

# ESTUDIO HIDRÁULICO PARA EL PLAN DE EMERGENCIA DEL CANAL DE LA MARGEN IZQUIERDA DEL DELTA DEL EBRO

**Joan Soler, Manuel Gómez**

E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona  
Dpto. de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental  
Universidad Politécnica de Catalunya  
Miembros del grupo Flumen de la UPC  
joan.soler@upc.edu

**José Rodellar**

E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona  
Dpto. de Matemática Aplicada III  
Universidad Politécnica de Catalunya

**Resumen:** Se presenta el estudio hidráulico para poder aislar, en el menor tiempo posible y sin desbordamientos, la red de canales del Canal de la Margen Izquierda del Delta del río Ebro. Ello se consigue mediante el cierre cuasi instantáneo del Canal de Conducción -fuente de alimentación de todo el sistema- en caso de una emergencia, como por ejemplo, la llegada de un vertido de contaminantes por el río Ebro. La operación de cierre de 7,3 horas de duración total consta de tres fases. La Fase 1 de 3 horas pone el canal en un estado de transporte de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  -de los  $19 \text{ m}^3/\text{s}$  máximos de la concesión- de manera que se consigue un resguardo suficiente para la ejecución de las fases siguientes. La Fase 2, también de 3 horas de duración, pone el canal en un estado de transporte de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  a partir del estado final de la Fase 1 de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ . Este cambio de estado del canal tan brusco se consigue con la aplicación sobre el canal de las "trayectorias de compuerta" calculadas en el contexto de un sistema de control centralizado en lazo abierto mediante el algoritmo "GoRoSo". Finalmente, en la Fase 3, de duración mínima de 1,3 horas, se produce el cierre absoluto del Canal de Conducción. El objetivo es mantener el canal cerrado y lleno, lo que evitaría la entrada de agua contaminada desde el exterior.

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

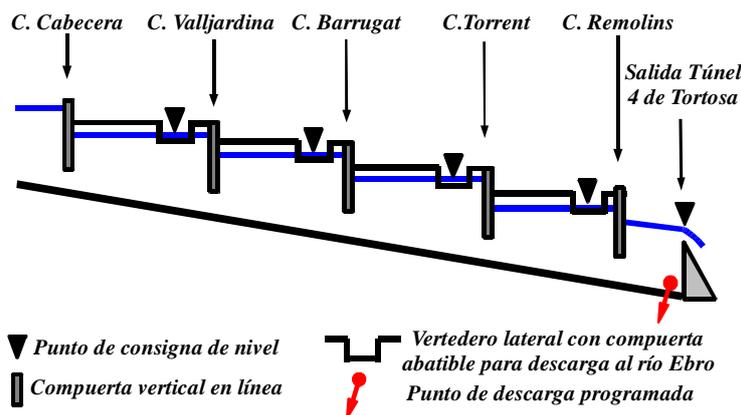
El presente trabajo consiste en un estudio hidráulico de control centralizado a incluir en el Plan de Emergencia del Canal de la Margen Izquierda del Delta del Ebro. El ámbito de estudio es el Canal de Conducción (CC) que es el tramo de 14 Km que va desde cabecera en el Azud de Xerta-Tivenys y la entrada al Túnel número 4 -túnel de paso del canal por debajo de la ciudad de Tortosa-. El cierre de este tramo de canal supone el aislamiento del sistema de Canales de la Margen Izquierda (CMI).

La actual falta de compuertas de cierre en línea para el seccionamiento del CC obliga al vaciado total del tramo cuando se desea cerrarlo para llevar a cabo las tareas de mantenimiento. Por este motivo la dirección técnica del canal de la "Comunitat de Regants Sindicat Agrícola de l'Ebre" (CRSAE) se ve obligada a cerrar el CC paulatinamente, al menos durante un mínimo de 5 días, para evitar los efectos indeseables de la

subpresión.

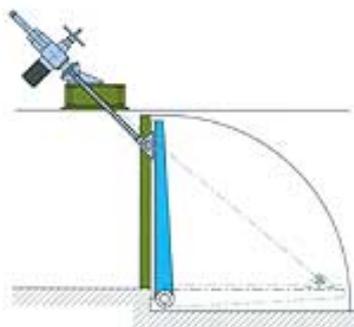
Por otro lado, en ACA (2007) y en ACUA-MED (2007) se especifica que el tiempo de viaje de un vertido contaminante desde el embalse de Flix hasta el azud de Xerta-Tivenys -donde se encuentra la entrada al CC- de una avenida de  $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$  es de unas 7,3 horas. Por consiguiente, un cierre del CC de 5 días resulta inadecuado en caso de una avenida de este tipo.

Para resolver esta problemática, se han propuesto ciertas actuaciones sobre el CC para acabar de completar el sistema de control centralizado que permita su cierre en menos de 7,3 horas. El sistema de control que se propone es un sistema centralizado en lazo abierto que telecontrole las siguientes infraestructuras hidráulicas (Figura 1): 5 compuertas en línea -denominadas C. Cabecera (ya operativa), C. Valljardina, C. Barrugat, C. Torrent y C. Remolins (ya operativa)- y 4 descargas laterales situadas lateralmente justo



**Figura 1.** Esquema representativo del Canal de Conducción. Este canal conduce el agua del río Ebro desde el azud de Xerta-Tivenys hasta Tortosa, y de ahí toda la red de Canales de la Margen Izquierda. El vertedero en línea situado en la Salida del Túnel 4 de Tortosa no existe y se ha ubicado para la definición de las Condiciones de Contorno de aguas abajo

aguas arriba de las compuertas en línea. Estas descargas deben ser de tipo compuerta-vertedero abatible y regulable como la mostrada en la Figura 2. En el presente trabajo se supone que dichas actuaciones han sido ejecutadas.



**Figura 2.** Esquema de una compuerta abatible (Fuente: "http://www.cmo.es"). Se han proyectado cuatro compuertas laterales con la parte inferior de 2,5 m inmóvil y la parte superior de 50 cm abatible

Estas actuaciones fueron situadas de forma estratégica cada cierta distancia, de manera que un vez cerrado el canal, el agua permanezca en su interior a una cota tal que solamente quede seco, como máximo, 1 m de revestimiento. Cabe mencionar aquí que el revestimiento del canal tiene una coronación 3 m por encima de la solera y que hay 3 m de desnivel entre la cota de la solera en la entrada del canal y la de la entrada al Túnel 4 de Tortosa, en Remolins.

Para llevar a cabo el cierre del canal en un tiempo inferior a las susodichas 7,3 horas con suficientes garantías de no rotura del revestimiento por subpresión, se estudiaron dos alternativas hidráulicas: la primera, consistente en la

construcción de vertederos de alta capacidad de desagüe en línea tipo "pico de pato" -alternativa claramente más robusta porque el cierre y la abertura del CMI solamente depende de las compuertas de cabecera, pero más larga de ejecución- y la segunda, consistente en la construcción de compuertas reguladoras en línea con control centralizado y de tipo predictivo -alternativa más rápida de ejecución y económica, pero menos robusta porque el sistema depende ahora del buen funcionamiento de los cinco puntos de control y telemando-. De las dos alternativas estudiadas, se optó por la segunda dada la premura de tiempo en que se tiene que tener operativo el Plan de Emergencia.

Los objetivos perseguidos en el diseño de las fases de cierre y apertura que han motivado la redacción del presente estudio son:

1. Cerrar y abrir el canal en el menor tiempo posible sin causar daños al revestimiento ni provocar desbordamientos (evitando grandes variaciones de calado en el canal).
2. Disponer de las máximas reservas de agua en el interior del canal una vez cerrado.
3. Mantener el nivel piezométrico en el interior del canal lo más alto posible una vez cerrado para generar un gradiente hidráulico que genere un flujo de agua a través del revestimiento desde dentro del canal hacia fuera, hacia el río.

## OBJETIVOS

El trabajo tiene por objetivos el describir las fases en que se subdividen las operaciones de cierre y apertura del CC -en términos de algoritmos de control- y el presentar el modelo

hidráulico del CC que ha servido para evaluar la bondad de dichos algoritmos –desde el punto de vista hidráulico–. El modelo debe reproducir el comportamiento hidráulico en condiciones no estacionarias. También es objetivo del trabajo el planteamiento matemático subyacente en el algoritmo de cálculo de las trayectorias de compuerta denominado “GoRoSo”.

## MODELO HIDRÁULICO

El cálculo de las trayectorias de compuerta para las operaciones de cierre y apertura se ha basado en un modelo hidráulico que permite simular el comportamiento del canal ante unos determinados movimientos de compuerta. Con una herramienta de estas características es posible la utilización del algoritmo “GoRoSo” -Soler (2003), Soler *et al.* (2004) y Soler *et al.* (2008)- para la computación de las trayectorias de compuerta. Aquí se entiende por trayectoria de compuerta la secuencia de posiciones/aberturas de las compuertas a lo largo del transitorio.

