

VERIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS NUMÉRICOS DE SIMULACIÓN DE MANIOBRAS EN COMPUERTAS

• Gilberto de Jesús López-Canteñs* • Víctor Prado-Hernández •
Universidad Autónoma Chapingo, México

*Autor de correspondencia

• Benjamín de León-Mojarro •
Comisión Nacional del Agua, México

• Víctor Manuel Ruiz-Carmona •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

• Mauricio Carrillo-García • Laura Ibáñez-Castillo • Eduardo Arteaga-Tovar •
Universidad Autónoma Chapingo, México

Resumen

LÓPEZ-CANTEÑS, J.G., PRADO-HERNÁNDEZ, V., DE LEÓN-MOJARRO, B. & RUIZ-CARMONA, V.M. Verificación de procedimientos numéricos de simulación de maniobras en compuertas. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Vol. V, núm. 1, enero-febrero, 2014, pp. 43-56.

La aplicación de las ecuaciones de Saint Venant en los tramos de canales de riego requiere definir condiciones de frontera interna en los sitios donde se ubican estructuras de control como compuertas, considerando su ecuación dinámica para transmitir información hidráulica hacia ambos lados de la estructura, por lo que en el trabajo se verifican tres procedimientos numéricos de ejecución de maniobra de compuertas, con la finalidad de representar el movimiento de las estructuras de control, minimizándose el desfase de caudales posteriores a una ejecución. Para ello se utilizó el canal Rehbock de la Universidad Autónoma Chapingo, México, realizándose de forma automatizada la medición de los niveles de agua y gasto, obteniéndose que en la maniobra progresiva con reinicialización de tirante, la tendencia del gasto en la vecindad y la compuerta es similar, atenuándose las oscilaciones en el tiempo, el cual se corresponde con la dinámica del agua en los canales; además, cuando la variable a regular es el tirante, se recomienda usar la ejecución de maniobra instantánea o la progresiva con reinicialización de gasto; pero si la variable es el gasto, es preferible la maniobra progresiva con reinicialización de tirante; además, el procedimiento de simulación de la maniobra progresiva con reinicialización de tirante es el que mejor representa la dinámica del agua en la estructura.

Palabras clave: movimiento de compuertas, modelo de simulación, régimen no permanente, estructuras de control.

Abstract

LÓPEZ-CANTEÑS, J.G., PRADO-HERNÁNDEZ, V., DE LEÓN-MOJARRO, B. & RUIZ-CARMONA, V.M. Verification of numeral procedures for simulation of gate maneuvers. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. V, No. 1, January-February, 2014, pp. 43-56.

Applying Saint Venant equations in reaches of irrigation canals requires defining internal boundary conditions at the sites where they are located control structures like gates, considering the dynamic equation to transmit hydraulic information from one side of the structure to continue on the other. In this study three numerical procedures for maneuvering gates are tested to verify whether they represent the movement of these control structures, minimizing flow phase shifts after a maneuver. To this end, the Rehbock canal of the Autonomous University of Chapingo was used. Automated measurements of water depth and flow were taken. Results show that in progressive maneuvering with restart of water depth, flow through the gate and near it tends to be similar, while oscillations diminish over time, a phenomenon which is characteristic of water dynamics in canals. Moreover, when depth is the variable to be regulated it is advisable to use instantaneous or progressive maneuvering with restart of flow. On the other hand, if the variable is flow, progressive maneuvering with restart of depth is preferred. Simulation of progressive maneuvering with restart of depth is the procedure that best represents water dynamics in the structure.

Keywords: gates movement, simulation model, unsteady flow, control structures.

Introducción

Los sistemas de conducción y distribución se integran con un conjunto de canales sobre los cuales se instalan las estructuras necesarias de regulación. El funcionamiento de estos sistemas se evalúa como eficiente si se lleva a cabo sin exceso y sin falta de agua, y sin alterar demasiado el caudal de las extracciones laterales. Para mantener los tirantes y caudales constantes dentro de un cierto rango es necesario maniobrar las estructuras de regulación.

