propuesta es la capacidad que tiene de evaluar actuaciones heterogéneas que se pretenden realizar en unidades estructurales totalmente diferentes. Sin la fase de homogeneización estas actuaciones no podrían ser comparadas mediante un mismo árbol de decisión. Este atributo la convierte en una metodología totalmente innovadora.

La estructura con la que se organiza la metodología permite fragmentar un problema complejo en pequeñas secuencias independientes conjugadas. Así, se genera un esquema de análisis fácil de interpretar y fácil de reproducir por parte de todos los técnicos. La sencillez conceptual (solamente se utiliza aquello que se comprende) y operacional, unida al breve tiempo de implementación y a la robustez (entendida como la capacidad del modelo de proporcionar resultados coherentes) le añaden unos atributos que hacen de ella la herramienta ideal para la toma de este tipo de decisiones. Cuando se ha implementado el modelo, los resultados se obtienen de manera rápida, permitiendo que se puedan comparar multitud de actuaciones.

La utilización del IPGOH en la selección de actuaciones transfiere a la decisión un notable valor añadido al propiciarse una utilización óptima de los recursos disponibles en el ejercicio de rehabilitar instalaciones hidráulicas. Además, se ofrecen argumentos técnicos a la sociedad civil, ante una demanda creciente, por parte de esta, de transparencia, lo que sin duda es un atractivo complementario.

La metodología se ha utilizado para priorizar actuaciones tanto de una empresa privada (Endesa) como de una administración pública (Agència Catalana del Aigua), habiéndose obtenido unos resultados que han demostrado, además de su versatilidad, su capacidad para priorizar las actuaciones que en mayor grado contribuyen a un desarrollo sostenible.

### 8.3.- CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

#### *Metodología de diagnóstico*

Las principales conclusiones que pueden extraerse del **Capítulo 3**, en el que se presenta la metodología desarrollada para dictaminar la primera hipótesis de diagnóstico, son:

- El estudio de los daños presentes en una presa debe ocuparse del análisis de distintos aspectos y hacerlo de forma escalonada y transversal. Para conseguir que este trabajo se haga de forma completa las actividades deben dividirse en las siguientes etapas (ver tabla 8.1): estudio de la historia “clínica” de la presa, inspección de campo y primeros trabajos de gabinetes.

Fase	Etapa		Tiempo
1ª	Detección de la anomalía		Semanas
	Objeto Tesis	Estudio de la historia "clínica"	
		Inspección de Campo	
		Primeros trabajos de gabinete	
1ª HIPÓTESIS DE DIAGNÓSTICO			
2ª	Ensayos de laboratorio		Meses
	Estudios analíticos y numéricos		
	Verificación del diagnóstico		
PRONÓSTICO			

Tabla 8.1.- Fases y etapas del diagnóstico (igual a la tabla 3.1 del capítulo 3)

- El estudio de la historia "clínica" es fundamental para detectar anomalías en la obra hidráulica que pueden dar indicios sobre cuál es el origen temporal y espacial del daño. Por esta razón debe realizarse una revisión de la documentación histórica que pueda recopilarse referente a la presa y a su entorno.
- El análisis de los datos registrados por los sistemas de auscultación también es muy importante porque dibuja, de forma muy clara, tanto la evolución del comportamiento global de la presa como de diferentes elementos individuales. En el estudio de los datos de auscultación, especialmente en los referentes a movimientos, deben valorarse las tendencias, no los picos puntuales.
- Por su alto valor científico-técnico, los gestores deben procurar que toda la información histórica se clasifique y conserve de forma adecuada para que pueda utilizarse en tiempos futuros, tal y como ya se vienen haciendo, de forma particular, con los datos de auscultación.
- La inspección de campo, entendido como el examen físico que el técnico realiza a la estructura y a su entorno, es capital en la secuencia de actividades propuestas porque permite detectar signos de daño tan diversos como: degradación física o química de un material (hormigón, acero o roca dependiendo de qué zona se inspeccione), movimientos relativos y desalineaciones, filtraciones o productos neoformados.
- Las zonas a inspeccionar son: el cuerpo de presa, la geología del emplazamiento, las estructuras anejas y los elementos móviles asociados a la estructura, debiéndose caracterizar de forma detallada los daños, esto es, definir su localización, tipología, dimensión, evolución..., con el fin de poder establecer interrelaciones entre los signos que aparecen en distintas zonas de la estructura.

- Los trabajos de gabinete permiten valorar, en primera instancia, si el problema es generalizado (afecta a toda la presa) o puntual, así como hacer un pronóstico de cuál va a ser la evolución de los movimientos en el futuro. Las conclusiones que proporcionan ayudan a formalizar una visión global del problema.
- El dictamen definitivo de la primera hipótesis de diagnóstico se consigue de forma sencilla e intuitiva gracias al cuadro sinóptico de la figura 3.34 que recopila y sintetiza las diferentes conclusiones que el técnico ha podido obtener a lo largo del proceso de análisis de los signos patológicos presentes en la presa. Este cuadro está preparado para diferenciar entre los signos de las principales patologías consideradas en la literatura técnica.
- Utilizar un modelo estructural simple permite validar en primera instancia y de formar rápida la hipótesis y evita malbaratar recursos dando inicio a los trabajos de laboratorio y a los estudios numéricos de gran calibre.
- La amplia labor experimental, tanto de campo como de laboratorio y gabinete, que ha dado lugar a la concreción de esta metodología le transfiere un carácter eminentemente técnico y práctico, que se constata a través de los numerosos ejemplos reales que la ilustran.

La aplicación práctica de la metodología en el diagnóstico de la presa de Urrúnaga (**capítulo 4**) ha permitido, además, de demostrar la utilidad práctica de la herramienta, dictaminar que los signos de daño que presenta la presa pueden ser debidos a la importante cantidad de calcita neoformada ( $\text{CaCO}_3$ ), resultante de la hidratación diferida de la cal libre existente en el cemento con el que se construyó la presa. En vistas de los datos disponibles del año 2009, los daños no revisten gravedad.

