

# Determinación de niveles de explotación de embalses para compatibilizar la gestión de avenidas y sequías

FRANCISCO J. MARTÍN CARRASCO(\*), LUIS M. GARROTE DE MARCOS(\*\*)  
y ALFREDO GRANADOS GARCÍA (\*\*\*)

**RESUMEN** En este artículo se presenta un método para guiar el proceso de toma de decisiones que tiene el objetivo de determinar los niveles de explotación en embalses. El método permite compatibilizar la protección frente a avenidas con el suministro de las demandas mediante la división del volumen de embalse útil en tres partes: volumen de resguardo, volumen mínimo de reservas y volumen de reserva adicional o estratégica. El método permite, además, definir el nivel de escasez, que marca el nivel mínimo en el embalse que garantiza el suministro de las demandas durante un período de tiempo  $t$ . Este período  $t$  se puede determinar por un acuerdo entre los usuarios, o puede venir impuesto por la normativa o por una autoridad superior. Cuando el nivel de embalse baja del nivel de escasez se activan las medidas para la explotación en situación de escasez, que consisten en reducir demandas y en incorporar recursos hídricos adicionales al sistema. La metodología propuesta se puede usar, además, como una herramienta para resolver los conflictos que pueden surgir entre los diferentes usuarios debido a la incompatibilidad entre los usos del embalse.

## FLOOD CONTROL AND SCARCITY MANAGEMENT IN A RESERVOIR.

**ABSTRACT** A method to guide the decision-making process to specify monthly operating levels of a reservoir is proposed in this paper. The method allows making water supply and flood control uses compatible through the division of available storage volume in three parts: flood control, conservation and strategic reserve volume. Besides, the method applies to define the scarcity threshold, which is the minimum reservoir level required to guarantee demand supply for a time period  $t$ . The period  $t$  is determined from agreement among users. When reservoir volume falls below the scarcity level, operating rules for the reservoir scarcity management are implemented to reduce demands and to incorporate additional water resources. The proposed methodology can be used as a tool to solve the conflicts that may arise among different stakeholders due to the incompatibility of reservoir uses.

**Palabras clave:** Embalses, Laminación de avenidas, Abastecimiento de agua, Inundaciones, Resolución de conflictos, Toma de decisiones, Participación de usuarios, Río Zadorra.

## 1. INTRODUCCIÓN

El aumento de los costes económicos, sociales y medioambientales debidos a la construcción de las presas ha hecho que el volumen de embalse sea un recurso escaso en muchos países desarrollados. Dado que los usos del agua tienden a incrementarse, los actuales embalses multipropósito encaran nuevos retos que deben satisfacerse aplicando estrategias de gestión en las que la participación de los usuarios juega un papel relevante (McMahon et al., 2004). Es frecuente observar como un embalse que fue inicialmente diseñado para satisfacer unas determinadas demanda de sumi-

nistro y laminación de avenidas, es incapaz de satisfacer las mayores demandas y los mayores grados de protección frente a avenidas que evolucionan tras décadas de explotación. El paso del tiempo introduce cambios en el contexto de la gestión del embalse que pueden conducir a situaciones de conflicto, dado que para algunos usuarios su prioridad es garantizar el suministro, mientras que para otros la prioridad es la protección frente a avenidas (Chuntian et al., 2002).

En este artículo se presenta un procedimiento para conducir el proceso de toma de decisiones asociado a la asignación de volúmenes de embalse entre los usuarios. El mismo procedimiento puede también aplicarse para determinar el inicio de la situación de escasez de agua en un sistema hidráulico. Una vez que esta situación se ha declarado, normas de explotación específicas se van adoptando progresivamente para reducir las demandas o para incorporar recursos adicionales al sistema. Dado que estas normas de explotación conllevan un coste social y económico, el momento en que procede declarar la situación de escasez puede generar

(\*) Profesor Titular de la Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

(\*\*) Catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid.

(\*\*\*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. INPROES.

## DETERMINACIÓN DE NIVELES DE EXPLOTACIÓN DE EMBALSES PARA COMPATIBILIZAR LA GESTIÓN DE AVENIDAS Y SEQUÍAS

controversia entre los usuarios que deben soportar los costes. El procedimiento que se describe en este artículo permite la participación de los usuarios para adoptar los niveles de embalse que marcan las situaciones de emergencia, porque se puede cuantificar los efectos de las decisiones en términos fácilmente entendibles por ellos.

El procedimiento se aplica al caso de estudio de los embalses de Ullívarri y Urrúnaga, situados sobre el río Zadorra en la cuenca hidrográfica del Ebro. Estos embalses son la fuente de abastecimiento para la ciudad de Bilbao y su área metropolitana (más de 1.000.000 de personas), pero a la vez son la única protección frente a las avenidas para la ciudad de Vitoria (más de 200.000 personas), además de tener asignado el suministro de otras demandas. La determinación del nivel máximo de agua en los embalses es motivo de frecuente controversia entre los representantes de ambas poblaciones, puesto que el nivel que Bilbao considera demasiado bajo a efecto de su garantía de abastecimiento, Vitoria lo considera demasiado alto a efecto de su protección frente a avenidas.

## 2. COMPATIBILIDAD ENTRE LOS USOS DE UN EMBALSE

### 2.1. VOLUMEN DE EMBALSE PARA COMPATIBILIZAR LA LAMINACIÓN DE AVENIDAS Y EL SUMINISTRO DE LAS DEMANDAS

El método propuesto consiste en separar el volumen útil del embalse en tres partes (Martín-Carrasco et al., 2005). La primera parte es el volumen de resguardo ( $V_F$ ) destinado a la laminación de avenidas, la segunda parte es el volumen mínimo de reservas ( $V_C$ ) destinado al suministro de las demandas y la tercera parte es el volumen de reserva adicional o estratégico ( $V_S$ ) también destinado al suministro de las demandas.