Un modelo hidráulico de un canal es una herramienta matemática capaz de reproducir el comportamiento del flujo en lámina libre en el canal, es decir, se trata de una herramienta capaz de predecir las condiciones hidrodinámicas que se producirán a lo largo del tiempo ante la acción de los mecanismos hidráulicos móviles de control. En este trabajo, el modelo hidráulico se basa en la resolución del sistema de dos ecuaciones en su forma completa, llamadas de Saint-Venant, que son consideradas como el mejor modelo predictivo del flujo en lámina libre conocido hasta el momento.

El flujo de agua en lámina libre a lo largo del CMI, que es un canal prismático, puede ser descrito mediante el sistema de ecuaciones de Saint-Venant en una sola dimensión. Se trata de un sistema en derivadas parciales de tipo hiperbólico, quasi-lineal y de segundo orden. Las dos ecuaciones que lo constituyen están basadas en los principios físicos de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento. Como todo sistema hiperbólico es susceptible de ser transformado en su forma característica. Dado que las ecuaciones de Saint-Venant no tienen solución analítica conocida, se resuelven numéricamente mediante el método de las características descrito en Gómez (1988).

Todo modelo hidráulico necesita una geometría determinada basada en una cartografía con suficiente precisión. En base a esta cartografía se debe modelar el canal, es decir, definir tramos con propiedades geométricas e hidráu-

cas homogéneas. Además, también deben definirse las uniones entre tramos (puntos con cambios de propiedades), lo que se llama condiciones interiores y finalmente hay que establecer las condiciones de contorno.

## Geometría

Dado que en el momento de la implementación del modelo hidráulico el canal se encontraba en pleno rendimiento, la geometría ha sido hecha solamente en base a dos poligonales representativas de las coronaciones derecha e izquierda del canal. Dichas poligonales se han obtenido de la topografía encargada *ex-profeso*, que consistió en el establecimiento de un conjunto de 11 bases de replanteo a lo largo de 14 Km del canal situadas en la coronación. Para la obtención de la cota eje de la solera del canal se ha considerado que el revestimiento del CC se encuentra en buen estado de conservación y que está constituido únicamente por piezas prefabricadas de 3 m de altura y un talud (H:V) de 0,176327.

Las cotas del eje del canal se han obtenido a partir de las medias de las cotas de coronación a las que se le ha restado los 3 m de profundidad de las piezas prefabricadas. Suponiendo que las piezas de prefabricado están bien colocadas y que todas ellas miden los preceptivos 3 m de altura, es de esperar que el eje esté bien calculado. Esta suposición ha sido hecha porque hasta la fecha no se ha podido entrar dentro del canal puesto que sigue operativo.

## Tramos

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, el canal se ha subdividido en 17 tramos homogéneos de igual sección trapezoidal y pendiente. Las características de cada tramo se muestran en la Tabla 1.

## Almenaras

Se entiende por almenara (Figura 3) un ensanchamiento de la sección del canal donde concurren un vertedero lateral a través de un labio de altura modificable mediante la compuerta/vertedero abatible, una extracción por bombeo programado y una compuerta de tajadera en línea. En una almenara, se verifican los principios de conservación de la masa y de la energía que se expresan mediante las siguientes ecuaciones:

$$A[y_e(k)]v_e(k) = q_b + q_s + A[y_s(k)]v_s(k) \quad (1a)$$

$$A[y_s(k)]v_s(k) = q_c \quad (1b)$$

donde  $y_e(k)$ ,  $v_e(k)$ ,  $y_s(k)$  y  $v_s(k)$  son los calados y las velocidades a la entrada y a la salida

de la almenara, respectivamente;  $A[y]$  es el área mojada,  $q_b$  el caudal de extracción por bombeo programado para el instante  $k$  y  $q_c$  es el caudal de paso bajo compuerta que vale:

$$q_c = C_c a_c u(K) \sqrt{2g[y_e(k) + d - y_s(k)]} \quad (2)$$

donde  $C_c$  es el coeficiente de desagüe de la compuerta;  $a_c$  es el ancho de la compuerta;  $u(K)$  es la abertura de la compuerta en el instante  $k$  de simulación en el periodo  $K$  de la trayectoria de la compuerta;  $d$  es el salto geométrico de la almenara;  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $q_s$  es el caudal de salida lateral a través del vertedero lateral que vale

$$q_s = C_s a_s \sqrt{2g[y_e(k) - y_0]^{3/2}} \quad (3)$$

donde  $C_s$  es el coeficiente de desagüe del vertedero;  $a_s$  es el ancho del vertedero y  $y_0$  es la altura del labio, variable en función del abatimiento de la compuerta.

Las características de las compuertas en línea de las almenaras se muestran en la Tabla 2.

Hay que hacer notar que las compuertas han sido simuladas teniendo en cuenta que (2) es la expresión que corresponde al flujo a través de una compuerta con el resalto inundado y cuando está suficientemente abierta. Para una modelización más precisa, debería contarse con las funciones empíricas de descarga que deben ser suministradas por los fabricantes de compuertas. A pesar de ello, los resultados finales en cuanto a las trayectorias de compuerta es de esperar que no varíen demasiado.

Tramo	Nodo Inicial	Nodo Final	Cota Inicial (m)	Cota Final (m)	Longitud (m)	Profundidad de canal (m)	Coef. de Manning	Ancho Solera (m)	Talud	Comentario
1	1	4	7,06	7,21	75	3,0	0,016	8,0	0,000000	Cabecera
2	5	50	7,21	6,98	1125	3,0	0,016	7,6	0,176327	
3	51	78	6,98	6,83	675	3,0	0,016	7,6	0,176327	
4	79	99	6,83	6,78	500	3,0	0,016	7,6	0,176327	
5	100	104	6,78	6,65	100	3,0	0,016	4,0	0,000000	Pretúnel 1
6	105	153	6,65	6,01	1200	3,0	0,016	4,0	0,000000	Túnel 1
7	154	226	6,01	5,89	1800	3,0	0,016	10,0	0,176327	
8	227	241	5,89	5,63	350	3,0	0,016	4,0	0,000000	Túnel 2
9	242	255	5,63	5,61	325	3,0	0,016	8,2	0,176327	
10	256	258	5,61	5,63	50	3,0	0,016	10,5	0,000000	BARRUGAT
11	259	263	5,63	5,55	100	3,0	0,016	8,0	0,176327	POBLADO
12	264	391	5,55	5,3	3175	3,0	0,016	10,5	0,176327	
13	392	431	5,3	5,22	975	3,0	0,016	8,2	0,176327	
14	432	458	5,22	5,12	650	3,0	0,016	10,5	0,176327	
15	459	469	5,12	4,98	250	3,0	0,016	4,0	0,000000	Túnel 3
16	470	537	4,98	4,63	1675	3,0	0,016	10,5	0,176327	
17	538	543	4,63	3,89	100	3,0	0,016	4,0	0,000000	REMOLINS
18	544	612	3,89	3,29	1700	3,0	0,016	3,8	0,000000	Túnel 4 TORTOSA

Tabla 1. Características geométricas de los tramos de canal del modelo

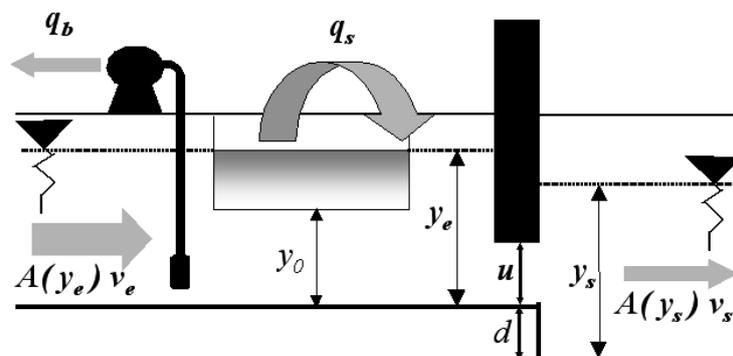


Figura 3. Esquema de una almenara con una compuerta, un vertedero lateral y un bombeo programado

Almenara	Tramo aguas arriba	Tramo aguas abajo	Número de unidades	Ancho (m)	Ancho total de paso bajo compuerta (m)	Coefficiente de desagüe	Salto d (m)	Recorrido máximo (m)	Comentario
1	-	1	2	4	8	0,61	0,0	3,0	Cabecera
2	5	6	1	4	4	0,61	0,5	3,0	Valljardina
3	9	10	4	2	8	0,61	0,0	3,0	Barrugat
4	14	15	1	4	4	0,61	0,0	3,0	Torrent
5	16	17	1	4	4	0,61	0,7	3,0	Remolins

