Modelo CANVAR: simulación del movimiento variable del agua en un canal de riego

JOSÉ LIRIA MONTAÑÉS [*]

RESUMEN Se presenta un programa de ordenador para simular el movimiento variable en canales, con todo tipo de obras y compuertas. Se describe un ejemplo real.

CANVAR MODEL: SIMULATION OF THE VARIABLE WATER MOVEMENT IN AN IRRIGATION CANAL EXAMPLE

ABSTRACT *A program for simulating unsteady flow in canals with all kinds of gates and ancillary works is presented. A real example is also decribed.*

Palabras clave: Modelo matemático; Régimen hidráulico no permanente; manejo de canales; compuertas mixtas.

1. INTRODUCCIÓN

Las pérdidas de agua en los canales de riego son enormes, llegando como media en el mundo al 33% del total del agua que se les entrega (Comisión Internacional de Riegos y Drenajes "Controlling seepage losses in irrigation Canals, 1967"). De ellas el 50% aproximadamente se debe a vertidos por mala regulación de los caudales y niveles.

Este problema se incrementa cuando se quiere utilizar los canales antiguos, previstos para el riego continuo en 24 horas, para el riego intermitente, con períodos menores, o con riego a la demanda.

Uno de los grandes retos de la técnica española es ahorrar en el consumo del agua, prestando mucha atención a evitar su despilfarro.

Es necesaria la implantación de obras y mecanismos de regulación, pero su acertada elección y ubicación durante el proyecto de instalación primero y las consignas de actuación durante la explotación después, no son problemas fáciles de resolver sin un elemento de cálculo que nos prediga en tiempo muy breve cómo se va a desarrollar el movimiento del agua, para poder tomar otras decisiones alternativas.

Esta herramienta de cálculo es un modelo matemático, como puede ser el modelo CANVAR que ahora presentamos.

Se basa en la aplicación de las ecuaciones de SAINT-VENANT, que expresan la continuidad del caudal y del teorema de la cantidad de movimiento. Estas ecuaciones se establecen libremente en un número finito de tramos del canal, cuyos puntos extremos están elegidos de forma que mejor se representen las características del conjunto. El número de puntos debe ser suficiente para la definición del canal.

La finalidad del Programa es ir obteniendo en sucesivos intervalos de tiempo la situación de la lámina del canal en todos los puntos elegidos, así como las velocidades y los caudales.

2. PLANTEAMIENTO MATEMÁTICO

Las ecuaciones obtenidas son en derivadas parciales y no son sencillas. Para su resolución se usan diversos formas de discretización, sustituyendo las derivadas parciales por cocientes de elementos finitos. Tras esta trasformación resulta un sistema de ecuaciones que ligan las variables en cada dos puntos contiguos, en el momento actual y en el momento de estudio siguiente. Partiendo de que se conoce la situación de las variables del canal (calado y caudal) en el instante actual en cada punto, se trata de deducir sus valores para el instante siguiente y así sucesivamente. Al conseguirlo para todos los puntos, se obtienen unas a modo de fotografías, variables a lo largo del tiempo, que van reproduciendo el movimiento del canal.

Para resolver el sistema de ecuaciones se explican en los libros dos sistemas diferentes.

Uno es el llamado de las características, que consiste en facilitar la resolución del sistema de ecuaciones combinándolas de manera que cada dos pueden dar soluciones explícitas y por tanto de fácil planteamiento matemático. Sin embargo se presentan complicaciones de cálculo, pues los valores que se obtienen para las incógnitas se refieren a puntos diferentes de los seleccionados en el canal, lo cual exige interpolaciones.

El otro sistema consiste en el planteamiento del sistema implícito de ecuaciones y su resolución global, lo cual a primera vista parece más complejo.

Nosotros empezamos trabajando con el sistema de características, pero nos cambiamos al método de sistema impli-

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Catedrático de Universidad.

cito. La razón fundamental es que el modelo resultante es más estable y a nosotros nos resultó de más rápido funcionamiento. Como contrapartida hay que reconocer que el método de las características permite de manera más sencilla el estudio de un régimen que pasa de infracrítico a supracrítico frecuentemente en numerosos puntos no fijos del canal.

Con el método implícito se ha realizado el Modelo Canvar.