### ***Metodología de priorización***

La imposibilidad que tienen los gestores de obras hidráulicas de acometer, en cada ejercicio económico, todas las actuaciones que reclaman sus instalaciones pedía el establecimiento de un criterio de selección y criba capaz de discriminar entre actuaciones de ámbito muy diverso. La sostenibilidad, por su probada capacidad para realizar un análisis global, se ha considerado el eje argumental sobre el que cimentar una propuesta que se ha presentado y desarrollado en los **capítulos 5 y 6**, de los cuales pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- El estudio de grado de sostenibilidad no se ha podido desarrollar mediante las herramientas clásicas existentes debido a la heterogeneidad de las actuaciones a evaluar, concernientes todas ellas a diversas unidades estructurales, como pueden ser: el cuerpo de presa, los estribos, la cimentación, el vaso o los órganos afines. Ello imposibilita una comparación directa y automática que si puede realizarse, por ejemplo, en los estudios de alternativas constructivas.

- La necesidad de comparar realidades de naturaleza múltiple ha obligado a dividir el proceso en dos fases (ver figura 8.1), y establecer un sistema de homogeneización (**capítulo 5**) materializado en lo que se ha denominado “fase 1” de la metodología, encargada de evaluar solamente la importancia del daño que corrigen cada una de las  $n$  actuaciones propuestas, independientemente de las características generales de la estructura en la que se encuentra y de la situación geográfica de ésta.

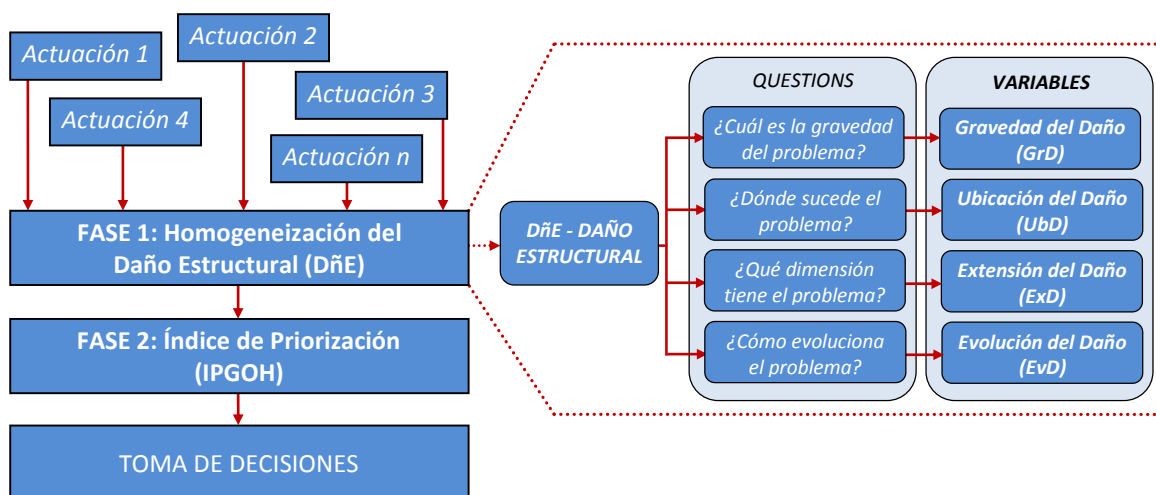


Figura 8.1.- Fases de la decisión y variables de la Fase 1 (igual a la figura 5.5 del capítulo 5)

- La fase de homogeneización permite caracterizar de forma completa el daño que se pretende corregir con la actuación al medirse las siguientes variables: *Gravedad del Daño* (GrD), *Ubicación del Daño* (UbD), *Extensión del Daño* (ExD) y *Evolución del Daño* (EvD). Su suma ponderada da lugar a una nueva unidad llamada *Daño Estructural* (DñE). Es el valor del DñE (oscilante entre 1 y 5), por su visión de conjunto, el que muestra la relevancia del daño.
- La capacidad analítica y discriminante del DñE ha quedado demostrada en la aplicación práctica realizada en el **capítulo 7**. En la misma aplicación práctica se ha demostrado que esta unidad es necesaria pero no suficiente para realizar la priorización de actuaciones, pues no valora las consecuencias directas que puede ocasionar el daño.
- La evaluación de la sostenibilidad se realiza en la fase 2 de la metodología, donde se calcula el *Índice de Priorización en la Gestión de Obras Hidráulicas* (IPGOH). El árbol de decisión (basado en el sistema MIVES), a través del que se realiza el cálculo del IPGOH, permite evaluar de forma objetiva las consecuencias que se pueden derivar de cada uno de los daños, en función de las características y de la ubicación geográfica de las estructuras en las que éstos aparecen.
- Se puede calcular la contribución al desarrollo sostenible porque el árbol de decisión (desarrollado en el **capítulo 6**) considera de forma inseparable, mediante

el eje de requerimientos, los principales aspectos sociales, ambientales y económicos que quedan involucrados en la reparación de una estructura hidráulica dañada.

- La capacidad de modificar los pesos del árbol propicia que la herramienta pueda adaptarse a los cambios estratégicos que experimente una organización con el paso de los años, al mismo tiempo que permite que se utilice contemporáneamente en entidades con filosofías diferentes.
- El valor final del IPGOH (oscilante entre 0 y 1) es resultado de un análisis completo y exhaustivo de 31 variables no redundantes. Los nueve indicadores del árbol de decisión miden un total de 27 variables, a las que se deben sumar las 4 que formalizan el DñE. A pesar de ser un número importante de variables, el esfuerzo a realizar en la medición no es muy grande, lo que permite que se puedan evaluar numerosas actuaciones en un corto espacio de tiempo. Esta característica hace que la herramienta tenga una gran aplicabilidad pues conjuga el rigor técnico y la velocidad de proceso, tal y como ha quedado demostrado en la aplicación práctica realizada en el **capítulo 7**.
- La herramienta informática de soporte preparada para obtener el IPGOH de forma automática (anexo 7), una vez se han definido los pesos y medido las distintas variables, es esencial para asegurar la fiabilidad y velocidad de la fase de cálculo. Sin dicha herramienta, calcular la puntuación de cada indicador y transformarla en un valor de 0 a 1 mediante la función de valor correspondiente sería un proceso farragoso, además de largo, en el que fácilmente se cometerían errores.
- Finalmente señalar que la gran ventaja de un sistema de decisión como el que se ha presentado es que la decisión se toma cuando se define el árbol de decisión, proceso racional que se realiza siempre antes de conocer las alternativas a evaluar y seleccionar, lo que transfiere a la herramienta una total objetividad y neutralidad.