La configuración de los sistemas de canales es compleja, ya que en ellos se alojan estructuras de control estáticas (vertedores) y dinámicas (compuertas) de diferentes tipos; importantes estructuras de extracción, como las de los canales laterales, y una gran cantidad de tomas directas o tomas granja con pequeños caudales, así como estructuras de aportes laterales. La representación matemática de este conjunto de elementos se puede realizar mediante un modelo de flujo no permanente del tipo Saint Venant que no tiene solución analítica (De León *et al.*, 2002).

Las ecuaciones de flujo no permanente son válidas para estudiar el movimiento del agua en los canales de riego, pero es necesario definir condiciones de frontera, internas o externas, para representar las estructuras de control y medición, siendo necesario incorporar en el proceso de modelación las ecuaciones de éstas, teniendo en cuenta su funcionamiento (Malaterre y Baume, 1998).

Manz (1998) menciona que con los modelos de simulación dinámica se pueden predecir las condiciones hidráulicas de flujo en cualquier punto dentro de los sistemas de canales abiertos, como una función de las características físicas y de operación, así como predecir y evaluar la secuencia y el tiempo de maniobra que deben realizarse al lograr las asignaciones. Asimismo, señala que estos modelos simulan dos tipos básicos de características hidráulicas: los componentes de los canales abiertos y las estructuras de control hidráulico.

La mayoría de los modelos matemáticos simulan de forma adecuada el movimiento del agua en los canales debido a que satisfacen los criterios técnicos de conservación de la masa, estabilidad, precisión, convergencia y consistencia (Clemmens *et al.*, 1991; Goussard, 2000; CEMAGREF, 2000). Sin embargo, presentan problemas para simular la propagación de gasto producida por la maniobra de estructuras de control, lo cual puede producir oscilaciones de tipo numérico que prolongan el tiempo de transición de un régimen permanente a otro, y además se refleja en la propagación desfasada de los gastos debido a la no correspondencia entre el comportamiento físico y la solución numérica del fenómeno.

Las deficiencias anteriores hacen que sea necesario profundizar en el estudio de las variaciones temporales de las características hidráulicas inducidas por el movimiento de las estructuras de control. De León *et al.* (2007) presentaron tres procedimientos matemáticos que combinan las ecuaciones de Saint Venant en la vecindad de las compuertas con las ecuaciones de la estructura para transmitir información hidráulica a ambos lados de la misma, por lo que el trabajo tiene como objetivo verificar los procedimientos numéricos de simulación anteriores con la finalidad de minimizar el desfasamiento de caudales posteriores a una ejecución de maniobras en una compuerta radial.

Representación matemática de la operación de canales de riego

Cuando se varían las aberturas de las compuertas o los caudales en las tomas laterales, la dinámica del agua en un tramo de canal de riego a superficie libre limitado por estructuras de control se puede representar mediante las ecuaciones de Saint Venant, que de acuerdo con Chow (1994) están integradas por la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + T \frac{\partial y}{\partial t} = q \quad (1)$$

donde T es el ancho de la superficie libre del agua (m); y , el tirante del agua (m); Q , el gasto (m^3s^{-1}); q , el gasto lateral de aportación (+) o extracción (-), por unidad de longitud del cauce ($\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}$); x , la coordenada en la dirección longitudinal del cauce (m); t , el tiempo (s).

Y la ecuación dinámica, denominada también como ecuación de momento:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(QV)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(S_o - S_f) + kqV \quad (2)$$

Donde S_f es la pendiente de fricción (adim.); S_o , la pendiente del fondo del canal (adim.); g , la aceleración gravitacional (ms^{-2}); V , la velocidad media del flujo (ms^{-1}); A , el área hidráulica (m^2); k , un coeficiente que toma el valor de cero si $q > 0$ y uno si $q < 0$ (adim.).

Las ecuaciones anteriores conforman un sistema hiperbólico de ecuaciones diferenciales parciales no lineales de primer orden en gasto y tirante. Es un sistema altamente no lineal que no tiene solución analítica y por lo tanto se requiere de procedimientos numéricos para su solución.