**Tabla 2.** Características geométricas de las compuertas

Transición	Tramo aguas arriba	Tramo aguas abajo	$C_s a_s \sqrt{2g}$ (3)	Altura labio (m)	Coefficiente de Manning	Longitud Transición (m)	Coefficiente de convergencia y/o divergencia	Comentario
1	1	2	0,0000	-	0,016	20,0	0,2	
2	2	3	0,0000	-	0,016	20,0	0,0	
3	3	4	5,4000	2,5/2,95	0,016	20,0	0,0	
4	4	5	45,0000	-	0,016	20,0	0,2	Descarga Valljardina
5	6	7	0,0000	-	0,016	20,0	0,3	
6	7	8	0,0000	-	0,016	20,0	0,2	
7	8	9	0,0000	-	0,016	20,0	0,3	
8	9	10	10,8000	2,5/2,95	0,016	20,0	0,3	Descarga Barrugat
9	11	12	0,0000	2,5/2,95	0,016	20,0	0,2	
10	13	14	4,9180	2,5/2,95	0,016	20,0	0,3	
11	15	16	2,7000	2,5/2,95	0,016	20,0	0,3	Descarga Torrent
12	16	17	10,9000	2,5/2,95	0,016	20,0	0,2	Descarga Remolins

**Tabla 3.** Características geométricas de los cambios de sección

**Cambios de sección**

Las conexiones sin compuerta son transiciones de cambio de sección y/o de pendiente, que incluyen también un vertedero lateral y un bombeo programado. En un cambio de sección, también se verifican los principios de conservación de la masa y de la energía que se expresan mediante las siguientes ecuaciones:

$$A [y_e(k)] v_e(k) = A [y_s(k)] v_s(k) + q_b + q_s \tag{4a}$$

$$y_e(k) + \frac{v_e^2(k)}{2g} + d = y_s + \frac{v_s^2(k)}{2g} + L_T \frac{S_f [y_e(k), v_e(k)] + S_f [y_s(k), v_s(k)]}{2} + c_{DC} \frac{|v_e^2(k) - v_s^2(k)|}{2g} \tag{4b}$$

donde  $c_{DC}$  es el coeficiente de divergencia/contracción de la transición;  $L_T$  es la longi-

tud de la transición y  $S_f$  es la función de pérdidas de carga que vale:

$$S_f(y, v) = n^2 \frac{v \times |v|}{\left(\frac{A(y)}{P(y)}\right)^{4/3}} \tag{5}$$

donde  $n$  es el coeficiente de pérdidas de carga de Manning.

Los parámetros de los cambios de sección del CC pueden verse en la Tabla 3.

**Condiciones de contorno**

Puesto que el canal se estudia en condiciones de régimen lento hay que establecer una condición de contorno aguas arriba y otra aguas abajo.

a) *Condición de contorno del extremo aguas arriba*

En cabecera existen dos compuertas de 4 m de ancho que regulan el caudal de entrada del río Ebro mediante el control del nivel de aguas

arriba y de aguas abajo. Por lo tanto, la condición de contorno para el extremo de aguas arriba es la de calado conocido. Sabiendo que  $y_e(k) = H_{UPPS}(k)$  la ec.(1b) se establece como condición de contorno de aguas arriba de CC.

La función de nivel  $H_{UPPS}(k)$  es el nivel de agua del río que se ha supuesto constante en el cálculo de las trayectorias de compuerta. Durante el cierre del canal que dura 7,3 horas esto no tiene por qué ser así por lo tanto, la trayectoria de la compuerta de cabecera debe adaptarse en tiempo real para generar un hidrograma de caudal idéntico al generado por las trayectorias de compuerta calculadas. Aprovechando la capacidad de medida de los niveles de aguas arriba y de aguas abajo del controlador situado en cabecera, y conociendo el hidrograma de caudal generado en la simulación del modelo hidráulico esta vez considerado a modo de consigna se puede hallar la posición instantánea de la compuerta en tiempo real de la siguiente manera:

$$u(k) = \frac{q(k)}{C_c a_c \sqrt{2g [H_{UPPS}(k) + d - y(k)]}} \quad (6)$$

donde  $H_{UPPS}$  e  $y(k)$  son ahora medidos en tiempo real y  $q(k)$  es un resultado del modelo hidráulico que aquí actúa a modo de consigna.

#### b) Condición de contorno del extremo aguas abajo

Para el extremo de aguas abajo –justo a la salida del Túnel 4– se ha establecido una condición de contorno tipo vertedero con una descarga programada de manera que el caudal de llegada al contorno se distribuye entre la parte descargada de valor prefijado (Figura 4) y el resto vertido:

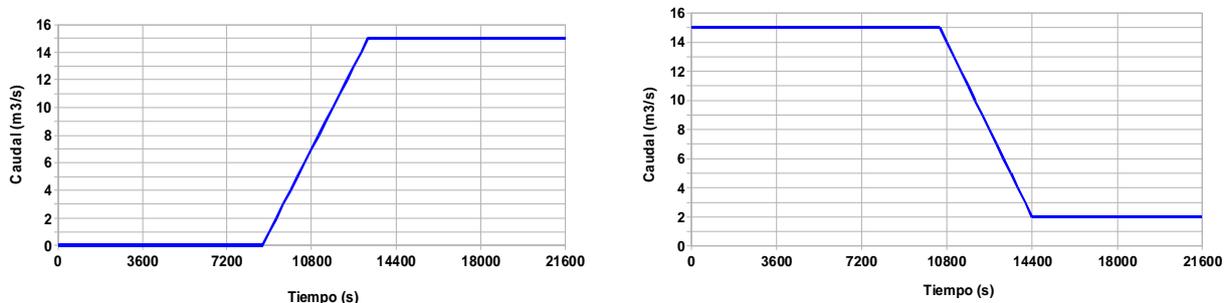
$$q(k) = q_b(k) + C_s a_s \sqrt{2g} [y(k) - y_0]^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

donde  $q(k)$  e  $y(k)$  son el caudal y el calado en el contorno en el instante  $k$ ;  $q_b(k)$  es el caudal de descarga programado (Figura 4);  $C_s$  es el coeficiente de desagüe del vertedero que vale 0,61;  $a_s$  es el ancho del labio que vale 999,9 m para simular la salida de agua del sistema cuando se produce un desbordamiento, es decir, cuando  $y > y_0$  y  $y_0$  es la altura del labio respecto de la solera del canal que vale lo mismo que la altura de la coronación, en el CC vale 3 m.

Esta condición de contorno intenta reproducir el hecho de que cuando el hidrograma de caudal de llegada al extremo de aguas abajo –que es el resultado de las operaciones de las compuertas en línea– difiere del hidrograma de descarga programado se produce o bien un desbordamiento o bien un secado excesivo del canal, es decir, un alejamiento del nivel del canal de la consigna. Con la regulación de las compuertas que se propone aquí, se mantiene el nivel a la consigna de 2,5 m de manera que el hidrograma de caudal de llegada es igual al hidrograma de bombeo programado. De este modo, se evita la entrada en funcionamiento del revestimiento como vertedero y el secado del canal. Este es precisamente uno de los objetivos perseguidos por el algoritmo “GoRoSo”.

#### OPERACIÓN DE CIERRE

Básicamente son dos las operaciones que hay que llevar a cabo. La primera operación consiste en cerrar el canal tras la recepción de la alarma. La segunda operación consiste en la abertura del canal. La operación de cierre tiene una duración de 7,3 horas y consta de 3 etapas o fases. A continuación se describe cada una de estas fases.



**Figura 4.** Dos ejemplos de hidrograma de caudal de descarga/bombeo programado para la definición de la condición de contorno del extremo de aguas abajo: el de la izquierda se corresponde con el problema de apertura del canal y el de la derecha con el cierre a la salida del Túnel 4 de Tortosa

### Fase 1 del cierre

La Fase 1 del cierre es la fase inicial en la que las compuertas toman contacto con la superficie del agua puesto que hasta el momento del disparo de la alarma, han permanecido totalmente abiertas fuera del agua. Las compuertas se ponen en posición de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  con un solo movimiento de compuerta y se mantienen así durante 3 horas hasta que el flujo se vuelve constante, estacionario. La razón por la cual se fija el caudal en  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  es doble:

- Dado que el estado estacionario correspondiente a un caudal de  $19 \text{ m}^3/\text{s}$  (caudal nominal) se encuentra “muy cercano” al de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  es posible realizar el posicionamiento de las compuertas dentro del agua en un solo movimiento, de una manera casi instantánea.
- En estas circunstancias, es posible conseguir un resguardo superior a los 50 cm en todo el canal, el cual resulta suficiente para absorber las oscilaciones de la lámina producidas en la Fase 2 del cierre.