El volumen de resguardo ( $V_F$ ) representa la parte de embalse útil que se debe dejar vacía para laminación de avenidas. El volumen de resguardo se calcula mediante un estudio de laminación (Wurbs, 1996), siendo datos los hidrogramas de avenida que deben ser laminadas por el embalse y el caudal máximo permitido en el río aguas abajo de la presa. Existen dos maneras de reducir  $V_F$ : (1) considerar avenidas de menor período de retorno, lo que supondría sufrir avenidas más frecuentes aguas abajo, y (2) aumentar el caudal máximo permitido aguas abajo de la presa, lo que supondría mayores daños en las márgenes. Ambas opciones reducen el nivel de seguridad de las avenidas laminadas.

El volumen mínimo de reservas ( $V_{C,t}$ ) representa las reservas mínimas necesarias para que la demanda se satisfaga con una determinada garantía durante un período de tiempo  $t$ . Este volumen se calcula mediante un estudio de regulación (Wurbs, 1996), siendo datos las aportaciones históricas del río, la magnitud de la demanda y el nivel de garantía de suministro. Existen dos maneras de reducir  $V_{C,t}$ : (1) reducir el nivel de garantía de suministro, con lo que aumentarían los cortes en el suministro de agua, y (2) reducir la magnitud de la demanda servida, lo que supondría restricciones en la demanda. Ambas opciones reducen la fiabilidad del suministro de agua.

El volumen de reserva adicional o estratégico ( $V_S$ ) representa una reserva adicional para el suministro de demandas cuya insatisfacción tenga una repercusión social inaceptable. Se trata de un volumen para uso estratégico en caso de abastecimiento a poblaciones especialmente vulnerables. Se puede calcular como el volumen necesario para garantizar el suministro de una parte de la demanda durante un cierto período de tiempo.

Para un embalse con volumen útil  $V_A$ , el suministro de las demandas y la laminación de avenidas son compatibles cuando se cumple que:

$$V_A \geq V_F + V_C + V_S \quad (1)$$

donde  $V_C$  representa el volumen mínimo de reservas cuando el período  $t$  es igual a todo el horizonte de tiempo previsto. En los meses en que se cumple la ecuación (1), los usos del embalse son compatibles y el nivel máximo de llenado del embalse estaría determinado por  $V_A - V_F$  y el nivel mínimo determinado por  $V_C + V_S$ . Por el contrario, cuando la ecuación (1) no se cumple, es decir, cuando la suma de los tres volúmenes es superior al volumen útil del embalse,  $V_F$  o  $V_C$  deben reducirse, lo que supone reducir la protección frente a avenidas o reducir la garantía del suministro de agua. El volumen  $V_S$  no debería reducirse una vez que ha sido fijado, porque se trata de una reserva estratégica que no está relacionada con la garantía de suministro, sino con la vulnerabilidad, es decir, con la magnitud de los daños que la falta de abastecimiento supondría.

El volumen  $V_F$  se puede reducir si los usuarios aceptan reducir el período de retorno ( $T$ ) de la avenida de proyecto o si aceptan aumentar el máximo caudal ( $q$ ) vertido al cauce. El volumen  $V_C$  se puede reducir si los usuarios aceptan reducir la demanda hasta un porcentaje ( $p$ ) de la demanda inicial. Si los nuevos volúmenes  $V_F$  y  $V_C$  cumplen en ese mes la ecuación (1) existe compatibilidad, si bien se garantizan unos grados de suministro y de protección inferiores a los iniciales. Pero cuando cumplir la ecuación (1) requiere unos valores  $T$ ,  $q$  ó  $p$  inaceptables, la compatibilidad no es posible en ese mes, debiendo establecerse las actuaciones de emergencia necesarias para responder a la eventualidad de una restricción o de una inundación.