#### 8.4.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El trabajo realizado en esta tesis contribuye de manera importante a reformular la gestión ordinaria de las obras hidráulicas que se encuentran en fase de explotación, aunque la propia naturaleza de cualquier investigación propicia que surjan nuevas ideas encaminadas a complementar y ampliar el trabajo realizado. A continuación, se enumeran algunas de las propuestas que podrían abordarse en estudios futuros.

Los próximos trabajos enfocados al diagnóstico de daños en presas de hormigón se podrían encargar de los siguientes aspectos:

- Profundizar en el estudio de la interacción terreno-estructura que causa, sobre todo en las presas de planta recta, una fisuración inclinada y longitudinal



sistemática en la zona alta de los estribos de la presa, cara a evitar que pueda aparecer en futuras construcciones.

- Desarrollar nuevos modelos simples que sean capaces de reproducir las características básicas de una presa de bóveda y que sirvan para verificar de manera sencilla la primera hipótesis de diagnóstico. Debido a las interacciones tensionales existentes entre los distintos bloques normalmente no se plantean modelos en 2D.
- Profundizar en el estudio de la repercusión estructural que puede tener el  $\text{CaCO}_3$  que se genera como consecuencia de una hidratación diferida de la cal libre contenida en algunos cementos utilizados en la construcción de presas en los años 50 y 60 del siglo pasado.

Por su parte, la herramienta de priorización de inversiones ha representado un gran avance en la selección de las actuaciones que deben realizarse en función de su contribución al desarrollo sostenible, aunque podrían introducirse algunas variantes interesantes:

- Introducir una función que optimice la rentabilidad de la inversión global de un ejercicio económico en función de una relación entre el valor del índice IPGOH y el coste de cada actuación, cara a permitir que las actuaciones menos valoradas puedan llegar a materializarse en algún momento.
- Transformar la evaluación semicuantitativa (planteamiento determinista) en una evaluación probabilista, dado que la incertidumbre es un actor importante en este tipo de análisis.
- Adaptar la metodología, con pequeñas modificaciones, para que pueda utilizarse en vistas a priorizar actuaciones de mantenimiento y conservación de otro tipo de obras civiles como pueden ser las obras lineales o de regadío.
- Utilizar conceptualmente la fase de homogeneización para desarrollar un sistema de toma de decisiones que permita priorizar proyectos de obra nueva de distintas tipologías (puentes, carreteras, canales...) que puede ser de gran utilidad para las administraciones públicas.

Como línea de acción, más que como una futura línea de investigación, debe realizarse una campaña pedagógica en vistas a explicar las bondades de un sistema de toma de decisiones basado en un modelo como el que se ha presentado a lo largo de todo este trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdi H. (2010).** “Coefficient of variation”. Encyclopedia of research design. SAGE Publications, Thousand Oaks, pp 169–171.
- Abrishamchi, A.; Ebrahimian, A.; Tajrishi, M.; y Mariño, M. (2005).** “Case Study: Application of Multicriteria Decision Making to Urban Water Supply.” Journal of Water Resources Planning and Management, 131(4), 326–335. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:4(326).
- ACI (1993).** “Causas, Evaluación y Reparación de Fisuras en Estructuras de Hormigón. ACI 224.1R-93”. American Concrete Institute, 24 p.
- ACI (1998).** “Erosion of Concrete in Hydraulic Structures” ACI 210R-93”. American Concrete Institute, 24 p.
- Acuña, E. (2010).** “Estadística Descriptiva. Capítulo 3”. Análisis Estadístico de Datos usando Minitab. Universidad de Puerto Rico, 3ra Edición, 322 p.
- Aguado, A.; Agulló, L. y Vázquez, E. (1988).** “Dictamen sobre las posibles causas que influyen en el anómalo comportamiento de la presa de Graus”. Documento nº 7. Informe técnico privado. Convenio UPC-Endesa.

- Aguado, A.; Agulló, L.; Fdez-Canovas, M.; Sallas, J.M.; (1996a).** "Diagnóstico de Daños y Reparación de Obras Hidráulicas de Hormigón" ". Colección Monografías: 19. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 285 p.
- Aguado, A.; Mirambell, E.; Agulló, L.; y Calmón, J. (1996b).** "Problemas térmicos de hormigón: de la construcción a la explotación". Efectos térmicos en presas y embalses, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, pp 109-143.
- Aguado, A.; Agulló, L.; Casanova, I.; López, C. M. (1998).** "Estudio de fenómenos expansivos en presas de hormigón. De la micro a la macro estructura". Comité Español de Grandes Presas. Premio José Torán, 103 p.
- Aguado, A.; Campos, A.; Chinchón, S.; López C. M. y Pardo-Bosch, F. (2011).** "Estudio del comportamiento de la presa de Mequinenza". Informe Tècnico Interno. Endesa - Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 2011, 203 p.
- Aguado, A.; Josa, A. y Pardo-Bosch, F.; (2011).** "How to measure the sustainability of concrete structures?". Proceedings SB11 World Sustainable Building Conference. Helsinki. 8 p.
- Aguado, A.; del Caño, A.; de la Cruz, M.P.; Gómez, D. y Josa, A. (2012).** "Sustainability assessment of concrete structures within the Spanish structural concrete code". Journal of Construction Engineering and Management - ASCE, 138(2), pp. 268-276.
- Agulló, L.; Aguado, A. y Mirambell, E. (1995).** "Comportamiento Térmico de Presas de Hormigón en servicio". Monografía CIMNE, 23, Barcelona, 139 p.
- Alarcón, B.; Aguado, A.; Manga, R. y Josa, A. (2010).** A Value Function for Assessing Sustainability: Application to Industrial Buildings. Sustainability, 3(1), 35-50; Doi:10.3390/su3010035.
- Ali, H.; Alam, R.; Haque, N.; y Alam, M.J. (2012).** "Comparison of Design and Analysis of Concrete Gravity Dam". Natural Resources, 3, pp. 18-28. DOI:10.4236/nr.2012.31004.
- Alonso, J.A. y Lamata, M.T. (2006).** "Consistency in the analytic hierarchy process: a new approach". International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 14, (4), 445-459. DOI: 10.1142/S0218488506004114.
- Alonso, M. y Zaragoza G. (2001).** "Normativa sobre seguridad de Presas". Especial XX Congreso de Grandes Presas. Revista de Obras Públicas, nº 3407, pp. 75-83.
- Alaejos, M. P. y Bermúdez, M. A. (2003).** Durabilidad y procesos de degradación del hormigón de presas. Estudio Bibliográfico. Monografía M-76. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madrid, 168 p.