Para ayudar a la consecución del estado estacionario final de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ , en esta fase, deben de abatirse completamente los vertederos regulables de las compuertas/vertedero (Figura 2) hasta cota 2,5 m de la solera para actuar a modo de vertedero de seguridad durante el transitorio.

El problema principal que se tiene es que se desconoce el estado inicial del canal en el momento de iniciarse la fase, aunque el caudal máximo de transporte de  $19 \text{ m}^3/\text{s}$  sea el más probable. Así, el canal puede estar cerrado con lámina o sin ella -como por ejemplo durante el período de cierre por mantenimiento de las instalaciones- o transportando cualquier caudal -comprendido entre los  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  del canal cerrado y los  $19 \text{ m}^3/\text{s}$ -. Además, a lo largo del Canal de Conducción existen un gran número de tomas de usuario que pueden estar abiertas o cerradas en el momento de la alarma.

Y si el caudal transportado es nulo, es recomendable abrir las compuertas en esta fase para

poder almacenar la máxima cantidad posible de agua sin contaminar tanto en el CC como aguas abajo del mismo. Esta apertura debe ser rápida ya que el estado inicial de  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  se encuentra “muy lejos” del estado final de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ , por lo que debe de realizarse con siguiendo las trayectorias de la Fase 1 de apertura que se describen más adelante.

Sea como fuere, lo que si que está claro es el estado final a que se debe llegar antes de iniciarse la Fase 2 de cierre. Este estado es el que se corresponde a un transporte de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  y una curva de remanso en estado estacionario. En estas condiciones, las posiciones de compuerta que generan una curva de remanso de estas características viene dada en la Tabla 4.

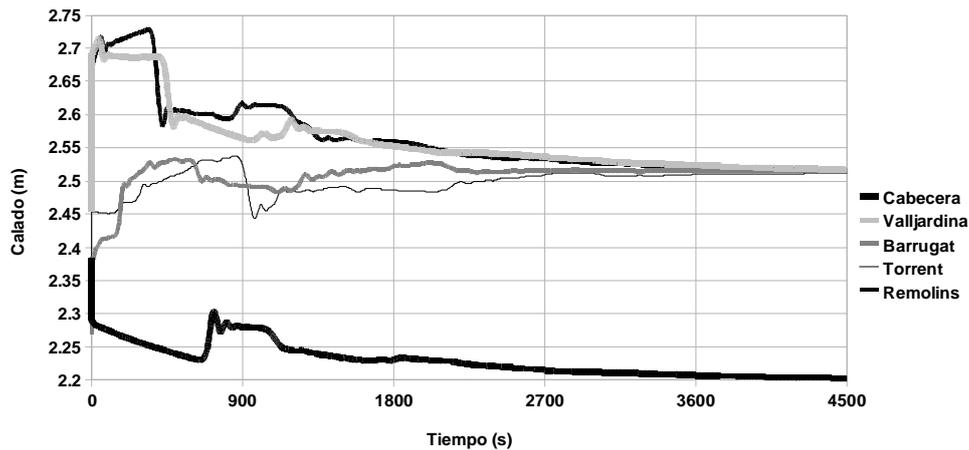
Si se supone que inicialmente las compuertas se encuentran totalmente abiertas sin interferir con el flujo y que con un solo movimiento de compuerta -en ese caso dentro de los 5 minutos establecido como tiempo de muestreo- adoptan la posición indicada en la Tabla 4, entonces dentro del canal se produce un transitorio cuyo estado final corresponde al caudal de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Este planteamiento resulta óptimo si se considera que el canal debe de estar completamente lleno durante el episodio de una avenida contaminada. El estado de canal cerrado con lámina de agua alta permite la protección del sistema porque se genera un gradiente hidráulico que permite expulsar agua no contaminada al exterior del canal creándose un escudo protector a la entrada de agua contaminada del río. Por ello, si en el momento de la alarma el canal se encuentra vacío, debe de llenarse lo máximo posible con el menor tiempo posible para luego en la Fase 2 cerrarse y mantener la lámina de agua dentro del canal.

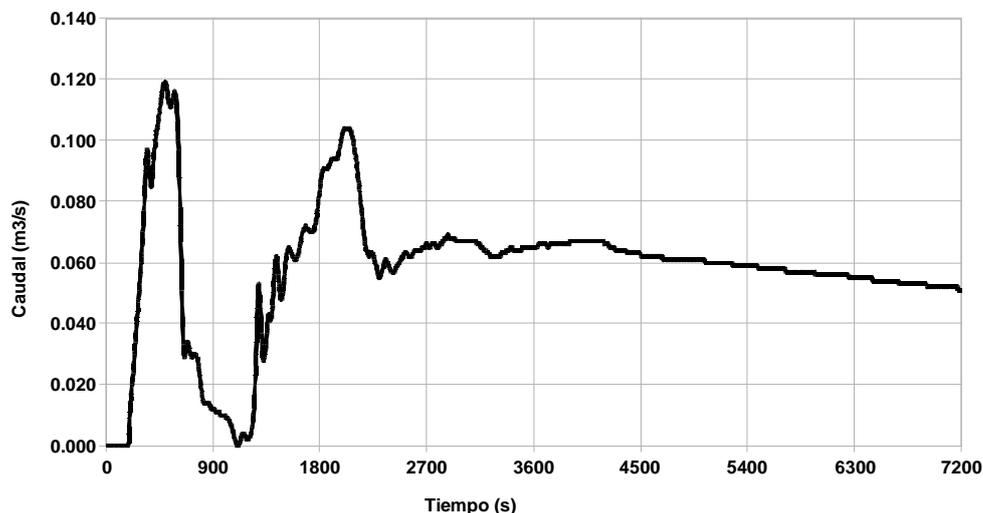
A modo de ejemplo, cuando el caudal inicial es el caudal máximo permitido por las dimensiones del canal -que es de  $19 \text{ m}^3/\text{s}$ - y las compuertas pasan de estar fuera del agua a posicionarse según los valores de la Tabla 4, la evolución del nivel de agua en el canal en los puntos de nivel de consigna puede verse en la Figura 5.

	<i>C. Cabecera</i>	<i>C. Valljardina</i>	<i>C. Barrugat</i>	<i>C. Torrent</i>	<i>C. Remolins</i>
Abertura en tanto por uno	0,15211	0,91240	0,44174	0,58316	0,70319

**Tabla 4.** Posiciones de compuerta teóricos correspondientes a una curva de remanso en la que se transporta un caudal de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ . A las compuertas se les supone en este caso un abertura máxima de 3 m



**Figura 5.** Evolución de los calados a lo largo de las dos horas de simulación en los puntos de nivel de consigna (Valljardina, Barrugat, Torrents y Remolins) y evolución del nivel justo aguas abajo de la compuerta de cabecera (Cabecera)



**Figura 6.** Evolución del caudal descargado por la descarga lateral de Barrugat. El resto de descargas no actúan en el ejemplo de simulación de la Fase 1 del cierre

A la vista de la gráfica de la Figura 5 cabe destacar :

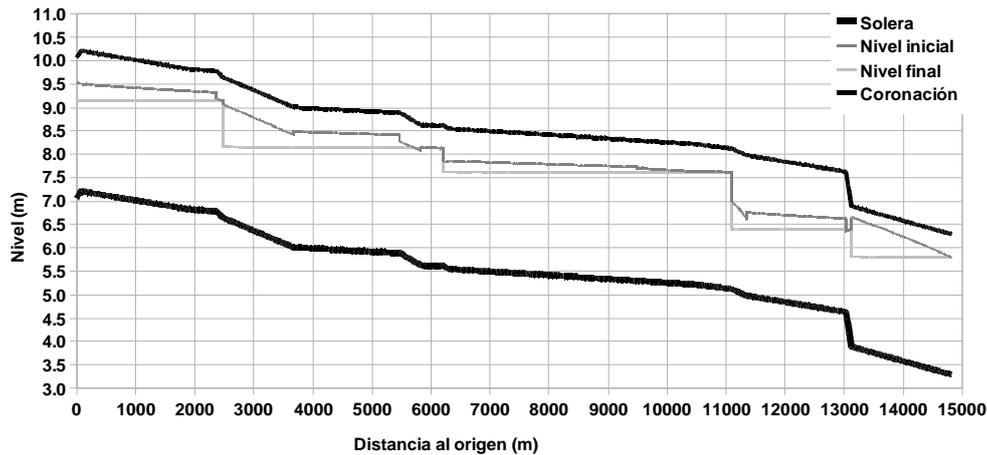
- Tal y como es de esperar, los calados en los puntos de nivel de consigna convergen a la consigna de 2,5 m.
- Puede considerarse en 1,5 horas (2.700 s) el tiempo de consecución del estado estacionario final y por lo tanto inferior a las 3 horas disponibles en esta fase.
- En ningún momento el calado se acerca a los 3 m que es el valor máximo posible de desborde. Desde el punto de vista hidráulico, este caso puede considerarse el escenario más extremo que se puede encontrar al inicio de la Fase 1. Por lo tanto,

posicionarse al estado final con curva de remanso situada a 2,5 m significa disponer de suficiente resguardo.