Si suponemos que el canal se ha dividido en **n** tramos hay **n+1** puntos (contando los extremos). Al plantear las ecuaciones de Saint-Venant para cada tramo, se obtienen 2n ecuaciones y sin embargo hay 2.n+2 incognitas (calado y caudal en cada uno de los n+1 puntos.

Ello hace que en cada intervalo de tiempo haya que definir los valores de dos incógnitas (elegidas entre las cuatro que son el calado y el caudal de los dos extremos), aunque también se puede naturalmente añadir una o dos nuevas ecuaciones que al relacionar las variables hagan que el sistema esté definido (por ejemplo estableciendo leyes de caudales/alturas en un vertedero situado al final).

Por razones que no son debidas al modelo, sino de pura Hidráulica Teórica, si el régimen es infracrítico, tiene que haber una definición de variable en el origen y otra en el final. Si por el contrario el régimen es supracrítico, las dos variables a definir son las del punto de comienzo del canal (por definición, en este caso lo que ocurre aguas abajo no influye aguas arriba).

3. OBRAS INTERCALADAS Y COMPUERTAS DE REGULACIÓN

En los canales de riego hay numerosos puntos intermedios que son singulares. Son todas las obras de fábrica (sifones, estrechamientos, aliviaderos laterales en vertedero o en sifón, compuertas de nivel fijo o que siguen leyes arbitrarias o mandadas por un ordenador, etc.

En ellos no se cumplen las ecuaciones de Saint Venant, sino que se cumplen otras que pueden ser muy diferentes. Por ejemplo, una compuerta de nivel fijo aguas arriba estará representada por dos ecuaciones:una que mantenga la continuidad de caudales y otra que establezca un calado fijo aguas arriba.

Si se trata de un aliviadero lateral, se ha de cumplir que el caudal agua arriba sea igual al de aguas abajo más el caudal vertido, verificándose además que la energía específica sea constante.

Si hay un sifón, además de la continuidad del caudal se ha de verificar que el nivel aguas arriba sea igual al de aguas abajo más la pérdida de carga, que es una ecuación que relaciona caudal y desnivel, pudiéndose decir otro tanto de los cambios de sección.

En una balsa intercalada en un canal, la diferencia del caudales entrante y saliente, multiplicada por el intervalo de tiempo de que se trate, debe ser igual a la superficie multiplicada por el incremento de nivel (primera ecuación). La segunda expresa que el nivel de la balsa es igual al de la salida más la altura de creación de velocidad y de estrechamiento.

La longitud del tramo en el que se encuentra la singularidad se hace igual a la que realmente ocupa en la realidad, puesto que hay completa libertad para elegir los puntos de separación de tramos.

En definitiva, cada tramo en el que hay una obra singular o una compuerta o instrumento cualquiera queda representado por dos ecuaciones, que sustituyen a las de Saint-Venant. El número de ecuaciones es por tanto igual al antes mencionado y el sistema está definido.

4. RESOLUCIÓN MATEMÁTICA

Como hemos indicado, es preciso una sustitución de las derivadas parciales por expresiones discretizadas en diferencias finitas. Las metodologías utilizadas por los diversos investigadores son muy diversas y han ocupado toneladas de papel.

El sistema que hemos utilizado es el llamado de las ecuaciones integrales, en el que se supone que se integran las ecuaciones diferenciales, con lo cual su resolución equivale a hallar un volumen. La metodología seguida es la propuesta por Priessman, que recuerda un poco al conocido método de Simpson para hallar el área encerrada por una curva.

Planteado el sistema de ecuaciones, y supuesto que se conocen las variables de calado y caudal en cada uno de los puntos de estudio, es preciso resolver el sistema para calcular los valores del intervalo siguiente. Ello se consigue por el método de Newton-Raphson, con el número de iteraciones que sea necesario. Los valores obtenidos sirven para volver a plantear nuevamente el sistema de ecuaciones, cuya resolución permite obtener lo que ocurre en el intervalo siguiente.

La metodología de resolución del sistema varía mucho según los autores, desde métodos muy sencillos a otros muy sofisticados. Es de señalar el llamado método del "doble barrido", descrito en los libros, válido en la mayoría de las ocasiones.