- Altarejos-García, L. (2009).** “Contribución a la estimación de la probabilidad de fallo de presas de hormigón en el contexto del análisis de riesgos”. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Canales, Caminos y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 683 p.
- Altarejos-García, L.; Escuder-Bueno, I.; Serrano-Lombillo, A. y Gómez de Membrillera-Ortuño, M. (2012).** “Methodology for estimating the probability of failure by sliding in concrete gravity dams in the context of risk analysis”. *Structural Safety*, 36–37 (3), pp. 1-13.
- Andriolo, F. R. (2002).** “Patología de las presas: sintomatología, diagnóstico y terapia. General Report”. Proceedings of the 1st International Congress on Dam Maintenance and Rehabilitation, Madrid, p. 629-638. ISBN 90 5809 534 7.
- Araújo, G. (2008).** “La reacción sulfática de origen interno en presas de hormigón. Propuesta metodológica de análisis”. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Canales, Caminos y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- Arboleda, J. (1994).** “Una propuesta para la identificación y evaluación de impactos ambientales”. *Crónica Forestal y del Medio Ambiente*, nº 9, pp. 71-81.
- Ariaratnam, S.; Piratla, K.; Cohen, A.; y Olson, M. (2013).** “Quantification of Sustainability Index for Underground Utility Infrastructure Projects”. *Journal Construction Engineering and Management*. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000763.
- Army Corps of Engineers (1979).** “Recommended Guidelines for the Safety Inspection of Dams”. Office of the Chief of Engineers, U.S.A Government, Washington D.C. 33 p.
- ASCE (2013).** “Report card for America’s infrastructure”. American Society of Civil Engineers, Virginia, 74 p.
- ASTM (1996).** “E632-82 Standard Practice for Developing Accelerated Tests to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials”.
- Balsell (2010).** “La clínica y el laboratorio. Interpretación de análisis y pruebas funcionales”. Elsevier Masson, 21ed., Barcelona, 892 p.
- Bowles, D.; Anderson, R. y Glover, T. (1997).** “A Role for Risk Assessment in Dam Safety Management”. Proceedings of the 3rd International Conference Hydropower, Norway, 9 p.
- Bowles, D. (2001).** “Evaluation and Use of Risk Estimates in Dam Safety Decisionmaking”. *Risk-Based Decisionmaking in Water Resources IX*, pp. 17-32. Doi: 10.1061/40577(306)3.

- British Columbia (2011).** "Inspection & Maintenance of Dams". Dam Safety Guidelines. Canada, 79 p.
- Broten, M. y De Sombre, R. (2001).** "The Airfield Pavement Condition Index (PCI) Evaluation Procedure: Advantages, Common Misapplications, and Potential Pitfalls". 5th International Conference on Managing Pavements, Seattle, 9 p.
- Bullock, R.E. y Foltz, S.D. (1995).** "REMR Management Systems - Navigation and Reservoir Structures Condition Rating Procedures for Concrete in Gravity Dams, Retaining Walls, and Spillways". Repair, Evaluation, Maintenance, and Rehabilitation Research Program, Technical Report REMR-OM-16. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 73 p.
- Bureau of Reclamation (1988).** "Downstream Hazard Classification Guidelines", ACER Technical Memorandum nº 11, U.S. Department of the Interior, Denver. 56 p.
- Bureau of Reclamation (1997).** "Guide to Concrete Repair". U.S. Department of the Interior, Technical service center, 168 p.
- Bureau of Reclamation y Army Corps of Engineers (2010).** "Qualitative and Semi-Quantitative Assessments". Chapter 3, Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis. U.S. Department of the Interior, 12 p.
- Buil, J.M. y Batlle, T. (2007).** Presas de Endesa en el Mundo. Dirección Corporativa de Ediciones de Endesa. Madrid, 362 p.
- Buil, J.M.; Río, F.; Aguado, A.; Agulló, L.; Araújo, G. y López, C. (2008).** "Revisión del diagnóstico de la presa de Mequinenza". VIII Jornadas Comité Nacional Español de Grandes Presas, Granada, 10 p.
- Cajete, J. y Gil, A. (2000).** "Experiencias de IBERDROLA en la inspección visual presas". XX International Congress of Large Dams, ICOLD, Q-78 Monitoring of dams and their foundations. Beijing.
- Calavera J. (2005).** "Patología de estructuras de hormigón armado y pretensado". INTEMAC. Madrid, 712 p.
- Calleja, J. (1980).** "Empleo racional de los cementos para los diferentes tipos de obras" *Materiales de Construcción*, 30 (180), pp. 15-74. Doi:10.3989/mc.1980.v30.i180.
- Campos, A. (2012).** "Análisis numérico de presas de hormigón bajo acciones expansivas". Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Canales, Caminos y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 270 p.

- Carter, J.; Müller-Stöver, I.; Östensen, H.; y Heuck, C. (2005).** "Good clinical diagnostic practice". World Health Organization, Regional Office for the Eastern Mediterranean, 220 p.
- Castro, I. y Gámez M (2002).** "Historia Clínica". Capítulo 2.2. Farmacia Hospitalaria - Tomo I. Sociedad Española de Farmacia Hospitalaria. Madrid, pp 295-305.
- CEDEX (1996).** "Estudio y caracterización de hormigones en las presas de Urrúnaga y Villarino" Informe técnico privado". Iberdrola SAU.
- Cervera, M; Oiver, J. y Faria, R. (1995).** "Seismic evaluation of concrete dams via continuum damage models". Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 24 (9), pp. 1225-1245. DOI: 10.1002/eqe.4290240905.
- Chatterji, S. (1995).** "Mechanism of expansion of concrete due to the presence of dead-burnts CaO and MgO". Cement and Concrete Research, 25 (1), pp. 51-56. DOI:10.1016/0008-8846(94)00111-B.
- Chinchón-Payá, S. (2013).** "Áridos reactivos en hormigones de presa. Reacción sulfática con formación de thaumasita". Tesis doctoral en Ingeniería Civil. Universidad de Alicante.
- CIS (2013).** "Barómetro junio 2013. Estudio nº 2.990". Centro Investigaciones Sociológicas. Madrid, 36 p.
- Clifton J.R. y Pommersheim J.M. (1994).** "Sulfate attack of cementitious materials: volumetric relations and expansions". NISTIR 5390. National Institute Standards and Technology, U. S. Department of Commerce, 22 p.
- Comisión Nacional de la Energía (2007).** "Información básica de los sectores de la energía. Anejo". CNE, Madrid, 280 p.
- Comisión Permanente del Hormigón (2008).** "Instrucción de hormigón estructural EHE-08". Ministerio de Fomento, España, 722 p.
- Conesa, F.J. (2010).** "Procedimiento para la evaluación del estado de seguridad en presas y priorización de actuaciones". Tesina de especialidad. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Canales, Caminos y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- Conesa, V. (2009).** "Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental". Ediciones Mundi-Presa. 4ta Edición. Madrid, 864 p.