En la Figura 6 puede verse el caudal vertido a través de las descargas durante la Fase 1 del ejemplo anterior.

A la vista de la Figura 6 cabe destacar los siguientes puntos:

- Solamente entra en funcionamiento la descarga de Barrugat.
- La poca actividad de estas descargas es debida a la poca variación de la lámina durante el transitorio, lo que pone de manifiesto la “proximidad” entre el estado inicial y el final de este ejemplo.



**Figura 7.** Curvas de remanso de los tramos de canal para un estado inicial con un caudal de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  y un estado final de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$

### Fase 2 de cierre

Es la fase en que el canal pasa del estado estacionario inicial -en el que se transporta un caudal de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ - al estado estacionario final -en el que se conduce un caudal de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ - (Figura 7). El transitorio que se produce entre ambos estados no puede hacerse con un solo movimiento de compuerta, sino que deberá hacerse paulatinamente y con cierto desfase temporal entre trayectorias de las diferentes compuertas.

Mediante el proceso matemático de optimización de "GoRoSo," se pueden calcular las trayectorias de compuerta óptimas que llevan al canal del estado inicial al final, manteniendo fijo el caudal en determinados puntos. Estos puntos se denominan puntos consigna de nivel. Las trayectorias calculadas son las trayectorias óptimas porque:

- El tiempo transcurrido entre ambos estados estacionarios resulta el menor posible.
- El movimiento de la lámina en los puntos de consigna de nivel es el menor posible.
- Todos los movimientos de compuerta pueden ser restringidos a cierta cantidad en función de la velocidad de los motores de las compuertas.

Seguidamente se describen las entradas del algoritmo "GoRoSo" para la obtención de las trayectorias de compuerta de la Fase 2, excepto aquellas que constituyen entradas para el modelo hidráulico descrito anteriormente.

**Horizonte de predicción:** se establece un horizonte de predicción de 72 períodos de

muestreo de 5 minutos cada uno ( $= 300 \text{ s}$ ), lo que significa 6 horas de horizonte de predicción y de período de simulación.

**Trayectorias de referencia:** para todo el horizonte de predicción se establece para cada compuerta una trayectoria a tramos constituida por 72 posiciones de compuerta. Todas las posiciones se ordenan en un vector  $U$  -denominado vector de incógnitas-compuesto de  $72 \times 5 = 360$  componentes.

**Vector consigna de nivel:** en el presente problema se han elegido los puntos justo aguas arriba de las compuertas como consignas de nivel y su valor de  $2,5 \text{ m}$  se corresponde con la cota del labio del vertedero abatible de la compuerta lateral abatible. También se considera punto de consigna el extremo de aguas abajo a la salida del Túnel 4 en Tortosa. Es decir, un total de 5 puntos. Con las trayectorias calculadas se consigue inmovilizar la lámina en estos puntos a lo largo de todo el transitorio. Por otro lado, también se ha incorporado como punto de nivel de consigna los 612 puntos correspondientes a una sección cada  $25 \text{ m}$ . El nivel de consigna es variable en cada punto y se corresponde al nivel que da la curva de remanso del estado final, aunque el valor de consigna no debe de conseguirse hasta el final del transitorio. Así pues, se construye el vector  $Y^*$  consigna con  $(72-1) \times 5 + 612 = 967$  componentes donde cada componente  $y_i^*(k)$  representa el nivel de consigna para la sección  $i$  en el instante  $k$ .

**Vector comportamiento simulado:** se establece una discretización para la resolución de las ecuaciones de Saint-Venant de 25 m por celda. Ello representa 612 secciones de discretización. En la segunda y tercera columnas de la Tabla 1 se indican el nodo inicial y final computacionales de cada tramo resultantes de la discretización. De todos los valores de nivel y velocidad en estas secciones obtenidos con el modelo hidráulico en los 72 periodos, se ordenan en el vector comportamiento simulado, denominado  $Y(U)$ , solamente los valores de nivel de los puntos de consigna de nivel referidos en el párrafo anterior. De esta manera este vector también tiene 967 componentes.

**Restricciones a las trayectorias:** se establecen para el algoritmo "GoRoSo" las siguientes restricciones a los movimientos de compuerta:

$$\begin{aligned} & \text{Restricciones funcionales :} \\ -0,05 \leq u_i(K+1) - u_i(K) \leq 0,05 \quad \forall i = 1, 5 \\ & \text{Restricciones de conjunto :} \\ 0,0001 \leq u_i(K) \leq 1,0 \quad \forall i = 1, 5 \end{aligned} \quad (8)$$

donde  $K$  es el período de muestreo y  $u_i(K)$  es la abertura de la compuerta  $i$ .

**Función objetivo:** El encaje perfecto entre el hidrograma de consigna y el hidrograma obtenido mediante el modelo hidráulico en los puntos de consigna de nivel -encaje medido numéricamente mediante la resta  $Y(U) - Y^*(U)$ , componente a componente - raramente se puede conseguir porque normalmente resulta físicamente imposible. No obstante siempre podemos aproximarnos lo más posible. Para poder cuantificar esta aproximación definimos el siguiente funcional:

$$F(U) = \frac{1}{2} (Y(U) - Y^*)^T [Q] (Y(U) - Y^*) \quad (9)$$

donde  $[Q]$  es una matriz cuadrada de pesos, que habitualmente acostumbra a ser la matriz identidad dando lugar a una función de "mínimos cuadrados."

"GoRoSo" es un algoritmo que resuelve el problema de minimizar (9) sujeto a las restricciones (8) que tiene estructura recursiva. El método utilizado es de los llamados en la literatura de optimización de Lagrange-Gauss-Newton

-véase como por ejemplo, Fletcher (1987), Gill *et al.* (1981), Luemberger (1984) o Soler (2003)-. Concretamente, el método utilizado ha sido el "Sequential Quadratic Problem" que, como su nombre indica, se trata de un algoritmo secuencial que resuelve un problema cuadrático en cada iteración. Para la resolución de este subproblema se ha utilizado la estrategia llamada "Active Set Method" encontrada también en las mismas fuentes. Los detalles particulares de este algoritmo de tipo computacional están fuera del alcance de este trabajo y pueden ser consultados en Soler (2003).

A la vista de la gráfica de la Figura 7, cabe destacar los siguientes puntos:

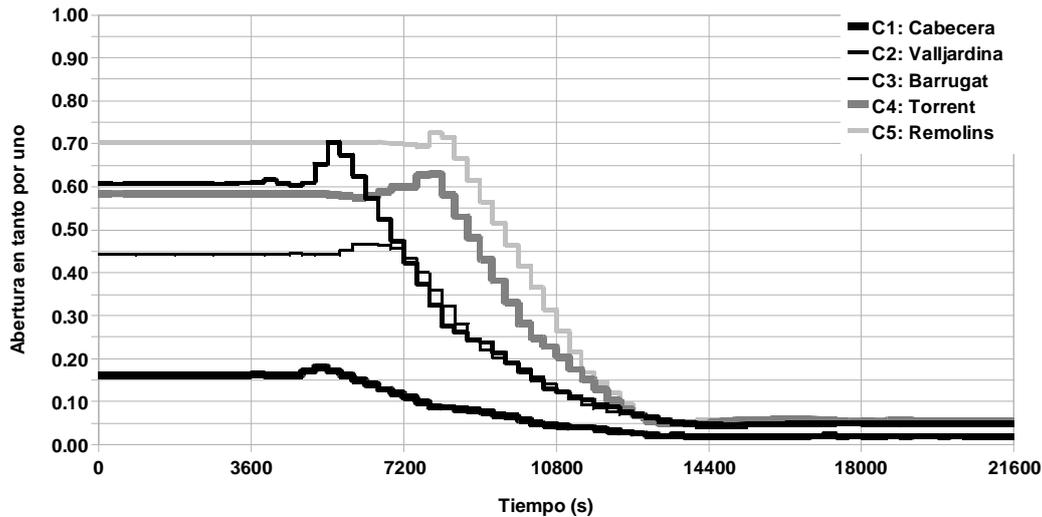
- La curva de remanso final es utilizada por "GoRoSo" y se incluye en el "Vector consigna de nivel."
- La curva de remanso inicial se corresponde con la condición inicial a implementar en el Modelo hidráulico.