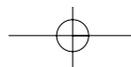
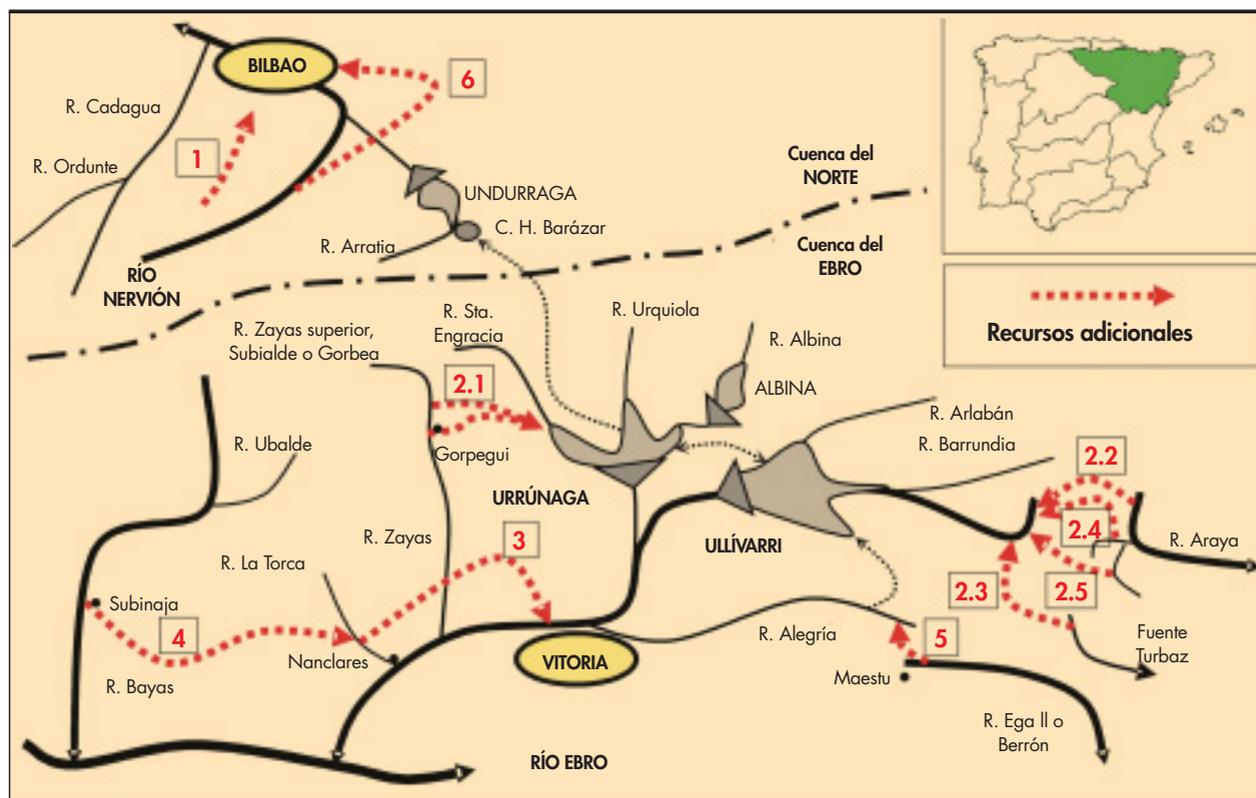
Algunas circunstancias especiales pueden permitir una reducción adicional de  $V_F$  o de  $V_C$ . Por ejemplo,  $V_F$  puede reducirse si se dispone de un sistema de información hidrológica fiable que permite anticipar las avenidas con tiempo suficiente para vaciar el volumen de resguardo. Por su parte,  $V_C$  puede reducirse en los meses en que existan reservas en forma de nieve, o si existen obras de suministro alternativo eventualmente disponibles, como es el caso de elevaciones de aguas subterráneas o de otras obras para incorporar recursos alternativos al sistema en caso de sequía.

### 2.2. VOLUMEN DE EMBALSE PARA COMENZAR LA EXPLOTACIÓN EN SITUACIÓN DE ESCASEZ

El indicador de escasez de agua más utilizado en los sistemas de recursos hidráulicos regulados es el volumen de reservas en los embalses ( $V$ ) (Cubillo et al., 2003). La situación de escasez se declara cuando el volumen almacenado por encima del volumen de reserva estratégica no es suficiente para garantizar el suministro de agua con una determinada garantía durante un cierto período de tiempo  $t$ :

$$V_{C,t} + V_S < V \quad (2)$$

El parámetro que define el inicio de una situación de escasez es el período de tiempo  $t$ , de forma que mientras más largo es este período, antes la situación de escasez es declarada. La declaración de situación de escasez conlleva la aplicación de unas reglas específicas de explotación para reducir la demanda o para incorporar recursos complementarios al sistema. Dado que estas reglas implican inconvenientes y originan costes económicos adicionales para los usuarios, la decisión para fijar el período de tiempo  $t$  más adecuado debería combinar dos objetivos contradictorios: (1) el período  $t$  debería ser lo suficientemente largo para que la temprana aplicación de las reglas de explotación en escasez puedan evitar un inaceptable déficit de agua, y (2) el período  $t$  debería ser lo suficientemente corto para evitar molestias y costes innecesarios para los usuarios.


**DETERMINACIÓN DE NIVELES DE EXPLOTACIÓN DE EMBALSES PARA COMPATIBILIZAR LA GESTIÓN DE AVENIDAS Y SEQUÍAS**

**FIGURA 1.** Esquema del sistema Zadorra con los embalses de Ullívarri y Urrúnaga.

### 3. CASO DE ESTUDIO

La metodología anterior se ha aplicado al caso de la gestión del agua de los embalses de Ullívarri y Urrúnaga, que se explotan de forma conjunta en el río Zadorra. El volumen útil conjunto es de 192,8 hm<sup>3</sup>. Los embalses se construyeron en 1957 para la producción de energía hidroeléctrica mediante el salto de Barázar, pero posteriormente se decidió utilizar también los embalses para el abastecimiento urbano e industrial de Bilbao y de su zona de influencia, con una demanda de 3,7 m<sup>3</sup>/s, y de Vitoria, con una demanda de 0,9 m<sup>3</sup>/s. Se dejaron los 0,5 m superiores de los embalses como resguardo frente a avenidas, lo que suponía un volumen vacío de 13 hm<sup>3</sup>. Como consecuencia de la sequía de 1988–1990, se realizaron seis obras de emergencia que permiten incorporar recursos adicionales al sistema. El esquema general del sistema se muestra en la Figura 1.

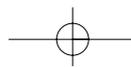
Los embalses de Ullívarri y Urrúnaga pertenecen a la compañía hidroeléctrica Iberdrola, pero su régimen de explotación se decide en la Comisión de Desembalse del Sistema Zadorra, en la que están representados la Administración del Estado (Confederación Hidrográfica del Ebro, CHE) y los usuarios (el Ayuntamiento de Vitoria, el Consorcio de Aguas Bilbao Bizcaia, denominado CABB, Iberdrola y otros usuarios menores). El principal objetivo de la Comisión es definir los niveles que en cada momento hay que mantener en los embalses.