- Cyganiewicz J. y Smart J. (2000).** "U.S. Bureau of Reclamation's use of risk analysis and risk assessment in dam safety decision making". XX International Congress of Large Dams, ICOLD, Q-76 The use of risk analysis to support dam safety decisions and management. Beijing, 19 p.
- DBK (2013).** "Estudio Sectores - Construcción". 20ª Edición. Madrid, 159 p.
- Díaz-Marta, P. (1997).** "Las Obras Hidráulicas en España". Ediciones doce calles. Madrid, 173 p.
- Diéz-Cascón, J. y Bueno, F. (2001).** "Ingeniería de presas. Presas de fábrica". 2 tomos. Ed. Universidad de Cantabria.
- Diéz-Cascón (2003).** "Las presas en el siglo XXI". Ingeniería y Territorio, 62, pp. 4 a 9.
- Dirección General de Obras Hidráulicas (1996).** "Reglamento técnico sobre seguridad de presas y embalses. Serie Legislación". Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente del Gobierno de España. Madrid, 32 p.
- Dirección General de Obras Hidráulicas (1997).** "Clasificación de Presas en Función del Riesgo Potencial". Guía Técnica. Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno de España. Madrid, 64 p.
- Dirección General de Obras Hidráulicas (2001).** "Guía Técnica para la Elaboración de los Planes de Emergencia". Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno de España. Madrid, 164 p.
- Drapeau, A. y Bélanger, M. (1995).** "Manuel d'inspection des structures - Évaluation des dommages". Direction des Structures, Ministère des Transports, Québec.
- Drucker, P. (2000).** "El management del siglo XXI". Edhasa, Barcelona, 288 p. ISBN 9788435014526.
- Dunphy, E. y Botsford, T. (1956).** "Propedéutica quirúrgica". Nueva Editorial Interamericana S.A. México, 405 p.
- Espinós, J.; Aguado, A.; López, C.M.; Campos, A. y Chinchón-Payá, S. (2010).** "Expansion studies for the Paso Nuevo dam". Proceedings of the 2nd International Congress on Dam Maintenance and Rehabilitation, Zaragoza.
- Endesa (2011).** "Informe de Sostenibilidad 2011". Endesa Publicaciones, Madrid, 240 p.
- European Club - ICOLD (2004).** "Uplift Pressures under Concrete Dams". Final Report Working Group, 30 p.

- Fargier, Y.; Fauchard, C.; Mériaux P.; Royet P.; Palma-Lopes, S.; François, D.; Côte, P. y Bretar, F. (2012).** "Methodology Applied to the Diagnosis and Monitoring of Dikes and Dams". Novel approaches and their applications in risk assessment. InTech, pp 263 a 289. ISBN: 978-953-51-0519.
- Feinstein, A. R. (1967).** "Clinical Judgment". Williams and Wilkins Co. Baltimor, 414 p.
- Fell, R.; Bowles, D.; Anderson, L.R. y Bell, G. (2000).** "The status of methods for estimation of the probability of failure of dams for use in quantitative risk assessment". XX International Congress of Large Dams, ICOLD, Q-76 The use of risk analysis to support dam safety decisions and management. Beijing, 20 p.
- Fleitz, J. y Hoppe, (2008).** "Nuevas tecnologías de auscultación" VIII Jornadas Españolas de presas - Comité Nacional Español de Grandes Presas. 10 p.
- Fortin, M.; Larivière, R.; Manescu, D. y Stéresco, M. (1995).** "Guide d'Inspection". Systématisation des Activités d'Inspection des Barrages en Béton - Volume II. Hydro-Québec, Montréal, Québec, 61 p.
- French, S. (2003).** Modelling, making inferences and making decisions: the roles of sensitivity analysis. Top, 11, 229-252. Doi: 10.1007/BF02579043.
- Friedman, H.H. (2004).** "Manual de Diagnóstico Médico". Masson, 5ª edición, Barcelona, 520 p. ISBN 9788445811504.
- García, E. (2004).** "Estabilitat de la dolomita en el medi de la pasta pòrtland: Aplicació a la fabricació de formigons amb àrids dolomítics" Tesis Doctoral. Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona. Barcelona, 248 p.
- Gates, B. (2000).** "Los Negocios en la Era Digital". Plaza & Janes, 608 p. ISBN 9788401541391.
- Gil, A. (2009).** "Salto de Barazar". Informe técnico privado. Iberdrola, 90 p.
- Gocevski, V. (1995).** "Monitoring, Testing and Remedial Work at Beauharnois Powerplant". 2nd International Conference on Alkali - Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams, Chattanooga, pp. 101 - 116.
- Gómez, R. (2008).** "Geocondicionantes de presas y embalses". VIII Jornadas Comité Nacional Español de Grandes Presas, Granada, 20 p.
- Gómez Orea, D. (1988).** "Evaluación del impacto ambiental de proyectos agrarios". Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación (MAPA). Estudios monográficos nº 6. Madrid.