Las ecuaciones (1) y (2) en los modelos de simulación por lo general se resuelven mediante un esquema implícito de diferencias finitas. En efecto, su solución discreta en cada sección del canal y a cada paso de tiempo es la ecuación recursiva lineal siguiente (Liggett y Cunge, 1975; CEMAGREF, 2000):

$$R_i \Delta Q_i + S_i \Delta y_i = T_i \quad (3)$$

donde:

$$\Delta Q_i = A \Delta Q_{i+1} + B \Delta y_{i+1} + C \quad (4)$$

$$\Delta y_i = D \Delta Q_{i+1} + E \Delta y_{i+1} + F \quad (5)$$

R , S y T son coeficientes que varían en función de la condición límite; A , B , C , D , E

y F , coeficientes que varían de un paso de tiempo a otro y en cada sección del dominio de integración; Δy y ΔQ , las incógnitas en las secciones i e $i + 1$; i , un índice que define la sección de cálculo dentro del espacio de discretización.

Las ecuaciones (3), (4) y (5) relacionan las variables tirante y gasto en cada paso de tiempo para dos puntos consecutivos ($i, i + 1$) definidos por la discretización del espacio. La ecuación recursiva (3) se puede resolver fácilmente mediante el método del doble barrido. El primer barrido se realiza de aguas arriba hacia aguas abajo para obtener los coeficientes R_i , S_i y T_i en el espacio de discretización mediante la ecuación tipo (3) de la forma siguiente:

$$R_{i+1} \Delta Q_{i+1} + S_{i+1} \Delta y_{i+1} = T_{i+1} \quad (6)$$

donde:

$$R_{i+1} = R_i A_i + S_i D_i \quad (7)$$

$$S_{i+1} = R_i B_i + S_i E_i \quad (8)$$

$$T_{i+1} = T_i - R_i C_i - S_i F_i \quad (9)$$

Con el segundo barrido, que se realiza de aguas abajo hacia aguas arriba del tramo se calculan las variaciones de tirante y gasto en la sección i mediante la solución de las ecuaciones (4) y (5).

Condiciones de frontera

Para aplicar cualquiera de los métodos de solución de las ecuaciones del régimen no permanente es necesario definir las condiciones iniciales y de frontera. La primera por lo general está representada por la curva de remanso en el instante inicial $t = t_o$, que se obtiene cuando el régimen es permanente gradualmente variado (Arteaga, 1997), mientras que la segunda se refiere a la definición del tirante, la velocidad o el gasto en los extremos superior e inferior del tramo, al considerar todos los tiempos desde el inicio del cálculo.

Liggett y Cunge (1975), y Husain *et al.* (1988) señalan que existen dos tipos de condiciones de frontera, las exteriores, ubicadas en los extremos de la longitud del canal considerado, y las interiores (CF_i), que se encuentran en las partes intermedias del mismo, ocasionadas por una discontinuidad geométrica o debido a la presencia de una estructura de control. De León *et al.* (2002) asevera que la formulación y el tratamiento de las condiciones de frontera externa al inicio (CF_{arr}) y al final (CF_{ab}) del canal no presentan dificultades para su modelación. De León *et al.* (2007) y CEMAGREF (2000) señalan que la condición de frontera aguas arriba está representada por la demanda de riego, la cual es un hidrograma de entrada del tipo $Q_o = f(t)$, que se puede linealizar en la siguiente forma para solucionar el modelo de Saint Venant mediante la ecuación (3):

$$Q_o(t + \Delta t) - Q_o(t) = f_o(t + \Delta t) - f_o(t) \text{ o también:} \\ \Delta Q_o = \Delta f(t)$$

donde el subíndice 0 representa el inicio del canal.

Con la condición de frontera al inicio del canal (aguas arriba) se inicia el primer barrido para calcular los coeficientes R_i , S_i y T_i , ya que la ecuación (3) es recursiva. Así se tiene que los coeficientes R_o , S_o y T_o al inicio del canal son:

$$R_o = 1.0, S_o = 0.0 \text{ y } T_o = Q_o(t + \Delta t) - Q_o(t)$$

Con el primer barrido se llega al final del canal con un sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas:

$$R_m \Delta Q_m + S_m \Delta y_m = T_m \quad (10)$$

$$f(\Delta Q_m, \Delta y_m) \quad (11)$$

donde m es el último tramo en que se discretizó el canal.