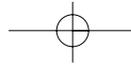
La determinación de los niveles de embalse genera conflictos entre los diferentes usuarios del embalse, cada uno defendiendo sus intereses lógicos. CABB pretende que el nivel se sitúe a la cota más alta posible para obtener una mayor garantía de abastecimiento. El Ayuntamiento de Vitoria

intenta que el nivel esté más bajo para así aumentar el resguardo frente a avenidas. Iberdrola pretende optimizar su producción hidroeléctrica, definiendo el nivel más alto posible, pero evitando a la vez que se produzcan vertidos. Cuando no hay acuerdo, la decisión la toma la CHE, procurando una alta garantía para las demandas, a la vez que la suficiente seguridad frente a las avenidas. También puede producirse conflicto entre los usuarios en la determinación del inicio de situación de escasez, lo que supone poner en funcionamiento las obras de emergencia. Algunos usuarios, especialmente el CABB, consideran que las obras deben activarse tempranamente para garantizar un mayor periodo de suministro, mientras que otros usuarios consideran que si se activan demasiado pronto se pueden ocasionar unos gastos económicos innecesarios.

#### 3.1. COMPATIBILIDAD ENTRE LA LAMINACIÓN DE AVENIDAS Y EL SUMINISTRO DE LAS DEMANDAS

Para poder aplicar la metodología propuesta se deben primeramente calcular los tres volúmenes indicados anteriormente. El volumen de resguardo ( $V_F$ ) se ha calculado mediante los correspondientes estudios de laminación para avenidas con períodos de retorno entre 5 y 1.000 años, adoptando un rango de caudales máximos vertidos entre 60 y 140 m<sup>3</sup>/s. El volumen mínimo de reserva ( $V_C$ ) se ha calculado mediante un modelo de simulación comparando las series mensuales de aportaciones y demandas durante 44 años (1957-2002). La demanda considerada para Bilbao ha sido 3,7 m<sup>3</sup>/s, que es la requerida por el CABB, aunque reducciones al 90% y al 80% también se han considerado (3,3 m<sup>3</sup>/s y 3,0 m<sup>3</sup>/s respectivamente). El volumen de reserva





**DETERMINACIÓN DE NIVELES DE EXPLOTACIÓN DE EMBALSES PARA COMPATIBILIZAR LA GESTIÓN DE AVENIDAS Y SEQUÍAS**

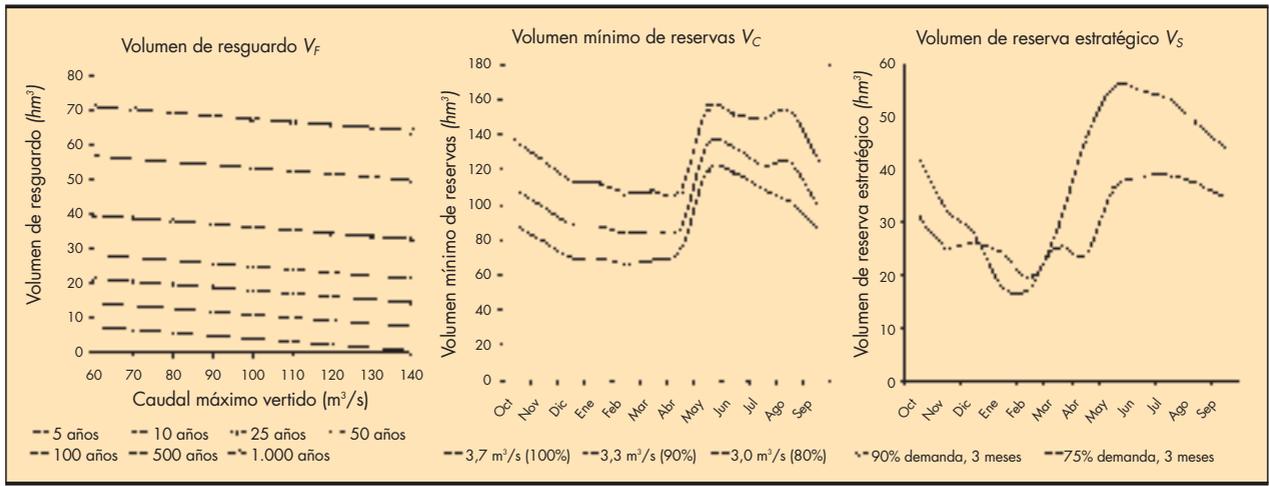


FIGURA 2. Cálculo de los volúmenes básicos  $V_F$ ,  $V_C$  y  $V_S$ .

adicional o estratégica ( $V_S$ ) se ha calculado para satisfacer plenamente una fracción de las demandas durante un determinado intervalo de tiempo. Se han analizado dos casos para  $V_S$ : satisfacer el 90% de la demanda durante 3 meses y satisfacer el 75% de la demanda durante 6 meses. Los valores que se han obtenido para  $V_F$ ,  $V_C$ , y  $V_S$  se muestran en la Figura 2.

A continuación se presenta un ejemplo con un posible proceso de negociación para fijar los niveles de embalse. En un primer escenario, se supone  $3,7 \text{ m}^3/\text{s}$  para CABB (a los que hay que sumar las demás demandas del sistema), se supone un caudal máximo vertido de  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  con la avenida de 100 años de período de retorno para la protección de Vitoria, y una reserva estratégica para satisfacer el 90% de la demanda durante 3 meses. Los correspondientes volúmenes requeridos para  $V_F$ ,  $V_C$  y  $V_S$  se obtienen de la Figura 2. Al comprobar si la ecuación (1) se satisface para cada mes se

observa que hay conflicto desde mayo a octubre, debido a que la suma de los tres volúmenes es mayor que el volumen útil de embalse  $V_A = 192,8 \text{ hm}^3$  (Tabla 1 y gráfico izquierdo de la Figura 3).