- Gómez Orea, D. (2003).** "Evaluación de impacto ambiental". Ediciones Mundi-Presa. 2nda Edición. Madrid, 749 p.
- Gonnerman, H.F.; Learch, W. y Whiteside, T.M. (1953).** "Investigations of the hydration expansion characteristics of Portland cements." Bull. 45. Portland Cement Association, Chicago, 181 p.
- Greimann, L.; Stecker, J. y Nop, M. (1995).** "REMR Management Systems—Navigation Structures, Condition Rating Procedures for Tainter Dam and Lock Gates" . Repair, Evaluation, Maintenance, and Rehabilitation Research Program, Technical Report REMR-OM-17. U.S. Army Corps of Engineers, Ames, Iowa, 80 p.
- Groza, O. y Toda, C. (2011).** "Defects in concrete dams". Journal of the Audio Engineering Society, Section Civil Engineering Installations, pp. 73-78.
- Gudiol, F. (2006).** "Ojo clínico" y evidencia científica. Revista Educación Médica, 9 (1), 21-23.
- Hennig, C.; Dise, K. y Muller, B. (1997).** "Achieving Public Protection with Dam Safety Risk Assessment Practices". Risk-Based Decision Making in Water Resources VIII, Proceedings of the Eighth Conference, ASCE, pp. 19-32.
- Herradro, M; Martínez-Alella, F. y Hoyo del, R. (2009).** "Mechanical behavior model for ASR-affected dam concrete under service load: formulation and verification". Materials and Structures, 42 (2), pp 201-212. DOI 10.1617/s11527-008-9378-6.
- Hoyo, R. del; Mayoral, C.; Pérez, D.; Martínez, F. y Herrador, M. F. (2008).** "Reacciones Expansivas en el Hormigón de varias Presas. Localización y Diagnóstico". VIII Jornadas Comité Nacional Español de Grandes Presas, Granada, 11 p.
- Huang, I.B.; Keisler, J. y Linkov, I. (2011).** "Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends". Science of the Total Environment, 409 (19), pp. 3578-3594.
- Huang, M. y Pietruszczak, S. (1999).** "Modeling of thermomechanical effects of alkali-silica reaction. Journal of Engineering Mechanics, 125 (4), pp. 476, 485.
- Iberdrola Ingeniería (2002).** "Análisis de fisuración por MEF de la Presa de Urrúnaga". Informe técnico privado.
- ICE (2010).** "The state of the nation infrastructure. Infrastructure 2010". Institution of Civil Engineers, London, 23 p.
- ICOLD, (1980).** "Dams and the environment". Bulletin 35, París.
- ICOLD, (1987).** "Dam Safety Guidelines". Bulletin 59, París.

- ICOLD (1989).** "Exposure of dam concrete to special aggressive waters". Bulletin 71, París.
- ICOLD (1991).** "Alkali-aggregate reaction in concrete dams". Bulletin 79, París.
- ICOLD (1994).** "Ageing of dams and appurtenant Works". Bulletin 93, París.
- ICOLD (1997).** "Concrete dams - Control and treatment of cracks". Bulletin 102, París.
- ICOLD (1997).** "Declaración del ICOLD sobre el medio ambiente". 16 p.
- ICOLD (2000).** "Envejecimiento de presas y obras complementarias. Síntesis y recomendaciones." Comité Español de Grandes Presas. Boletín 93, Madrid.
- ICOLD (2005).** "Risk Assessment in Dam Safety Management - A Reconnaissance of Benefits, Methods and Current Applications". Bulletin 130, París.
- ICOLD (2007).** "Las presas y el agua en el mundo". París, 68 p.
- ICOLD (2011).** "The World Register of Dams. Electronical Register". 2nd Update of 4th editions.
- IDAE (2011).** "Plan energías renovables". Ministerio de Industria, Energía y Turismo del Gobierno de España. Madrid, 822 p.
- IHOBE (2005).** "Guía técnica para el relleno de canteras con materiales naturales de excavación. Ley 1/2005 para la prevención y corrección de la contaminación del suelo". Ingurumen Jarduketarako Sozietate Publikoa. Gobierno Vasco, 324 p.
- Instituto Geológico y Minero de España (1971).** "Mapa Geológico de España, E.1:200.000, Síntesis de la Cartografía existente". Madrid.
- ITCOLD (1988).** "Tecniche e realizzazioni italiane per il monitoraggio delle dighe e delle loro fondazioni". Bolletino 1. 80 p.
- ITCOLD (1999).** "Processi di invecchiamento di dighe e loro fondazioni". Bolletino 7. 89 p.
- ITCOLD (2012).** "Potenzialità, limiti e possibili sviluppi delle tecniche di identificazione strutturale per la diagnostica delle dighe". 163 p.
- ITEC (2013).** "Informes Euroconstruct-Junio". Barcelona, 186p. ISBN:978-84-7853-577-4.
- Johansen V. (1977).** "Cocción de clínker de cemento portland en hornos rotatorios" *Materiales de Construcción*, 27(166-167), 85-101. DOI:10.3989/mc.1977.v27.i166-167.

- Kabir, G.; Sadiq, R. y Tesfamariam, S. (2013).** "A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management". *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, DOI:10.1080/15732479.2013.795978.
- Keeney R.L. y Raiffa H. (1993).** *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. Cambridge University Press, 569 p. ISBN 0-521-43883-7.
- Khosravi, S. y Heydari, M. M. (2013).** "Modelling of Concrete Gravity Dam Including Dam-Water-Foundation Rock Interaction". *World Applied Sciences Journal*, 22 (4), pp. 538-546. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.22.04.551.
- Khadem, N. y Sheikholeslami, A. (2010).** "Multicriteria Group Decision-Making Technique for a Low-Class Road Maintenance Program". *Journal of Infrastructure Systems-ASCE*, 16 (3), pp. 188-198. DOI: 10.1061/\_ASCE\_IS.1943-555X.0000023.
- Koo, D. y Ariaratnam, S. (2008).** "Application of a Sustainability Model for Assessing Water Main Replacement Options". *Journal Construction Engineering and Management*, 134 (8), 563-574. Doi: 10.1061/\_ASCE\_0733-9364\_2008\_134:8\_563.
- Laín, P. (1988).** "El diagnóstico médico. Historia y teoría". Ed. Salvat, Barcelona, 425 p.
- Lambert, J.; Karvetski, C.; Spencer, D.; Sotirin, B.; Liberi, D.; Zaghoul, H.; Koogler, J.; Hunter, S.; Goran, W.; Ditmer, R. y Linkov, I. (2012).** "Prioritizing Infrastructure Investments in Afghanistan with Multiagency Stakeholders and Deep Uncertainty of Emergent Conditions." *Journal of Infrastructure Systems*, 18 (2), pp. 155-166.
- Leiro, A.; Mateo, B. y Fontao, I. (1996).** "Metodología para el estudio de patologías de origen químico que pueden tener lugar en el hormigón de una presa". V Jornadas Españolas de presas - Comité Nacional Español de Grandes Presas, pp. 512-127.
- León, J.; Corres, H. y Espeche, A. (2007).** "Ingeniería de mantenimiento de estructuras. Una actividad de futuro". V Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Sevilla, 21 p.
- Lomabardi, G. (1994).** "Cimentaciones de Presas de Hormigón y sus Tratamientos". *Symposium Internacional de la ISRM y IV Congreso Sudamericano de Mecánica de Rocas*. Santiago de Chile, 24 p.
- Lombardi, G.; Bremen, R. y Ambreg, F. (2001).** "Long term behaviour of three arch dams. " Sixth Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams. ICOLD. Salzburg. pp 1-12.