La ecuación (11) representa la condición de frontera aguas abajo, que por lo general se representa mediante una relación conocida

tirante-gasto, cuyos coeficientes R_m , S_m y T_m de la ecuación (3) adoptan la siguiente forma (CEMAGREF, 2000; De León y Prado, 2006):

$$R_m = 1.0, S_m = -\frac{\Delta Q_m}{\Delta y_m} \text{ y } T_m = 0.0$$

Representación matemática de estructuras de control

En los sitios donde se ubican las estructuras de control no son válidas las ecuaciones de Saint Venant, por lo que es necesario introducir dos ecuaciones para transmitir información hidráulica hacia aguas arriba (sección 2) y aguas abajo (sección 3); una asegura la continuidad del gasto y la otra describe la dinámica en la compuerta (figura 1). Por lo tanto, en estos puntos se debe resolver el siguiente sistema de ecuaciones (Cunge, 1988):

$$R_2 \Delta Q_2 + S_2 \Delta y_2 = T_2 \quad (12)$$

$$\Delta Q_2 = \Delta Q_3: \text{ecuación de continuidad} \\ \text{en la estructura} \quad (13)$$

$$f(Q_2, y_2, y_3, a) = 0: \text{ecuación dinámica} \\ \text{en la estructura} \quad (14)$$

donde a es la abertura de la compuerta (m); el subíndice 2 representa la sección de discretización aguas arriba de la compuerta y el 3 aguas abajo de la estructura.

La ecuación (12) es el modelo de Saint Venant linealizado y representa la información hidráulica aguas arriba de la estructura. Del sistema de ecuaciones (12), (13) y (14) se obtiene la ecuación que representa la información aguas abajo de la estructura (De León *et al.*, 2007):

$$R_3 \Delta Q_3 + S_3 \Delta y_3 = T_3 \quad (15)$$

Los coeficientes R_3 , S_3 y T_3 se obtienen de la linealización de la ecuación (14):

$$\frac{\partial f}{\partial t}(Q_2, y_2, y_3, a) = 0 \quad (16)$$

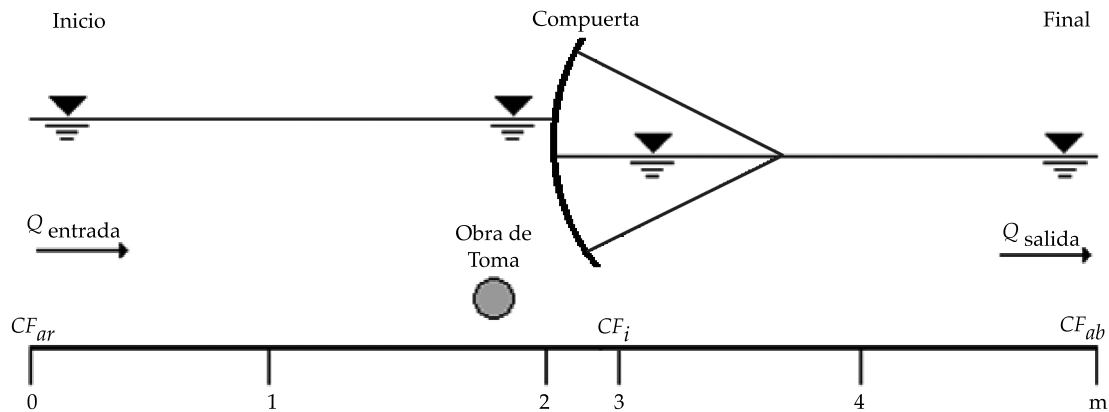


Figura 1. Discretización de un tramo de canal de riego.