Hasta ahora siempre hemos hablado de las variables calado y caudal, aunque hay algunos autores que utilizan calado y velocidad. Es evidente que ambos procedimientos son equivalentes, pues para pasar de la velocidad al caudal basta con multiplicar por el área de la sección trasversal.

Por esa razón nosotros hemos utilizado como variables independientes, para el planteamiento de las ecuaciones, el área de la sección trasversal y el caudal. Nos ha parecido que el número y dificultad de cálculos era menor, pero en cualquier caso, desde esas variables hay que calcular en cada situación el calado y la velocidad.

5. CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA CANVAR

Las secciones trasversales del canal deben estar definidas en todos los tramos. En la situación actual del Programa CANVAR, se pueden utilizar secciones rectangulares, trapeciales y en arco de círculo. No obstante es posible introducir secciones de cualquier tipo.

El programa está estructurado por un núcleo principal de entrada de datos. Con él están enlazados diversos subprogramas, cada uno de los cuales tiene una finalidad. Por ejemplo, hay uno muy importante dedicado al planteamiento del sistema de ecuaciones de Saint Venant y hay muchos que se dedican a plantear las ecuaciones de cada una de las diferentes obras de fábrica y mecanismos. Otros subprogramas se dedican a la salida de resultados, que pueden ser, a voluntad, de tres tipos.

Una salida es por listados de impresora, en la cual se indican para cada intervalo el calado, caudal, velocidad (y si se quiere el área y el número de Froude) para cada punto.

Otra salida es mediante la creación de ficheros tipo ASCII, con los cuales pueden conservarse los resultados y además utilizarse para dibujar con un Plotter o impresora gráfica (que debe ser en color, para distinguir las diferentes situaciones) las curvas representativas de los resultados.

La tercera salida (imprescindible) es por pantalla. En ella se ven las sucesivas curvas formadas por la lámina de

agua en los diversos intervalos de tiempo. Hay varias posibilidades: las distintas láminas de diferentes periodos pueden verse simultáneamente, en distintos colores, para compararlas. La otra posibilidad, dada la gran rapidez de funcionamiento del programa, es viendo el resultado como una película de cine, viendo como se modifica a lo largo del tiempo la lámina del canal.

El programa está muy optimizado en todas sus partes, lo que permite una gran rapidez en los cálculos. A título orientativo, el movimiento de un canal de 60 km de longitud, con numerosas obras especiales, durante 24 horas, se hace en menos de dos minutos, con un ordenador a 100 MHZ, que ahora es corriente. El programa está implementado en tecnología de 16 bits, estando ahora en fase de trasformación a 32 bits, pero la rapidez actual es muy grande y en realidad no necesita más, ni para trabajar en tiempo real. La ventaja futura de usar 32 bits residirá en poder compartir las tareas del ordenador, algunas de las cuales pueden estar dirigidas a la propia explotación del canal.

En la versión actual del Programa Canvar, se pueden incluir las siguientes obras de fábrica y mecanismos, porque están operativos los correspondientes subprogramas:

- Sifones.
- Acueductos.
- Aliviaderos laterales tipo vertedero.
- Aliviaderos laterales en sifón.
- Balsas laterales conectadas al canal.
- Tomas de cualquier tipo.
- Compuertas manuales de regulación.
- Compuertas automáticas de nivel constante aguas arriba.
- Compuertas automáticas de nivel constante aguas abajo.
- Compuertas mixtas, de nivel fijo aguas arriba o aguas abajo.
- Picos de pato.
- Compuertas eléctricas mandadas por autómatas programables, con cualquier condición de funcionamiento (volúmenes de agua constante en cada tramo, sistema Bival, pivotado de lámina alrededor de un punto fijo, etc).
- Compuertas eléctricas mandadas desde un centro de Explotación, con cualquier programación de funcionamiento centralizado.
- Estudios de rotura de un canal por rebosamiento o derrumbamiento de un terraplen.
- Cualquier estudio relativo al llenado o vaciado de un canal.

Sin embargo, dada la estructuración del Programa, es muy fácil añadir un subprograma más que introduzca las condiciones de una obra de fábrica o mecanismo no previsto. Para ello basta con escribir en el lenguaje de programación utilizado las dos ecuaciones que definan las características del nuevo elemento.