- López, C. M. (1999).** “Análisis microestructural de la fractura del hormigón utilizando elementos finitos tipo junta. Aplicación a diferentes hormigones” Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Canales, Caminos y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 237 p.
- Mansouri, A.; Ahmad, M.; Neshaei, L. y Aghajany, R. (2011).** “Fracture analysis of concrete gravity dam under earthquake induced loads”. Journal of Applied Sciences and Environmental Management, 15 (2), pp. 317 – 325.
- Martínez Roig, J. M.; Aguado, A.; Agulló, L. y Vázquez, E. (1991).** “Diagnosis of the behaviour of the Graus and Tabescán dams”. 7th International Congress on Large Dams. Viene, pp. 603-617.
- Mason, P.J. (1989).** “Exposure of dam concrete to special aggressive waters”. ICOLD. París, 177 p.
- Mejia-Giraldo, D.; Villarreal, J.; Gu, Y.; He, Y.; Duan, Z. y Wang, L. (2012).** “Sustainability and Resiliency Measures for Long-Term Investment Planning in Integrated Energy and Transportation Infrastructures.” Journal Energy Engineering, 138 (2), 87-94.
- Menéndez, E. (2007).** “Procesos expansivos del hormigón: ensayos árido-álcali, ataque por sulfatos y ataque por hielo-deshielo. Sistemas de prevención y actuaciones”. La innovación en las técnicas, los sistemas y los materiales de construcción. Durabilidad y conservación del patrimonio. IETcc-CSIC, 3, 225-236.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2014).** “Inventario de Presas y Embalses”. Gobierno de España, Madrid. <http://sig.magrama.es/snczi/> (última visualización: 27 de enero 2014).
- Morales (2008).** “Estadística inferencial: el error típico de la media”. Estadística Aplicada a las Ciencias Sociales”. Universidad Pontificia Comillas, Madrid, 363 p. ISBN 9788484682363.
- Morgan, W. y Engel, G. (1971).** “Propedéutica Médica”. Nueva Editorial Interamericana. S.A. México, 311 p.
- Mosser, A. M. (2004).** “Outil d’Aide à la Gestion des Interventions sur les Barrages en beton”. Tesina de Màster, Faculté des Sciences et de Génie, Universidad de Laval, Canadá, 137 p.
- Neville, A.M. (1981).** “Properties of concrete “. Longman, 3ra Edición, 844 p.
- New York State-Department of Environmental Conservation (1987).** “An Owners Guidance Manual for the Inspection and Maintenance of Dams in New York State”. DEC Publication, 50 p.

- Nyström, B. y Sderholm, P. (2010).** "Selection of maintenance actions using the analytic hierarchy process (AHP): decision-making in railway infrastructure". *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, 6 (4), pp. 467-479, DOI: 10.1080/15732470801990209.
- Ormazabal, G. (2002).** El IDS: un nuevo sistema integrado de toma de decisiones para la gestión de proyectos constructivos. Tesis Doctoral. Departamento de ingeniería de la construcción – Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- Otto, B. (2007),** "ARR and ISA at two dams in Switzerland". Special workshop on chemical expansion of concrete in dams & hydro-electric projects, Granada.
- Pardo-Bosch, F.; Campos, A.; López, C. M. y Aguado, A. (2011).** "Fisuras Estructurales en Presas de Hormigón con Expansiones: Enseñanzas Prácticas". V Congreso ACHE, Barcelona, 10 p.
- Pardo-Bosch, F. y Aguado, A. (2014).** "Investment priorities for the management of hydraulic structures". *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*. Doi:10.1080/15732479.2014.964267.
- Peyras, L.; Royet, P. y Boissier, D. (2006).** "Dam ageing diagnosis and risk analysis: Development of methods to support expert judgment". *Canadian Geotechnical Journal*, 43, pp. 169-186. Doi:10.1139/T05-096.
- Piñero, I. (2013).** "Metodología para priorizar y planificar, de manera sostenible, la rehabilitación de estructuras degradadas: caso extremo del centro histórico de La Habana". Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad del País Vasco, Bilbao, 302 p.
- Pons, O. y Aguado, A. (2012).** "Integrated value model for sustainable assessment applied to technologies used to build schools in Catalonia, Spain". *Building and environment*, 53, pp. 49-58. Doi: 10.1016/j.buildenv.2012.01.007.
- Pons, O. y Fuente, A. (2013).** "Integrated sustainability assessment method applied to structural concrete columns". *Construction & building materials*, 49, pp. 882-893. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.009.
- Quebec National Assambly (2006).** "Sustainable Development Act". Québec Official Publisher. 18 p.
- Rebollo, A. (1992).** "El comportamiento de la presa bóveda de Susqueda durante su segundo decenio: 1981-1990". *Revista de Obras Públicas*, nº 3315, pp. 15-39.