Mediante un análisis en el lugar de las estructuras del modelo Saint Venant, De León (1990) obtuvo una ecuación diferencial ordinaria de segundo grado que permite estimar el comportamiento hidráulico en la vecindad de la estructura. Dicha ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{1}{T} \left(\frac{dQ}{dy} \right)^2 - \frac{2Q}{A} \left(\frac{dQ}{dy} \right) + \frac{Q^2 T}{A^2} - gA = 0 \quad (17)$$

La solución principal de la ecuación (17) en dQ/dy se obtiene cuando hay movimiento de estructura y resulta igual a la ecuación siguiente:

$$\frac{dQ}{dy} = (v \pm c)T \quad (18)$$

donde $c = (gA/T)^{1/2}$ es la celeridad de las ondas producidas por la maniobra de la estructura (ms^{-1}).

En la ecuación (18), el signo positivo indica la relación gasto-tirante inmediatamente aguas abajo, mientras que el signo negativo se refiere a la relación aguas arriba.

La ecuación (17) sirve como base para establecer procedimientos de simulación

de ejecución de maniobras que permitan minimizar el error de propagación de gastos. De esta manera, De León *et al.* (2007) plantea que en los puntos donde se localiza una singularidad se puede aplicar la ecuación (18) que identifica a la ecuación recursiva de tipo (3) si $R_i = 1.0$, $S_i = -(v \pm c)T$ y $T_i = 0.0$. Esta ecuación representa las líneas características que parten con información hidráulica hacia aguas arriba y aguas abajo de la estructura, e interceptan la malla de discretización de diferencias finitas.

Ejecución de la maniobra de compuertas de una red de canales de riego

La maniobra de compuertas de regulación en una red de canales de riego es una acción necesaria para mantener el gasto y el tirante cercano a valores de referencia previamente definidos (Litrico y Fromion, 2006).

Si la estructura es estática, una aproximación tangencial de la ecuación dinámica de la compuerta puede utilizarse para continuar la solución aguas abajo de la misma. Sin embargo, De León y Exebio (1990) señalan que cuando se introducen variaciones temporales a la abertura de las compuertas, el procedimiento de aproximación tangencial conduce a errores, los cuales son acumulativos,

puesto que en cada paso de tiempo, o a cada instante de variación, el error de ajuste entre la aproximación tangencial y la función exacta de la singularidad se agrega al nuevo valor de las variables de cálculo (gasto y tirante).

De León (1990) señala que el problema de la aproximación tangencial requiere una forma de previsión de la variación de los niveles aguas arriba (dy_i) y aguas abajo (dy_{i+1}) ante un cambio de la demanda de riego en la estructura (dQ). Lo anterior se logra mediante la ecuación (18), aplicándose el procedimiento siguiente:

$$dy_i = \frac{dQ}{(v_i - c_i)T_i} \quad (19)$$

$$dy_{i+1} = \frac{dQ}{(v_{i+1} + c_{i+1})T_{i+1}} \quad (20)$$

y así se obtienen los nuevos valores de los tirantes: $y_i^{n+1} = y_i^n + dy_i$ y $y_{i+1}^{n+1} = y_{i+1}^n + dy_{i+1}$, donde n representa la etapa de tiempo previa a la variación del gasto.

La ecuación recursiva tipo (3) representa un conjunto de rectas que describen la variación temporal del tirante (dy) y el gasto (dQ) en cada malla de la discretización del espacio. Al superponer en un plano (dy, dQ) las rectas

anteriores y las curvas de abertura de compuerta como se muestra en la figura 2, permitieron a De León *et al.* (2007) analizar las trayectorias descritas por distintos procedimientos de ejecución de maniobras.

Como en la ecuación del tipo (3), la variación temporal del gasto representa el aporte y la variación del tirante el almacenamiento, se debe cumplir para cada paso de tiempo la siguiente relación: aporte + almacenamiento = constante.

Según la relación anterior, al ejecutar una maniobra existen tres posibilidades: a) modificar el almacenamiento y el aporte; b) modificar el almacenamiento, y c) modificar el aporte.

En la figura 2 se muestran las trayectorias descritas por los procedimientos de simulación de maniobras: el recorrido 13 corresponde a la posibilidad "a"; el recorrido 143 corresponde a la posibilidad "b"; y el recorrido 123 corresponde a la posibilidad "c".