Un segundo escenario se considera desde mayo a octubre, en el cual se plantea una reducción del 10% en la demanda del CABB (que quedaría en  $3,3 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y un incremento en el caudal máximo vertido hasta  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  con la avenida de 100 años de período de retorno. Esta nueva situación tampoco es compatible desde mayo hasta agosto (Tabla 2 y gráfico central de la Figura 3).

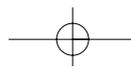
Como las avenidas en el Zadorra son poco frecuentes desde mayo a agosto, se puede reducir para esos meses la protección hasta la avenida de 50 años de período de retorno, pero manteniendo el caudal máximo vertido en  $120 \text{ m}^3/\text{s}$ . Este tercer escenario todavía es incompatible en mayo y junio (Tabla 3 y gráfico derecho de la Figura 3)

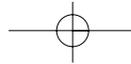
	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
$V_F$	39,8	39,8	39,8	39,8	39,8	39,8	39,8	39,8	39,8	39,8	39,8	39,8
$V_C$	135,8	124,8	114,2	112,0	106,9	107,3	107,9	155,0	151,3	149,2	153,3	126,5
$V_S$	30,9	25,5	26,1	24,1	19,6	25,5	24,0	36,3	38,6	39,1	37,2	34,7
<b>Suma</b>	<b>206,5</b>	<b>190,1</b>	<b>180,1</b>	<b>175,9</b>	<b>166,3</b>	<b>172,6</b>	<b>171,7</b>	<b>231,1</b>	<b>229,7</b>	<b>228,1</b>	<b>230,3</b>	<b>201,0</b>

TABLA 1. Primer escenario para la compatibilidad ( $\text{hm}^3$ ).

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
$V_F$	34,6							34,6	34,6	34,6	34,6	34,6
$V_C$	108,4							134,9	132,4	122,4	123,9	100,2
$V_S$	30,9							36,3	38,6	39,1	37,2	34,7
<b>Suma</b>	<b>173,9</b>							<b>205,8</b>	<b>205,6</b>	<b>196,1</b>	<b>195,7</b>	<b>169,5</b>

TABLA 2. Segundo escenario para la compatibilidad ( $\text{hm}^3$ ).





**DETERMINACIÓN DE NIVELES DE EXPLOTACIÓN DE EMBALSES PARA COMPATIBILIZAR LA GESTIÓN DE AVENIDAS Y SEQUÍAS**

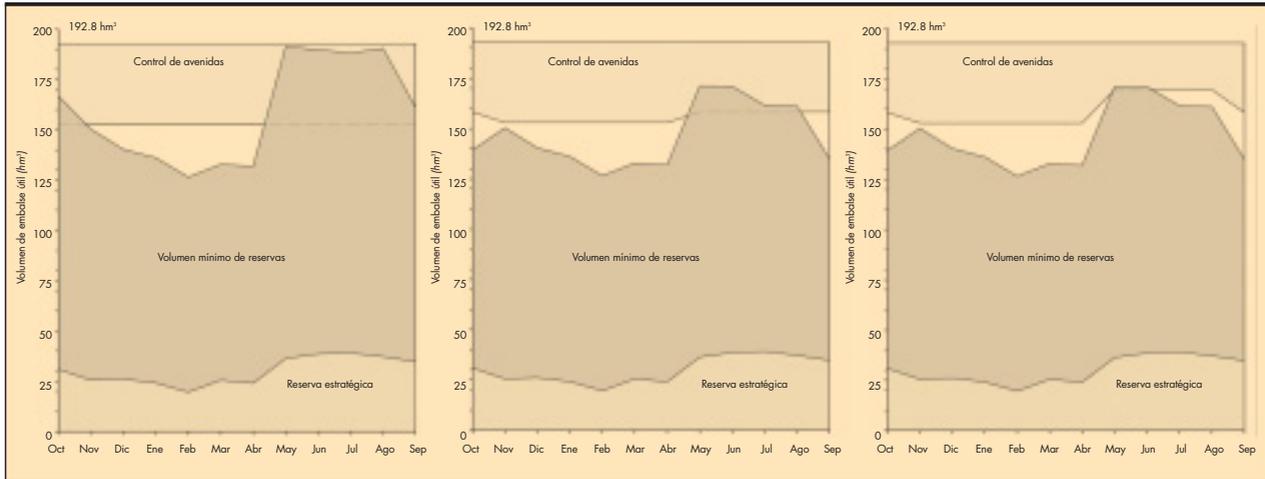


FIGURA 3. Escenarios para la compatibilidad entre los usos del embalse.

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
$V_F$								23,2	23,2	23,2	23,2	
$V_C$								134,9	132,4	122,4	123,9	
$V_S$								36,3	38,6	39,1	37,2	
<b>Suma</b>								<b>194,4</b>	<b>194,2</b>	<b>184,7</b>	<b>184,3</b>	

TABLA 3. Tercer escenario para la compatibilidad (hm³).

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
$V_A - V_F$	158,2	153,0	153,0	153,0	153,0	153,0	153,0	171,2	171,0	169,6	169,6	158,2
$V_C + V_S$	139,3	150,3	140,3	136,1	126,5	132,8	131,9			161,5	161,1	134,9
Notas:	Máximo volumen de embalse para asegurar la laminación de avenidas ..... $V_A - V_F$ Volumen para la libre turbinación ..... desde $V_A - V_F$ hasta $V_C + V_S$ Mínimo volumen de embalse para garantizar el suministro de las demandas ..... $V_C + V_S$											

TABLA 4. Escenario final para la compatibilidad (hm³).