El Programa CANVAR no es en sí un modelo, sino un programa capaz de realizar modelos particularizados para cada canal específico, incluyendo sus características fijas (sección, pendientes etc) y dejando libres las elegibles en la fase de explotación (grado de apertura de compuertas, caudales demandados por las tomas etc).

Si los resultados no son aceptables, dada la gran rapidez de funcionamiento del Modelo, se puede correr de nuevo, con ciertas variaciones, todas las veces que se quiera, hasta obtener el resultado deseado, lo mismo si se está en fase de proyecto de las instalaciones o de explotación de un canal en funcionamiento.

El programa CANVAR ha sido comprobado con todas las obras y mecanismos mencionados y ha sido sometido con éxito a la prueba de exactitud citada en el número especial del Journal and Drainage Engineering de Julio/ Agosto de 1993, dedicado a modelos de canales.

También se ha comprobado con todas las obras y mecanismos mencionados y se ha utilizado con éxito para modelizar varios tramos del Canal del Zújar (hasta tener la totalidad) y del canal de Toro-Zamora. En la actualidad se está utilizando para otros dos canales que están en explotación.

5. EJEMPLO

Describimos ahora como ejemplo el modelo del Canal Toro-Zamora.

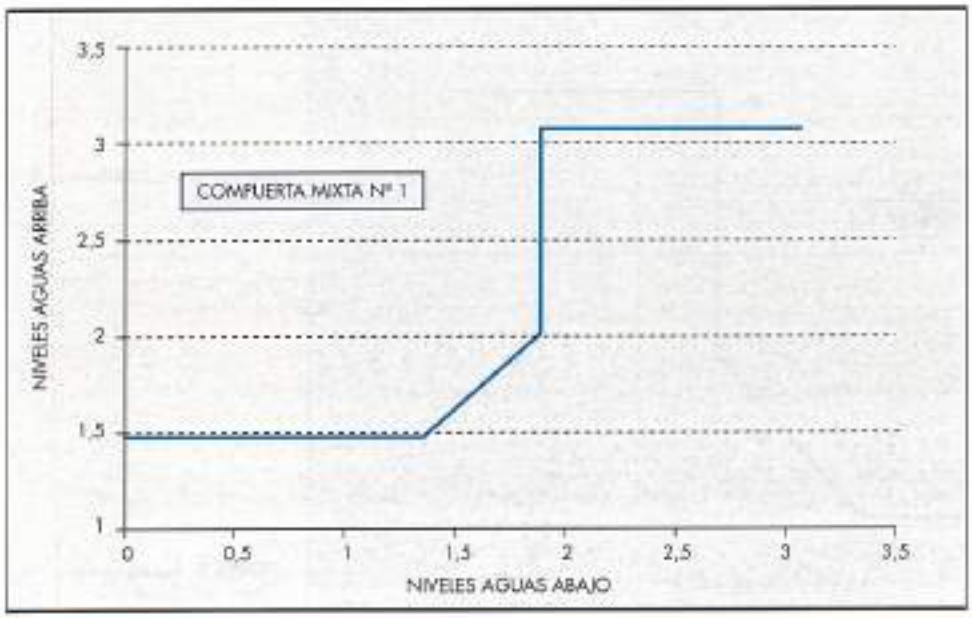

FIGURA 1. Ley de niveles. Canal Toro Zamora.

Se trata de un canal de aproximadamente 60 km de longitud y 10 m^3/sg de capacidad en la entrada. Sus secciones trasversales son rectangulres o trapeciales, y está revestido de hormigón.

En la parte primera hay gran cantidad de picos de pato y en la parte final hay una regulación por compuertas de nivel fijo aguas abajo. Ambas partes están separadas por tramos de mayor pendiente.

Se decidió colocar en la parte central del canal tres compuertas denominadas mixtas, que son en realidad compuertas que normalmente garantizan un nivel fijo aguas abajo, pero que si el nivel aguas arriba sube más de un valor máximo la compuerta abre totalmente, dejando pasar el agua hacia abajo, para que el canal no desborde. Por el contrario, si el nivel aguas arriba alcanza niveles inferiores a un mínimo admitido, la compuerta cierra totalmente, para que no se vacíe el canal. En ambos casos extremos la compuerta ha cambiado su consigna y trabaja como compuerta de nivel fijo aguas arriba, de donde procede su nombre.