- Río, F.; López, C. M.; Araújo, G y Aguado, A. (2008).** "Análisis de la fisuración orientada en coronación: interacción estribo-estructura." VIII Jornadas Españolas de presas - Comité Nacional Español de Grandes Presas, 11 p.
- Romana, M. (2004).** "DMR (una adaptación del RMR), una nueva clasificación geomecánica para la cimentación de presas". 9º Congreso Luso de Geotecnia, Aveiro, 14 p.
- Ruggeri (2003).** "Sliding Safety of Existing Gravity Dams - Final Report". ICOLD - European Working Group, 111 p.
- Rus, G. del (2008).** "Análisis coste-beneficio: evaluación económica de políticas y proyectos de inversión". Ariel. 3ª Edición. Barcelona, 372 p.
- Saaty, TL. (1980).** "The Analytic Hierarchy Process". McGraw-Hill. New York, USA. ISBN:0-07-054371-2.
- Saaty, T. (2008).** "Decision making with the analytic hierarchy process". Int. J. of Services Sciences, 1, 1, 83-98. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.
- Sadiq, R. y Tesfamariam, S. (2009).** "Environmental decision-making under uncertainty using intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process (IF-AHP)". Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 23(1), pp. 75–91.
- Saleh, K.; Mosser, A.; Chekired, M.; Gagnon, J. y Rivest, M. (2003).** "Indice d'Endommagement: Classification et priorisation des travaux de réfection des barrages en béton". Rapport IREQ-2003-112C. Institut de Recherche d'Hydro-Québec (IREQ), Montréal, 51 p.
- Salmon, G.M.; Cattanach, J.D. y Hartford, D.N.D. (1996).** "Measuring and Managing the Safety at Wahleach Dam". Prociding Canadian Dam Safety Conference. Canadian Dam Safety Association, pp. 150-165.
- San José, J. T. y Garrucho, I. (2010).** "A system approach to the environmental analysis of industrial buildings". Building & Environment, 45(3), pp. 673-683.
- Sbarigia, M.; Zinetti, F.; Maugliani, V.; Palmitelli, G. y Mazzolani, S. (2013).** "Slot cutting of the Lago Colombo Dam, affected by swelling deformation, to bring the behaviour back from arch to gravity". Proceedings 9th ICOLD European Club Symposium. Venezia.
- Schnitter, N. (2000).** "La Historia de las Presas. Las Pirámides útiles". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, colección ciencias y humanidades, nº 60, Madrid, 288 p.

- Scott, G. (2011).** "The Practical Application of Risk Assessment to Dam Safety". *Geo-Risk* 2011, pp. 129-168. Doi: 10.1061/41183(418)6.
- Shahin, M. Y.; Darter, M. I. y Kohn, S. D. (1977).** "Development of a Pavement Maintenance Management System, Vol. I-V". U.S. Air Force Engineering Services Center, Tyndall AFB.
- Shahin, M.Y. y Walther, J.A. (1990).** "Pavement Maintenance Management for Roads and Streets Using the Paver System". USACERL Technical Report M-90/05. U.S. Army Corps of Engineers, 282 p.
- Shang, J.; Tjader, Y. y Ding Y. (2004).** "A Unified Framework for Multicriteria Evaluation of Transportation Projects". *IEEE Transactions on Engineering Management*, 51 (3), pp. 300-313.
- Shen, L.; Wu, Y.; y Zhang, X. (2011).** "Key Assessment Indicators for the Sustainability of Infrastructure Projects". *Journal Construction Engineering and Management*, 137(6), 441-451. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862 .0000315.
- SPANCOLD (2006).** "Dams in Spain". Colección ciencias, humanidades e ingeniería 81. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 430p. Madrid. ISBN: M-84-380-0318-4.
- SPANCOLD (2013).** "Risk Analysis Applied to Management of Dam Safety". Technical Guides on Dam Safety. Technical Guide on operation of dams and reservoirs, 1, 50p. Madrid.
- Suárez, B. y Codina, R.; (1995).** "Calculo Matricial de Estructuras". Escola Tècnica Superior de Camins Canals i Ports de Barcelona.
- Talavera, J. y Rivas Ruiz, R. (2012).** "Del juicio clínico al ensayo clínico". *Revista Médica Instituto Mexicano del Seguro Social*. Distrito Federal, México, pp 267-272.
- Tesfamariam, S. y Sadiq, R. (2006).** "Risk-based environmental decision-making using fuzzy analytic hierarchy process (F-AHP)". *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 21(1), pp 35-50.
- Tixier, R. y Mobasher, B. (2003).** "Modeling of Damage in Cement-Based Materials Subjected to External Sulfate Attack. II: Comparison with Experiments". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15 p. 314-322.
- Tolón, A. y Lastra, X. (2008).** "Los Espacios Naturales Protegidos. Concepto, evolución y situación actual en España". *M+A. Revista Electrónica de Medioambiente*, nº5, pp. 1-25.

- United Nations (2013).** "Sustainable Development Challenges. World Economic and Social Survey 2013". U. N. Publication. New York. 181 p. ISBN 978-92-1-109167-0.
- University of Colorado (1993).** "Uplift Pressure in Cracks in Concrete Gravity Dams – An Experimental Study". Electric Power Research Institute, Volume 8, Boulder, 296 p.
- Valenzuela, S.; Solminihaq de, H. y Echaveguren, T. (2010).** "Proposal of an Integrated Index for Prioritization of Bridge Maintenance". Journal of Bridge Engineering-ASCE, 15 (3), pp. 337-343. DOI: 10.1061/\_ASCE\_BE.1943-5592.0000068.
- Vallarino, E. (1991).** "Tratado básico de presas". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos: Servicio de publicaciones de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid, 975 p.
- Villegas, N. (2009).** "Análisis de valor en la toma de decisiones aplicado a carreteras". Tesis doctoral. Departamento de ingeniería de la construcción – Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- Washington State: Department of Ecology, (2007).** "Technical Note 1. Dam Break Inundation Analysis and Downstream Hazard Classification". Dam Safety Guidelines. 40 p.
- Williams, M. (2009).** "Introducción a la Gestión de proyectos". Anaya. Madrid, 224 p.
- Wu, X. y Qie, Z. (2002).** "An applied expert system used in earth dam's fault diagnosis". Proceedings of the 1st International Congress on Dam Maintenance and Rehabilitation, Madrid, pp. 223-226.
- Xu, Y. (2011).** "Analysis of dam failures and diagnosis of distresses for dam rehabilitation". Doctoral Thesis. The Hong Kong University of Science and Technology. Hong Kong. 317 p.
- Ziara, M.; Nigim, K.; Enshassi, A. y Ayyub, B. (2002).** "Strategic Implementation of Infrastructure Priority Projects: Case Study in Palestine". Journal of Infrastructure Systems, 8(1), pp. 2-11.