Dado que no hay avenidas históricas registradas en mayo y junio, se puede aceptar una reducción de  $V_F$  en esos meses si se adoptan medidas adicionales para prevenir daños. Finalmente, los niveles de embalse que permiten la compatibilidad en el ejemplo planteado se muestran en la Tabla 4.

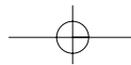
**3.2. REGLAS DE OPERACIÓN EN SITUACIONES DE ESCASEZ**

Las obras de emergencia existentes son derivaciones desde cuencas vecinas que incorporan recursos adicionales al sistema en caso de escasez de agua. Existen seis obras de emergencia disponibles que pueden utilizarse en caso de situación de escasez. Un acuerdo firmado en 1992 entre los usuarios determinó el máximo volumen de recursos que pueden ser incorporados al sistema desde cada una de estas seis obras de emergencia (Figura 4). Estas obras no actúan de junio a octubre, puesto que no se estima que haya aportacio-

nes excedentarias suficientes durante ese periodo en las cuencas donde están situadas las obras de emergencia.

Como se indicó anteriormente, el volumen mínimo de reserva ( $V_{C,t}$ ) se obtiene comparando aportaciones y demandas. Para el estudio de la explotación en condiciones de escasez, las aportaciones del sistema son las naturales más las aportadas por las obras de emergencia que estén en funcionamiento. Se considerará que las obras de emergencia entran en funcionamiento de forma progresiva, dependiendo de la evolución de la intensidad de la sequía.

El periodo  $t$  debe decidirse previamente para poder calcular el volumen  $V_{C,t}$ . Dadas las características del sistema, se considera que este periodo debe estar entre 12 y 9 meses. El límite superior se obtiene tras comprobar que el sistema no tiene regulación hiperanual. El límite inferior se obtiene debido a que las obras de emergencia sólo actúan desde noviembre a mayo, por lo que la eventual escasez de agosto de-





DETERMINACIÓN DE NIVELES DE EXPLOTACIÓN DE EMBALSES PARA COMPATIBILIZAR LA GESTIÓN DE AVENIDAS Y SEQUÍAS

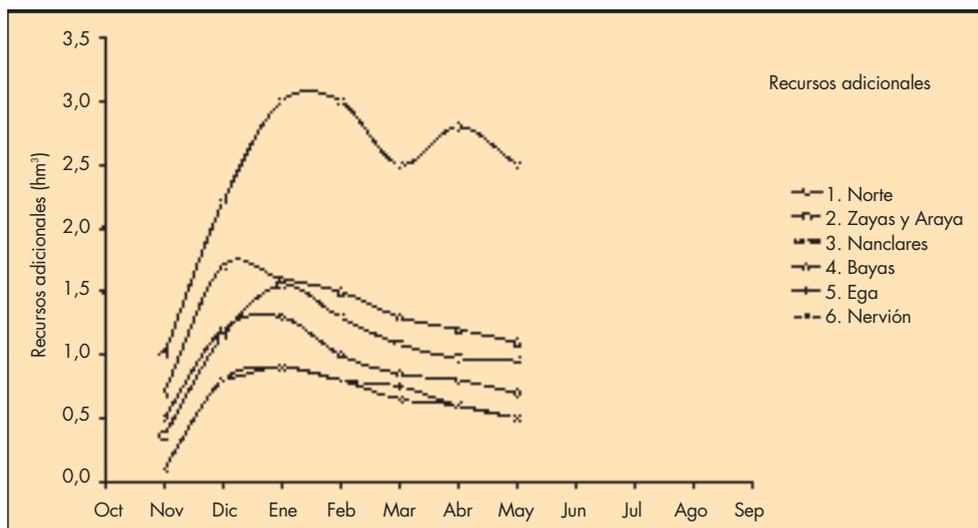


FIGURA 4. Recursos adicionales incorporados al sistema.

Recursos	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
Recursos naturales	70,4	69,3	66,3	53,8	61,1	57,5	80,1	106,3	103,7	93,7	81,9	70,5
+ 1. Norte		52,3	49,3	39,0	50,3	49,7	73,8	92,1				
+ 2. Zayas y Araya		44,9	41,9	32,8	46,0	46,7	71,5	85,7				
+ 3. Nanclares		38,6	35,5	27,6	42,7	44,3	69,5	80,1				
+ 4. Bayas		29,5	26,4	20,2	37,6	40,7	66,5	72,2				
+ 5. Ega		25,1	22,1	16,7	34,9	38,9	65,4	69,1				
+ 6. Nervi3n		20,8	17,7	13,1	32,4	37,1	64,2	68,5				

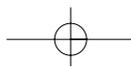
TABLA 5. Volumen m3nimo de reservas  $V_{C,t=12}$  para garantizar 12 meses ( $hm^3$ ).

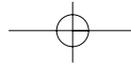
Recursos	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
Recursos naturales	57,1	44,6	39,0	38,4	61,1	57,5	80,1	88,1	93,2	93,7	81,9	69,1
+ 1. Norte		32,9	26,9	24,6	50,3	49,7	73,8	79,4				
+ 2. Zayas y Araya		27,5	21,8	18,7	46,0	46,7	71,5	75,4				
+ 3. Nanclares		22,6	17,5	14,1	42,7	44,3	69,5	71,7				
+ 4. Bayas		15,8	11,4	7,4	37,6	40,7	66,5	69,6				
+ 5. Ega		12,6	8,1	3,8	34,9	38,9	65,4	69,1				
+ 6. Nervi3n		9,3	5,0	0,4	32,4	37,1	64,2	68,5				

TABLA 6. Volumen m3nimo de reservas  $V_{C,t=9}$  para garantizar 9 meses ( $hm^3$ ).

ber3a ser anticipada no m3s tarde de noviembre. Los valores de  $V_{C,t}$  calculados para periodos de 12 y 9 meses se muestran en la Tablas 5 y 6. Cada fila de esas tablas muestra el volumen m3nimo de reservas suponiendo que est3n en funcionamiento la obra de emergencia indicada en dicha fila y todas las indicadas en las filas superiores.