Estas compuertas no sólo presentan una seguridad frente al desbordamiento o el vaciado del canal, sino que hábilmente dimensionadas y colocadas, sobre todo si se colocan en combinación de balsas, permiten una regulación importante de los volúmenes de agua.

Siendo estas compuertas las primeras colocadas de su tipo en España, era muy importante analizar el funcionamiento del canal. Por ello se decidió hacer un modelo del mismo en la parte afectada por las compuertas mixtas, las cuales estarían situadas en los PK 42,204, PK 45,915 y PK 51,970. La zona de canal incluida en el modelo va desde el punto PK 34,733 al PK 53,495.

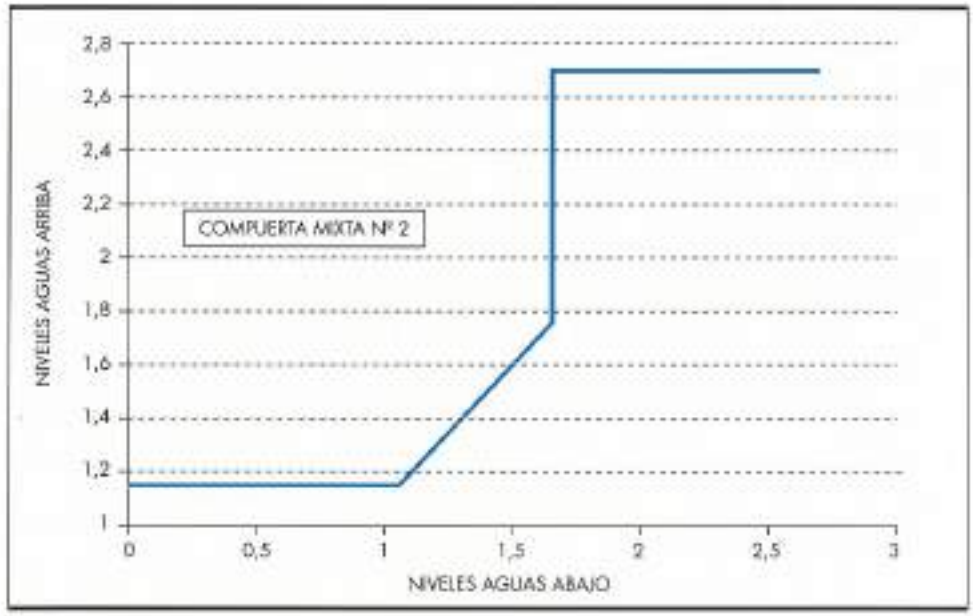

FIGURA 2. Ley de niveles. Canal Toro Zamora.