Según De León y Prado (2006), el tratamiento numérico de estas tres posibilidades genera dos procedimientos generales de simulación: maniobra instantánea obtenida con la posibilidad "a" y maniobra progresiva obtenida con las posibilidades "b" y "c".

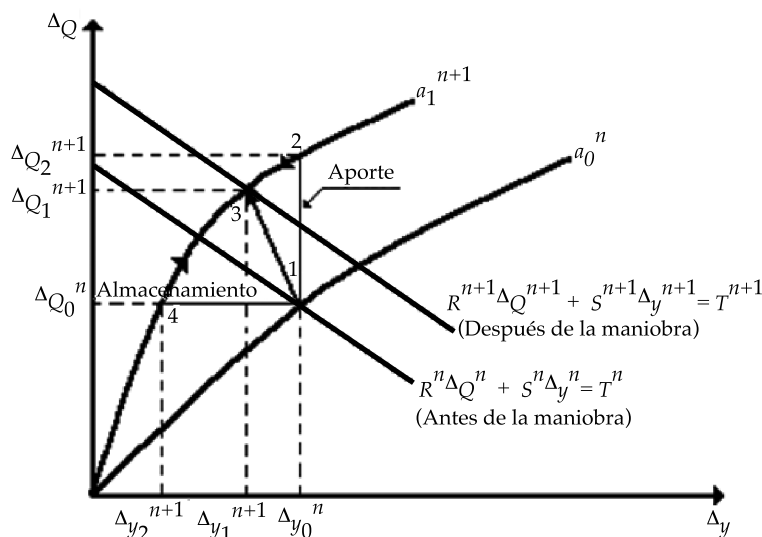


Figura 2. Representación de la maniobra de una estructura hidráulica.

La maniobra progresiva se denomina así porque al suceder un cambio en la demanda de riego se llega al punto de referencia (número 3) durante un paso de tiempo posterior a la maniobra. Mientras que en la maniobra instantánea el desplazamiento al punto de referencia se realiza en el mismo instante que se ejecuta la maniobra.

Materiales y métodos

Caracterización de las instalaciones

Para el desarrollo de la fase experimental se utilizó el canal Rehbock ubicado en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Irrigación en la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), en Chapingo, Estado de México.

El canal Rehbock utilizado es de sección rectangular, con estructura metálica y paredes de cristal, tiene una longitud de 20 m, plantilla de 0.6 m, altura de 1 m y pendiente de 0.0005. Se alimenta a través de una válvula de 12" (0.305 m), que entrega a un estanque amortiguador para evitar turbulencia a la entrada del canal, limitado al inicio por un vertedor de pared delgada sin contracciones laterales y con una altura suficiente para que no trabaje ahogado y una compuerta deslizante.

Al final del canal se encuentra una compuerta deslizante que trabaja como vertedor rectangular movable, y que permite controlar el nivel del agua en el canal. A 5.5 m del inicio se colocó y operó una compuerta radial de 0.75 m de altura, 0.60 m de ancho y radio de compuerta de 0.9 m.

La medición de los niveles de agua se realizó con un sistema automatizado, que consta de seis sensores continuos, cinco ubicados en toda la longitud del canal y uno aguas arriba del vertedor para determinar la carga y con ésta calcular el gasto de entrada.

Procedimientos de simulación de maniobras de compuerta

La maniobra de una compuerta en un canal de riego provoca el cambio de un gasto inicial Q_o a

un gasto final Q_n . Esta situación se establece con una variación de la abertura de la compuerta de un valor inicial a_o a un valor final a_n .

Tomando en cuenta lo anterior, De León y Prado (2006) y De León *et al.* (2007) propusieron una metodología para simular maniobras de las estructuras de regulación que representen el fenómeno de propagación de gastos provocados por una variación de la demanda. Estas metodologías consisten en reinicializar los valores del gasto, abertura y tirantes en la compuerta. La reinicialización de los valores de tirantes sólo se efectúa inmediatamente aguas arriba y aguas abajo de la compuerta; en el resto de las secciones, el modelo general propaga el efecto de la maniobra. La metodología propuesta por estos autores se detalla a continuación.