Se puede comprobar que los vol3menes  $V_{C,t}$  son coincidentes entre febrero y abril. Por tanto, un acuerdo puede alcanzarse si se adopta para los meses desde octubre a enero un periodo  $t$  de 12 meses, mientras que de mayo a septiembre se considera un periodo  $t$  de 9 meses. El volumen  $V$  de embalse que satisface la ecuaci3n (2) y marca el inicio de la





**DETERMINACIÓN DE NIVELES DE EXPLOTACIÓN DE EMBALSES PARA COMPATIBILIZAR LA GESTIÓN DE AVENIDAS Y SEQUÍAS**

Recursos	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
	Garantizado durante 12 meses						Garantizado durante 9 meses					
Recursos naturales	101,3	94,8	92,4	77,9	80,7	83	104,1	124,4	131,8	132,8	119,1	103,8
+ 1. Norte		77,8	75,4	63,1	69,9	75,2	97,8	115,7				
+ 2. Zayas y Araya		70,4	68	56,9	65,6	72,2	95,5	111,7				
+ 3. Nanclares		64,1	61,6	51,7	62,3	69,8	93,5	108				
+ 4. Bayas		55	52,5	44,3	57,2	66,2	90,5	105,9				
+ 5. Ega		50,6	48,2	40,8	54,5	64,4	89,4	105,4				
+ 6. Nervión		46,3	43,8	37,2	52	62,6	88,2	104,8				

**TABLA 7.** Volumen mínimo de embalse para garantizar entre 9 y 12 meses (hm<sup>3</sup>).

situación de sequía se obtiene sumando los correspondientes  $V_{C,t}$  de las Tablas 5 y 6 con los  $V_S$  de la Figura 2. Los resultados se muestran en la Tabla 7.

El resultado final del caso de estudio se presenta en la Figura 5, donde los niveles de explotación se muestran para todas las situaciones de explotación. La banda superior de volumen del embalse se destina a la protección frente a avenidas, y sólo se debe ocupar de forma temporal durante la laminación. La segunda banda se destina a la producción hidroeléctrica, e Iberdrola podría operar libremente la central mientras que el embalse se encuentre entre esos niveles. La banda siguiente corresponde a la situación ordinaria de explotación para suministro de las demandas. El límite superior de esta banda representa el nivel de embalse requerido para garantizar (teóricamente) la demanda durante todo el periodo de tiempo. El límite inferior de esta banda es el umbral de escasez, que es el nivel de embalse que garantiza la demanda durante un período entre 9 y 12 meses.

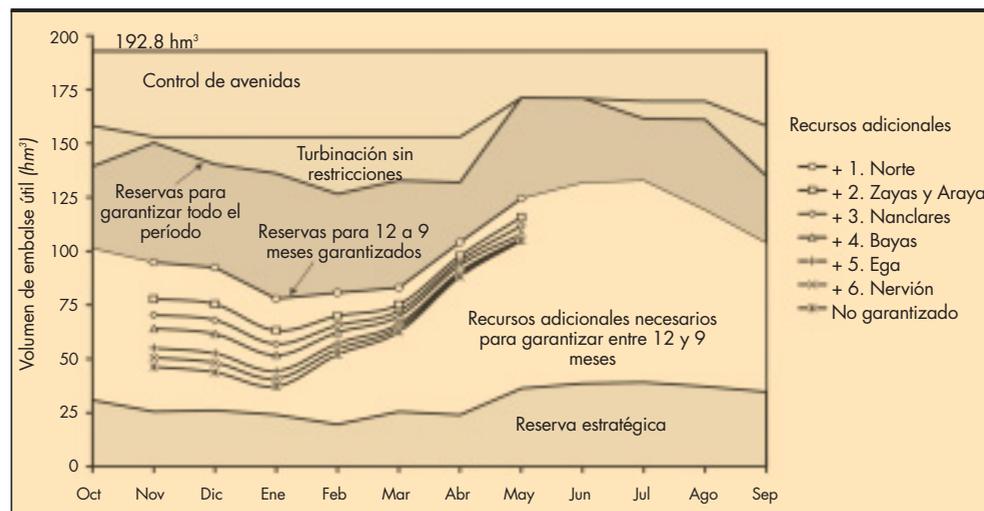
Cuando el nivel del embalse cae bajo el umbral de escasez, la situación de explotación en condiciones de escasez debería declararse y la primera obra de emergencia (Norte) se activaría. Las demás líneas dentro de la banda de explotación en condiciones de escasez representan los niveles de embalse en que se activarían el resto de las obras de emer-

gencia. Cuando el nivel del embalse cae bajo la última de esas líneas, todas las obras de emergencia están movilizadas y el sistema sólo puede superar la escasez mediante la reducción de la demanda.

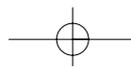
El límite inferior de la banda de escasez es el nivel de reserva estratégica. Si una sequía de mayor intensidad de lo previsto u otra circunstancia ocasiona que los niveles de embalse bajen de esta línea, se dispone de un período de 3 meses, durante los cuales se puede satisfacer el 90% de la demanda, para buscar medidas de emergencia adicionales.