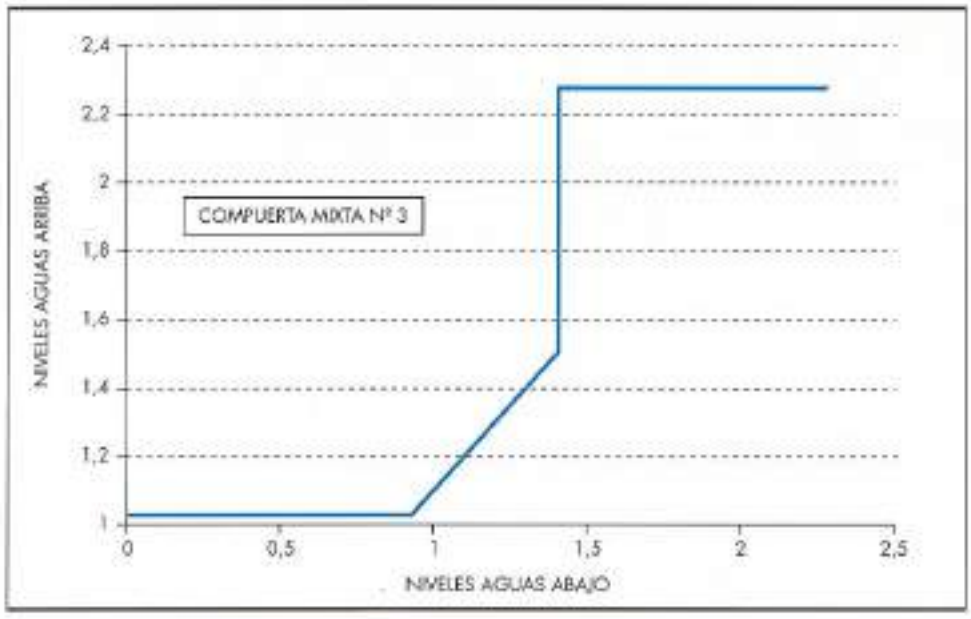

FIGURA 3. Ley de niveles. Canal Toro Zamora.

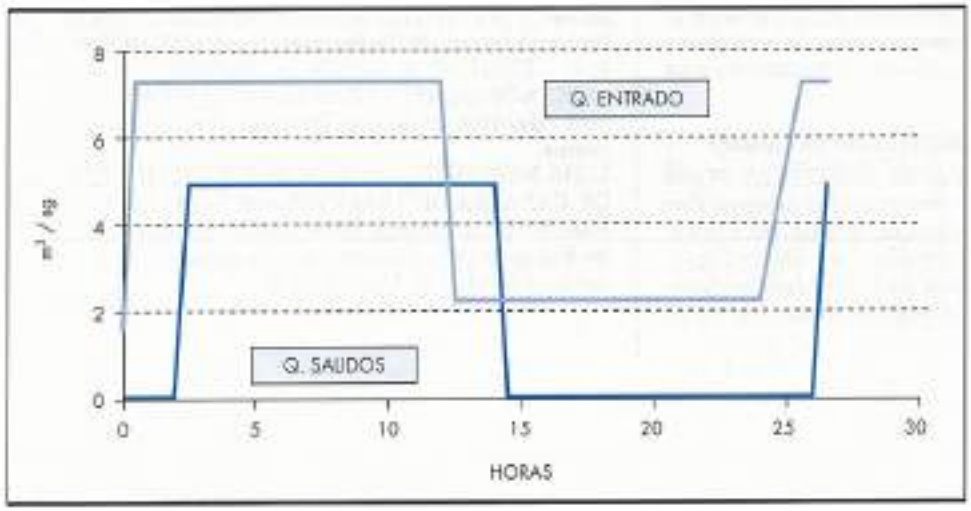

FIGURA 4. Caudales circulantes. Canal Toro Zamora.

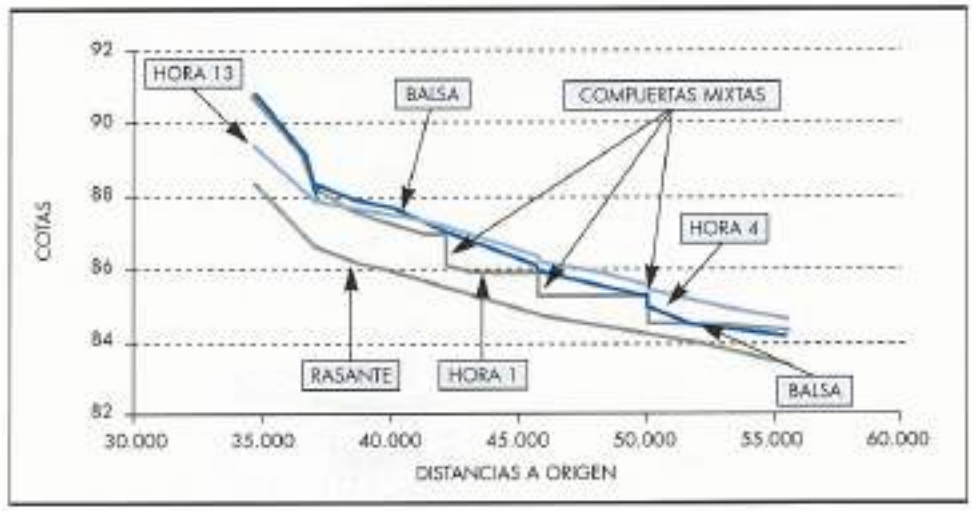

FIGURA 5. Lámina de agua. Canal Toro Zamora.