Maniobra progresiva con reinicialización del gasto

Este procedimiento consiste en reinicializar el gasto en la estructura, el cual corresponde a la variación de la demanda, así como al valor de la abertura, manteniéndose constantes los valores de los tirantes aguas arriba y aguas abajo.

Se parte de que en un instante $t = n$ se conoce el estado hidráulico de la compuerta ($\Delta y_o^n, \Delta Q_o^n, a_o^n$) y la ecuación de la recta tipo (3) que pasa por ese punto. Luego, mediante la maniobra, se puede instalar un gasto $Q_1 = Q_o + \Delta Q$, para lo cual se requiere pasar del punto ($\Delta y_o^n, \Delta Q_o^n, a_o^n$) al punto ($\Delta y_1^{n+1}, \Delta Q_1^{n+1}, a_1^{n+1}$) (figura 2).

Los autores señalan que si sólo se reinicializa el valor del gasto y los tirantes permanecen constantes, en realidad se pasa del punto ($\Delta y_o^n, \Delta Q_o^n$) al punto ($\Delta y_o^n, \Delta Q_2^{n+1}$), cuya ordenada es superior al valor deseado (ΔQ_1^{n+1}).

El punto ($\Delta y_o^n, \Delta Q_2^{n+1}$) corresponde a la intersección del sistema formado por las ecuaciones siguientes:

$$\Delta y_o^n = \text{constante} \quad (21)$$

$$\Delta Q_2^{n+1} = f(\Delta y_o^n, a_1^{n+1}) \quad (22)$$

Como la intersección de este sistema de ecuaciones no corresponde al punto de interés $(\Delta y_1^{n+1}, \Delta Q_1^{n+1})$, los autores señalan que con el reinicio del gasto en un valor ΔQ_1^{n+1} inferior al ΔQ_2^{n+1} se obliga al modelo a descender del punto $(\Delta y_0^n, \Delta Q_2^{n+1})$ hacia el punto de interés $(\Delta y_1^{n+1}, \Delta Q_1^{n+1})$ sobre la curva de la compuerta a_1^{n+1} .

Con este procedimiento se desplaza la recta del tipo (3) del punto $(\Delta y_0^n, \Delta Q_0^n)$ al punto $(\Delta y_1^{n+1}, \Delta Q_1^{n+1})$ en un paso de tiempo. La evaluación de los coeficientes R , S y T permite transmitir información hacia aguas abajo sobre la magnitud de la maniobra.

Maniobra progresiva con reinicialización del tirante

Este procedimiento consiste en reinicializar los valores de los tirantes aguas arriba y aguas abajo, y la abertura de la compuerta, manteniéndose constante el valor del gasto en la estructura. Las variaciones de los tirantes se estiman mediante las ecuaciones (19) y (20).

Al igual que en el procedimiento anterior, se requiere pasar del punto $(\Delta y_0^n, \Delta Q_0^n, a_0^n)$ al punto $(\Delta y_1^{n+1}, \Delta Q_1^{n+1}, a_1^{n+1})$ (figura 2). Los autores señalan que si se reinician los valores de los tirantes aguas arriba y aguas abajo de la compuerta y el gasto permanece constante, se pasa del punto $(\Delta y_0^n, \Delta Q_0^n)$ al punto $(\Delta y_2^{n+1}, \Delta Q_0^n)$, cuya abscisa es inferior al valor reinicializado (Δy_1^{n+1}) .

El punto $(\Delta y_2^{n+1}, \Delta Q_0^n)$ corresponde a la intersección del sistema formado por las ecuaciones:

$$\Delta Q_0^n = \text{constante} \quad (23)$$

$$\Delta Q_0^n = f(\Delta y_2^{n+1}, a_1^{n+1}) \quad (24)$$

La intersección de este sistema da como resultado un gasto inferior al demandado sobre la curva de la compuerta a_1^{n+1} ; luego, como el valor del tirante se reinicializa en un valor Δy_1^{n+1} superior al valor Δy_2^{n+1} , se establece el sentido de desplazamiento de las variables

del punto $(\Delta y_2^{n+1}, \Delta Q_0^n)$ hacia el punto de interés $(\Delta y_1^{n+1}, \Delta Q_1^{n+1})$ sobre la misma curva de la compuerta a_1^{n+1} .