**4. CONCLUSIÓN**

Se ha presentado una metodología para fijar los niveles de explotación en embalses multipropósito. Se parte de los volúmenes de embalse que garantizan completamente los objetivos de suministro de las demandas y de la laminación de avenidas, comprobando si ambos objetivos pueden cumplirse con el volumen útil disponible en el embalse. En caso de conflicto, esta metodología proporciona al responsable de la toma de decisiones suficiente información para dirigir las negociaciones entre los usuarios, pudiendo cuantificar los riesgos de inundación y de restricciones en el suministro que representan los niveles de embalse que se de-



**FIGURA 5.** Niveles de embalse para garantizar entre 12 y 9 meses.





## DETERMINACIÓN DE NIVELES DE EXPLOTACIÓN DE EMBALSES PARA COMPATIBILIZAR LA GESTIÓN DE AVENIDAS Y SEQUÍAS

finen en cada escenario de la negociación. El mismo procedimiento puede aplicarse para determinar los niveles de embalse que suponen la progresiva activación de las obras de emergencia durante una situación de sequía. La aplicación de la metodología se ha validado mediante su aplicación a los embalses de Ullívarri y Urrúnaga en el río Zadorra, puesto que podría permitir alcanzar un satisfactorio consenso entre los usuarios.

### 5. REFERENCIAS

CHUNTIAN, C. and CHAU, K.W. 2002: Three-person multi-objective conflict decision in reservoir flood control. *European Journal of Operational Research*, 142. Elsevier.

MARTIN-CARRASCO, F.J., GARROTE, L. and MEDIERO, L. 2005: Resolution of conflicts between water supply reliability and flood control. The case of the Zadorra river. *3<sup>rd</sup> International Conference on Efficient Use and Management of Water*. Santiago de Chile.

MCMAHON, G.F. and FARMER M.C. 2004: Reallocation of Federal Multipurpose Reservoirs: Principles, Policy and Practice. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130. ASCE.

WURBS, R.A. 1996: Modeling & Analysis of Reservoir System Operations. Prentice Hall PTR.

CUBILLO, F. and IBÁÑEZ. 2003: Manual de Abastecimiento del Canal de Isabel II. Canal de Isabel II, Madrid.

### 6. AGRADECIMIENTOS

Se reconoce y agradece la contribución y el apoyo prestados por la Comisaría de Aguas de la Confederación Hidrográfica del Ebro, especialmente a M<sup>a</sup> Cruz Pintor Ruano, Ingeniera de Caminos del Servicio de Gestión del Dominio Público Hidráulico.

## PLANES DE EMERGENCIA DE PRESAS

Actualmente la normativa vigente en materia de seguridad de presas y embalses establece que todas las presas clasificadas en categorías A y B han de disponer de un plan de emergencia (PEP) que garantice sus óptimas condiciones de utilidad y seguridad, evitando posibles daños a personas, bienes y medio ambiente.

Con este objetivo, los PEP representan una herramienta indispensable en las obras hidráulicas y han de determinar, en función de los escenarios de seguridad y peligro, la planificación de los recursos humanos y materiales necesarios en situaciones de emergencia, así como establecer un sistema de información y comunicación a las autoridades de Protección Civil competentes, para que se activen un conjunto de actuaciones preventivas y de aviso a la población reduciendo o eliminando los daños potenciales.

En este sentido, los planes de emergencia han de quedar perfectamente definidos en módulos de gestión de incidencias y alerta, control de comunicaciones y sistema de aviso a la población, representando un sistema abierto, ampliable y parametrizable según las necesidades de cada presa. Asimismo, a fin de obtener una óptima gestión de la emergencia, caben señalar las ventajas a nivel de rapidez y eficacia que ofrecen las herramientas de ayuda a la decisión (tales como sistemas de modelización hidrológicas, de predicción de carácter meteorológico, hidrológico, etc.).

Esta es la línea de actuación que ha seguido Adasa Sistemas, ingeniería de sistemas y servicios aplicados al ciclo integral del agua y medio ambiente. Adasa Sistemas ha desarrollado una solución informática para la gestión de incidencias y alertas, aplicable tanto a un Centro de Control de una presa como a un

grupo de presas. Sus funcionalidades básicas son ayudar al responsable de explotación en la toma de decisiones sobre el escenario de alerta a activar, así como guiar al técnico de la sala de emergencia en las posibles actuaciones (avisos, activación sirenas, inspecciones, etc.).

Además el módulo de gestión de incidencias proporciona trazabilidad completa de las operaciones ejecutadas, facilita la realización de simulacros y el chequeo del conjunto del sistema.

Por otro lado, dispone de soluciones tecnológicas para la comunicación y control de los sistemas de sirenas vía radio UHF convencional y GPRS, así como para la integración de estos sistemas en redes de radio digital basadas en el estándar TETRA. Estas redes se encuentran operativas en los sistemas SAIH de algunas cuencas hidrográficas y, en algunas Comunidades Autónomas, se utilizan para las comunicaciones de Protección Civil.

En base a la experiencia en desarrollo e implantación de sistemas de misión crítica, como es el caso de los SAIH y los nuevos sistemas de aviso a la población, los equipos con soporte para comunicación redundante, con comunicaciones duales Radio-GPRS o TETRA-GPRS son los más indicados.

En la actualidad, Adasa Sistemas está desarrollando la implantación de los Planes de Emergencia de las presas de Calanda, Caspe, La Estanca de Alcañiz, Gallipuen, Santolea y Laverné, en la cuenca del Ebro, así como de la nueva presa de Montoro en la cuenca del Guadalquivir.

Sergio DE CAMPOS PAUS  
ADASA SISTEMAS