Las pendientes son muy variables, habiendo un tùnel de 70,8 cm/km a un tramo de 7,6 cm/km de pendiente, siendo más frecuentes los valores comprendidos entre 15 y 30 cm/km.

Existen dos balsas intercaladas en el canal distancias respectivas del origen de 41.409 m y 53.257 m. Las superficies son 42.700 m^2 y 22.300 m^2 respectibvamente.

El modelo ha incluido además dos aliviaderos laterales, de 60 de longitud de labio uno y 40 m el otro, así como varias tomas y cambios de sección. En gran parte del canal la banqueta forma tramos horizontales.

Las características generales del canal pueden verse en la figura 5, que además se utiliza para mostrar la situación de la lámina en distintos períodos.

Las compuertas mixtas tienen leyes de funcionamiento representadas en las figuras 1, 2 y 3, donde se han indicado en unos ejes cartesianos los calados aguas arriba y aguas abajo.

Los tramos de funcionamiento normal son los verticales, correspondientes a nivel fijo aguas abajo. Los tramos horizontales corresponden a funcionamiento con nivel fijo aguas arriba.

Existe un tramo inclinado entre el tramo horizontal inferior y el vertical, cuya explicación cae fuera de la finalidad de este artículo.

Todas estas condiciones típicas de estas compuertas están programadas en el subprograma preparado especialmente para ellas, como antes hemos explicado.

Como situación inicial se ha elegido un caudal de 0,42 m^3/sg en el tramo inicial, que se deriva en su totalidad por las tomas posteriores, por lo que los tramos siguientes del canal tienen una lámina inicial horizontal, con niveles definidos por las compuertas mixtas y caudales nulos.

Las leyes temporales de suministro de caudales, al inicio del tramo modelizado, corresponden a períodos de riego de 12 horas con descanso en las 12 horas siguientes, tal como se ve en la figura 4. La apertura y cierre de las compuertas es muy rápida.

La situación de lámina en diversos intervalos de tiempo a partir del inicio puede verse en la figura 5, donde puede comprobarse la fase de llenado y vaciado brusco del canal. Puede comprobarse además el brusco aumento de calado que se presenta al final del tramo inicial que tiene gran pendiente. Se debe sencillamente a la recuperación de parte de la energía debida a la velocidad.

El estudio con otras leyes de caudales suministrados se hace muy rápidamente, pues la velocidad de funcionamiento del modelo es muy grande. Basta con preparar unos ficheros con las nuevas leyes de caudales, dadas por puntos.

El modelo será sin duda de gran utilidad para predecir el comportamiento del canal ante diversas leyes de consumos o de suministro de caudales que se puedan presentar durante la explotación.

BIBLIOGRAFÍA SOBRE MOVIMIENTO VARIABLE EN CANALES

K. MAHMOOD and V. YEVJEDICH. "UNSTEADY FLOW IN OPEN CHANNELS" Water Resources Publications-Fort Collins, Colorado-1975. Especialmente los capítulos siguientes: *"Basic Equations of Unsteady Flow" por James Ligget. "Numerical Methods of Solution of the Unsteady Flow Equations", por James Ligget y Jean Cunge. "Stability" por James Ligget.*

ABBOTT. "COMPUTATIONAL HYDRAULICS"-Pitman Publishing Limited- 39 Parker treet, London WC2B 5PB.

J. A. CUNGE; F. M HOLLY.; A.VERWEY. "PRACTICAL ASPCTS OF COMPUTATIONAL RIVER HYDRULICS" Pitman Advanced Publishing Program. Boston, London, Melbourne.

LIRIA MONTAÑÉS. "FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE CANALES DE TRASVASE: ESTUDIO DE UN CASO PARTICULAR". Trabajo presentado a las Jornadas Regionales Europeas de la Comisión Internacional de Riegos y Drenajes del 26 al 31 de Mayo de 1986.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE ABASTECIMIENTOS DE AGUA Y SANEAMIENTO - AEAS

25 años dedicados al Ciclo Integral del Agua

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE ABASTECIMIENTOS DE AGUA Y SANEAMIENTO
Orense, 4 • 28020 MADRID • Telf.: (91) 556 43 00 • Fax: (91) 556 89 98