El resultado del proceso de optimización implementado con el algoritmo "GoRoSo" puede verse en la Figura 8.

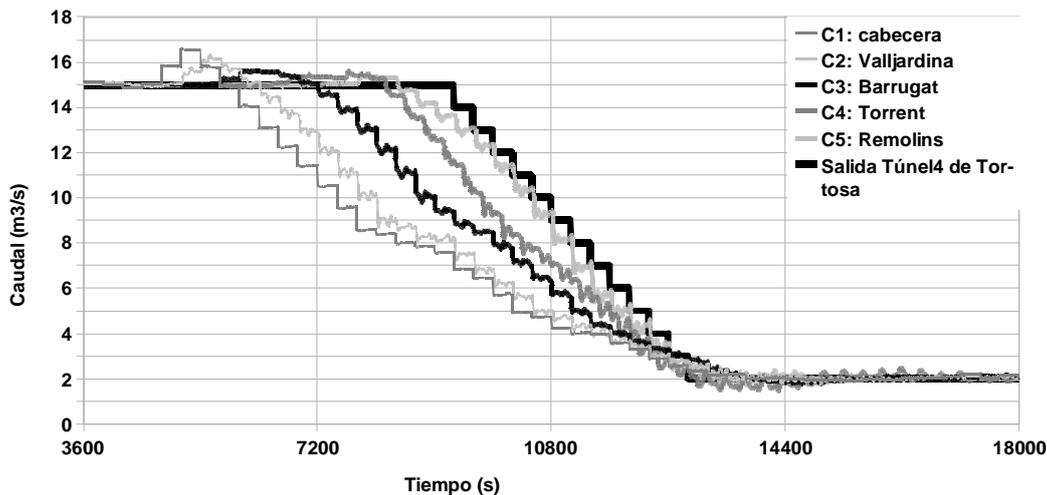
A la vista de la Figura 8 puede destacarse los siguientes puntos:

- Las trayectorias de compuerta han sido calculadas como una función temporal a tramos de 5 minutos por posición. Cada nueva posición supone, con respecto a la anterior posición, un movimiento de cierre o abertura de como máximo 0,05 (lo que corresponde a 15 cm cuando de la abertura máxima de la compuerta que es de 3 m).
- El valor de la función objetivo (9) cuando se aplican estas trayectorias de compuerta es  $10^{-4}$ , es decir, prácticamente cero. Esto significa que es físicamente posible generar el hidrograma de la Figura 4 sin mover prácticamente la lámina y restringiendo los movimientos de compuerta como se plantea en (8). Ensayos numéricos hechos con grados de restricción mayores, no consiguen el objetivo propuesto.
- El período de tiempo desde que se mueve la primera compuerta hasta que se llega a la posición final es de menos de 3 horas.

Los hidrogramas de caudal obtenidos mediante simulación cuando se implementan las trayectorias de compuerta de la Figura 8 en el modelo hidráulico, pueden verse en la Figura 9.



**Figura 8.** Trayectorias de compuerta calculadas con el algoritmo “GoRoSo” para la Fase 2 del cierre del canal. Los movimientos de compuerta están restringidos a 15 cm. Con estas trayectorias el canal pasa de transportar  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $2 \text{ m}^3/\text{s}$



**Figura 9.** Hidrogramas simulados de caudal de paso bajo compuerta y el hidrograma de llegada al extremo de aguas abajo del Modelo hidráulico para la Fase 2 de cierre

A la vista de la la gráfica de la Figura 9, cabe destacar los siguientes puntos:

- El hidrograma de caudal que llega al extremo aguas abajo, a la salida del Túnel 4 de Tortosa, es exactamente igual al deseado que se muestra en la Figura 4.
- La duración total del transitorio de la Fase 2 es de 3 horas.

Otro resultado interesante, es el hidrograma de calados que se produce en los puntos de nivel de consigna, que en este problema se encuentran en la sección justo aguas arriba de cada com-

puerta y en la del extremo aguas abajo (Figura 10).

A la vista de la Figura 10, puede destacarse los siguientes puntos:

- El calado no varía prácticamente en las secciones donde se establece la consigna de nivel de 2,5 m de calado respecto de la solera del canal -curvas “NC1,” “NC2,” “NC3” y “NC4”-. En estos puntos es donde se ubican los vertederos laterales con la misma altura del labio a 2,5 m de la solera. Como puede verse, en esta fase los vertederos laterales no tienen porqué desaguar demasiado.

- En el extremo de aguas abajo la amplitud de la oscilación es inferior a 20 cm. Este resultado puede considerarse adecuado si se tiene en cuenta que aquí es donde se establece el hidrograma de extracción.
- El grado de optimización conseguido con las trayectorias de compuerta de la Figura 8 puede visualizarse como el grado de semejanza entre los calados obtenidos con la simulación y el valor prefijado de consigna (2,5 m). A la vista de las curvas "NC1," "NC2," "NC3" y "NC4" puede concluirse que se cumple plenamente la consigna.

Como ya se ha dicho, la curva de remanso final a  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  sirve también como consigna en la función objetivo. La curva de calado final simulado que se obtiene al final del transitorio después de 6 horas puede verse en la Figura 11.

A la vista de la Figura 11, puede destacarse que el calado obtenido después de la simulación no varía prácticamente en ningún punto del perfil longitudinal respecto de la curva de remanso calculada para  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  (Figura 7). Ello significa que con las trayectorias de compuerta de la Figura 8, se consigue el estado final deseado estacionario.

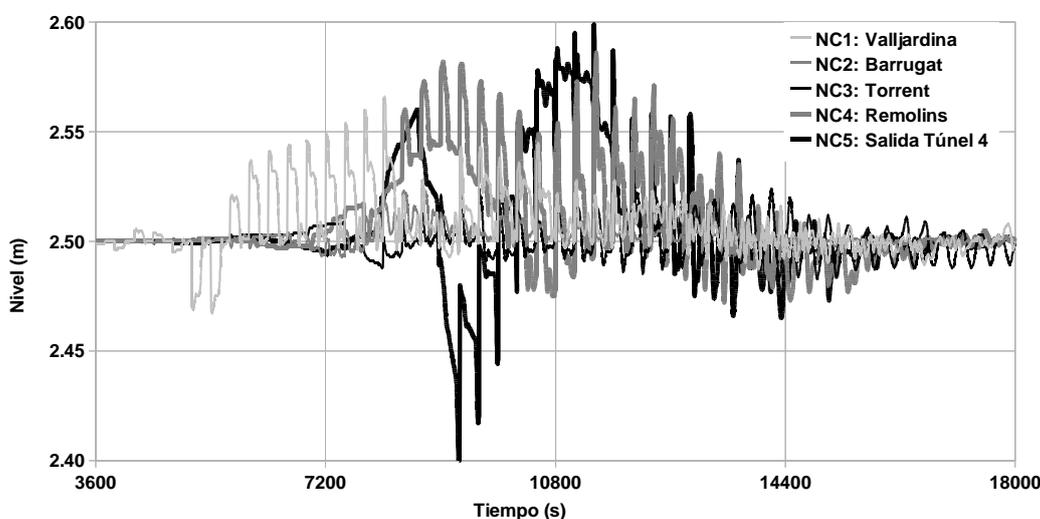


Figura 10. Hidrogramas de nivel en los puntos de nivel de consigna durante la Fase 2 de cierre

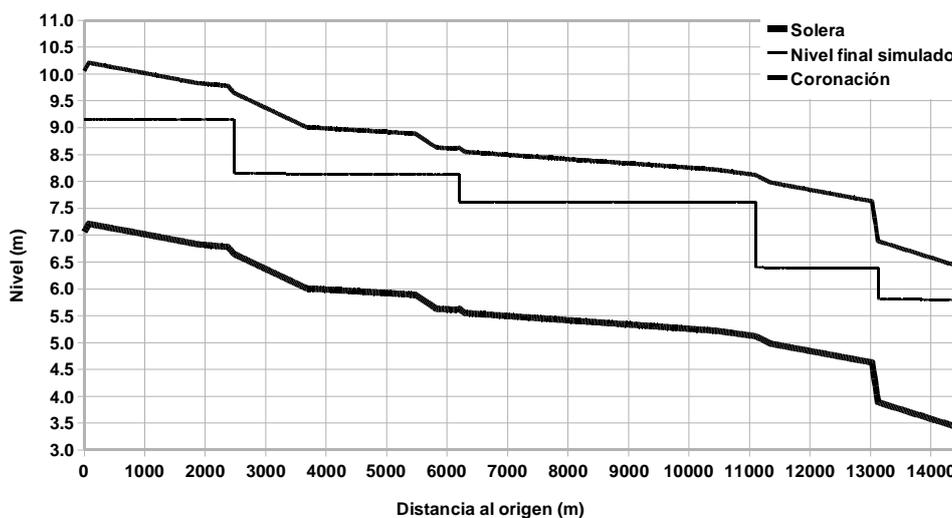


Figura 11. Niveles simulados al final de la Fase 2 de cierre

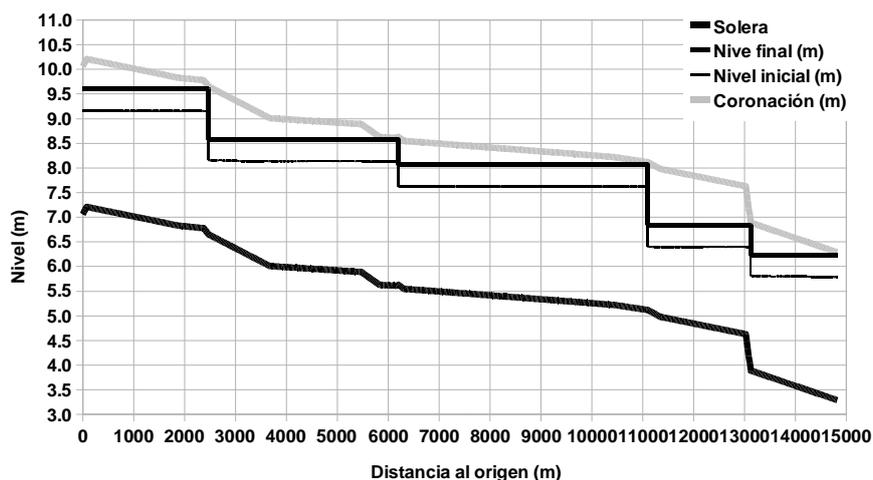


Figura 12. Niveles iniciales y finales de la Fase 3 del cierre

	<i>C. Cabecera</i>	<i>C. Valljardina</i>	<i>C. Barrugat</i>	<i>C. Torrent</i>	<i>C. Remolins</i>
Abertura en tanto por uno	0,02	0,05	0,04	0,06	0,06

Tabla 5. Posiciones de compuerta teóricas correspondientes a una curva de remanso en la que se transporta un caudal de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ . A las compuertas se les supone en este caso una abertura máxima de 3 m

### Fase 3 de cierre

Es la fase en que se aísla completamente el canal. En esta fase se pasa del estado inicial - en el que se transporta un caudal residual de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ - a un estado final sin transporte y con una lámina del agua completamente horizontal. Esta fase podría llamarse de "llenado del resguardo."

La Fase 3 consiste en pasar de 2,5 m de nivel en los puntos de Nivel de Consigna con un transporte de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  al nivel de 2,95 m con un transporte nulo (Figura 12). Ello debe de hacerse posicionando el labio de la parte abatible de las compuertas-vertedero a 2,95 m de la solera.

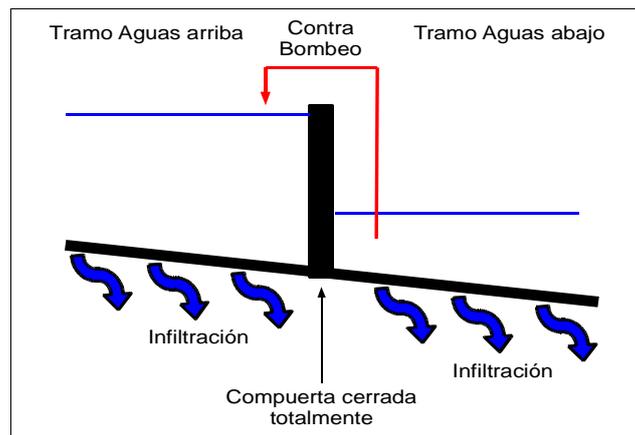
Como la Fase 1 de cierre dura 3 horas y la Fase 2 de cierre dura 3 horas más, se dispone de 1,3 horas para el desarrollo de la Fase 3 de cierre. En la Fase 3, se deja el canal en el estado inicial de transporte de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  durante las 1,3 horas restantes y llegada la hora 7,3 del disparo de la alarma, se cierran instantáneamente las 5 compuertas con un solo movimiento. Este cierre total puede ser instantáneo porque las compuertas están prácticamente cerradas como puede verse en la Tabla 5.

Por otro lado, si se dispusiera de un sistema de control de contaminantes en el llamado "anteanal" -es decir, justo aguas arriba de la compuerta de cabecera- podría desarrollarse la Fase

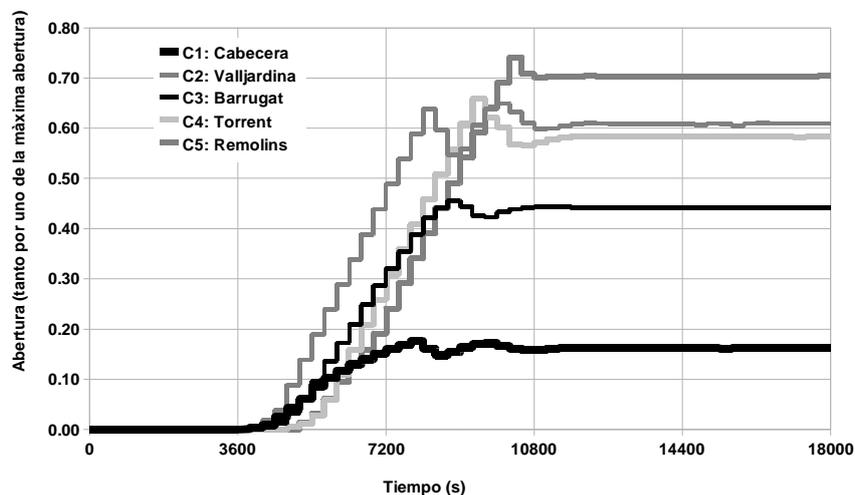
3 de cierre durante un período de tiempo mayor, con lo que acabar de "llenarse el resguardo" y pasarse de 2,5 m de nivel en los puntos de Nivel de Consigna a 2,95 m. Con ello se consigue:

- Aumentar el gradiente hidráulico en 45 cm entre el canal y el exterior que aumenta el flujo de agua desde el interior de canal hacia fuera. Y con ello, se aumentan las garantías de no contaminación porque este flujo a través del revestimiento actúa de barrera a la entrada de contaminantes, al contrario de lo que ocurriría en caso de existencia de subpresión.
- Aumentar las reservas de agua no contaminada en el CC.

Finalmente, una vez finalizadas las tres Fases de cierre del CC, es recomendable mantener el nivel lo más alto posible para mantener la barrera de contaminantes descrita en el párrafo anterior. Ello puede hacerse mediante un contrabombeo de agua procedente de los tramos de aguas abajo del tramo estudiado. Este contrabombeo debe hacerse a un caudal equivalente al de la pérdida por infiltración a través del revestimiento que tiene el CC y durante el episodio en que el canal permanezca cerrado (Figura 13).



**Figura 13.** Esquema de un contrabombeo para mantener el nivel del canal lo más alto posible



**Figura 14.** Trayectorias de compuerta para la Fase 1 de apertura del canal obtenidas con el algoritmo "GoRoSo" y con 15 cm de restricción a todos los movimientos de compuerta

## OPERACIÓN DE APERTURA

Dado que el CC tiene carácter telescópico y el Túnel 4 -el que pasa por debajo de la ciudad de Tortosa- no tiene la capacidad de transporte de  $19 \text{ m}^3/\text{s}$ , la apertura del sistema para pasar de los  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  a los  $19 \text{ m}^3/\text{s}$  en una sola fase debe hacerse con cuidado. En la situación "nominal" de funcionamiento del sistema existe un consumo de caudal de unos  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  a lo largo del primer tramo del CC de 14 Km que reduce el caudal de paso por el Túnel 4. Por lo tanto, para la apertura del sistema también se proponen dos fases: la Fase 1, para pasar de  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  a los  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  y la Fase 2 sacar totalmente las compuertas del agua con un solo movimiento de compuertas, a excepción de la de cabecera, como resulta obvio.

## Fase 1 de apertura

Resolviendo el algoritmo "GoRoSo" para esta fase con la restricción de un máximo para todos los movimientos de compuerta de 15 cm, se obtiene como resultado las trayectorias de compuerta que se muestran en la Figura 14.

A la vista de la gráfica de la Figura 14, cabe destacar los siguientes puntos:

- El período en que las compuertas están moviéndose es de unas 2 horas con lo que en este tiempo es posible poner en marcha el canal.
- Estas trayectorias de compuerta pueden ser utilizadas en la Fase 1 de cierre en caso que el canal esté cerrado, aunque lleno con la lámina horizontal. Puesto que la Fase 2 de cierre se inicia con un transporte estacionario de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  a las tres horas del

disparo de la alarma y para llegar a este estado estacionario solo se requieren 2 horas según muestra la Figura 14, se dispone de 1 hora a razón de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  para alimentar el resto del sistema de canales ubicado aguas abajo del CC, los cuales pueden actuar a modo de embalse.

Cuando se implementan las trayectorias de compuerta mostradas en la Figura 14 al modelo hidráulico, se obtienen los hidrogramas de caudal mostrados en la Figura 15.

A la vista de la gráfica de la Figura 15 cabe destacar los siguientes puntos:

- El canal puede pasar de los  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  a los  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  un período de unas 2 horas.
- El hidrograma de caudal de llegada a la Salida del Túnel 4 en Tortosa es exactamente igual al deseado.

Cuando se implementan las trayectorias de compuerta mostradas en la Figura 14 en el modelo de hidráulico, se obtienen los hidrogramas

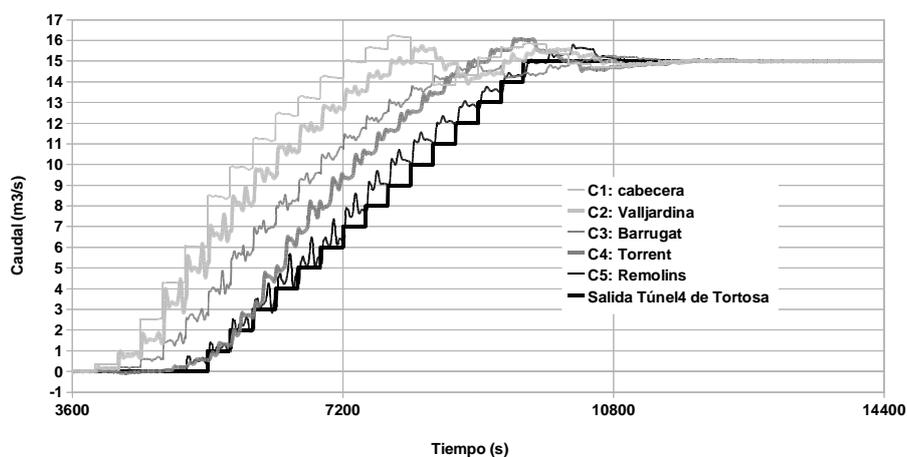
de nivel mostrados en la Figura 16 de los puntos de consigna.

A la vista de la gráfica de la Figura 16 cabe destacar los siguientes puntos:

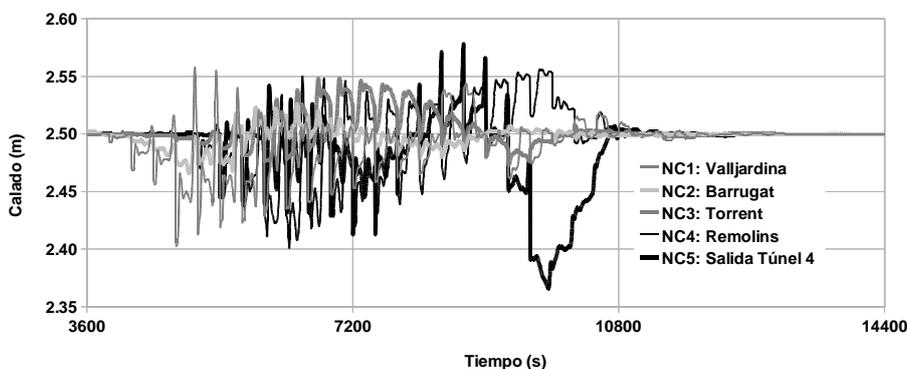
- La lámina se mantiene prácticamente inmóvil en los puntos de nivel de consigna en todo el transitorio.
- Estos niveles simulados muestran como el canal se encuentra inicialmente parado pero con un nivel inicial en el punto de consigna de 2,5 m.

### Fase 2 de apertura

La Fase 2 consiste en sacar del agua todas las compuertas excepto la de Cabecera y devolver el control de la compuerta de Cabecera al sistema existente. Igualmente como ocurre en la Fase 1 de cierre, la operación debe de hacerse con una sola maniobra de las compuertas puesto que las perturbaciones generadas por estas maniobras pueden ser absorbidas con los 0,5 m de resguardo disponible.



**Figura 15.** Hidrogramas simulados de caudal bajo compuerta e hidrograma de caudal en el extremo de aguas abajo de la Fase 1 de apertura



**Figura 16.** Hidrogramas simulados de nivel en los puntos de consigna de nivel de la Fase 1 de apertura

---

## CONCLUSIONES

---

1. A partir de una geometría incompleta del canal y a falta del conocimiento preciso del perfil longitudinal del eje de la solera del canal, se ha construido un modelo matemático que describe el comportamiento hidráulico del CC. El modelo contempla la presencia de todas las compuertas proyectadas. Concretamente, se muestra el comportamiento del canal ante la implementación de unas determinadas trayectorias de compuerta. Es de esperar que el comportamiento calculado no difiera demasiado del real.
2. Con el establecimiento de las tres fases de cierre del CC definidos en este trabajo, es posible el cierre del Canal en 7,3 horas mediante movimientos de compuerta hechos cada 5 minutos e inferiores a los 15 cm de recorrido, sin que se produzcan desbordamientos ni vaciados del canal superiores a 1 m. Es decir, evitando grandes variaciones de calado en el canal.
3. Para el cálculo de las trayectorias de compuerta a llevar a cabo durante la ejecución del Plan de Emergencia, se ha utilizado el algoritmo "GoRoSo" desarrollado por personal investigador del grupo FLUMEN. En particular, destaca las trayectorias de compuerta de la Fase 2 de cierre y las de la Fase 1 de apertura.
4. Con un sistema de control de contaminantes situado en el Antecanal, es decir, aguas arriba de las compuertas de Cabecera en el Azud de Xerta-Tivenys, sería posible tener una segunda alarma que permitiría alargar la Fase 3. Con ello se tendría la posibilidad de llenar el CC de agua no contaminada hasta la coronación del mismo y protegerlo todavía más de una posible entrada externa de contaminante.
5. La ampliación del sistema de Control Centralizado, propuesto para el CC, a todos los mecanismos hidráulicos del sistema del CMI, permitiría cerrar todos los canales y acequias del sistema de distribución y aumentar en gran medida las reservas de agua no contaminada dentro de la red en el momento de la alarma.

---

## AGRADECIMIENTOS

---

Los autores de este trabajo están profundamente agradecidos a la "Comunitat de Regants Sindicat Agrícola de l'Ebre" por la disposición que han tenido a dejar publicar este artículo que se ha basado en un estudio anterior que fue financiado por dicha comunidad de regantes. De esta forma, muestran así un gran interés por una problemática que no afecta tan solo a ella sino a toda la gente que disfruta del Parque Nacional del Delta del Ebro.

---

## REFERENCIAS

---

- ACA, (2007). Pla d'actuació del PROCICAT: emergències per episodis de contaminació de l'Ebre aigües avall de l'Embassament de Flix. Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Catalunya, Julio.
- ACUAMED, (2007). Eliminación de la contaminación química en el embalse de Flix. Proyecto constructivo, Ministerio de Medio Ambiente.
- Fletcher, R., (1987). Practical Methods of Optimization. 2nd. Ed., John Wiley & Sons, U.K.
- Gill, P.E., Murray, W. y Wright, M.H., (1981). Practical Optimization. Academic Press Inc., Scotland.
- Gómez, M., (1988). Contribución al estudio del movimiento variable en lámina libre en las redes de alcantarillado. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Luemberger, D.G., (1984). Linear and Non-linear Programming. 2nd. Ed., Addison-Wesley, Massachusetts, US.
- Soler, J., (2003). Contribució a l'estudi del control de canals de regadiu per mitjà de mètodes numèrics de programació no lineal. Aplicació al càlcul de les trajectòries de referència. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Soler, J., Gómez, M. y Rodellar, J., (2004). Una herramienta de control de transitorios en canales de regadío. Ingeniería del agua, 11 (3), 297-313, Septiembre.
- Soler, J., Gómez, M. y Rodellar, J., (2008). A control tool for irrigation canals with scheduled demands. Journal of Hydraulic Research, 46.