Con este procedimiento, la recta del tipo (3) se desplaza de manera progresiva durante un paso de tiempo (Δt) hacia el punto $(\Delta y_1^{n+1}, \Delta Q_1^{n+1})$. De igual manera, el gasto pasa uniformemente del valor ΔQ_0^n al valor ΔQ_1^{n+1} durante un paso de tiempo.

Maniobra instantánea

Este procedimiento consiste en reinicializar simultáneamente los valores del gasto y los tirantes en la estructura, obtenidos con las ecuaciones (19) y (20); así como la abertura de la compuerta. Los autores señalan que este procedimiento equivale a desplazar la recta del tipo (3) de manera instantánea del punto $(\Delta y_0^n, \Delta Q_0^n)$ hacia el punto de interés $(\Delta y_1^{n+1}, \Delta Q_1^{n+1})$ (figura 2). Este punto corresponde a la intersección del sistema de ecuaciones:

$$R^{n+1}\Delta Q^{n+1} + S^{n+1}\Delta y^{n+1} = T^{n+1} \quad (25)$$

$$\Delta Q_1^{n+1} = f(\Delta y_1^{n+1}, a_1^{n+1}) \quad (26)$$

donde los coeficientes de la ecuación (25) se determinan con la ecuación (18).

En el proceso de simulación se consideró un intervalo de distancia $\Delta x = 0.5$ m y un intervalo de tiempo $\Delta t = 10$ s, que garantizan una representación adecuada de la dinámica del sistema. Además, teniendo en cuenta los criterios sobre el factor de ponderación del tiempo discutidos por Liggett y Cunge (1975), Saavedra y López (1996), y CEMAGREF (2000), se seleccionó un valor de 0.66 para garantizar la convergencia, precisión y estabilidad del modelo.

Resultados y discusión

Verificación de los procedimientos numéricos de simulación de maniobras en compuertas

Para verificar los procedimientos numéricos de ejecución de maniobras en estructuras de control

propuestos por De León *et al.* (2007) se usaron datos experimentales del canal Rehbock y un modelo de simulación de flujo no permanente desarrollado por Prado (2006). Primero se calibró el modelo en régimen permanente para un gasto de operación de $0.095 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, con el fin de obtener las condiciones iniciales. Durante el proceso se ajustaron los valores del coeficiente de rugosidad en el canal y el coeficiente de gasto en la estructura de control, siendo éstos de 0.009 y 0.6, respectivamente.

Al analizar el perfil de la superficie libre del agua, en el cuadro 1 se observó que los residuales de los tirantes medidos y simulados

a lo largo del canal son inferiores a $\pm 0.004 \text{ m}$, mientras que el mayor error porcentual fue de 0.67%, el cual se encuentra dentro de los rangos de error que consideraron como aceptables Arteaga (1997) y CEMAGREF (2000), que están alrededor del 1%. Por lo tanto, se puede considerar que el modelo es capaz de simular con suficiente precisión el comportamiento del agua en el canal para la condición analizada.

Con la finalidad de observar el comportamiento de la ecuación tipo (3) se realizó una variación de gasto a la entrada del canal de $0.023 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ sin efectuarse maniobra en la estructura y resultó la familia de rectas paralelas

Cuadro 1. Calibración del modelo de simulación en el canal Rehbock. Régimen permanente.

Distancia (m)	n	Tirante (m)		
		Medido	Simulado	Residual
0	0.009		0.689	
2.5	0.009	0.688	0.691	-0.003
4.5	0.009	0.694	0.691	0.003
5.5	0.009		0.692	
9	0.009	0.595	0.595	0
13.5	0.009	0.595	0.597	-0.002
18	0.009	0.595	0.599	-0.004
20	0.009		0.600	

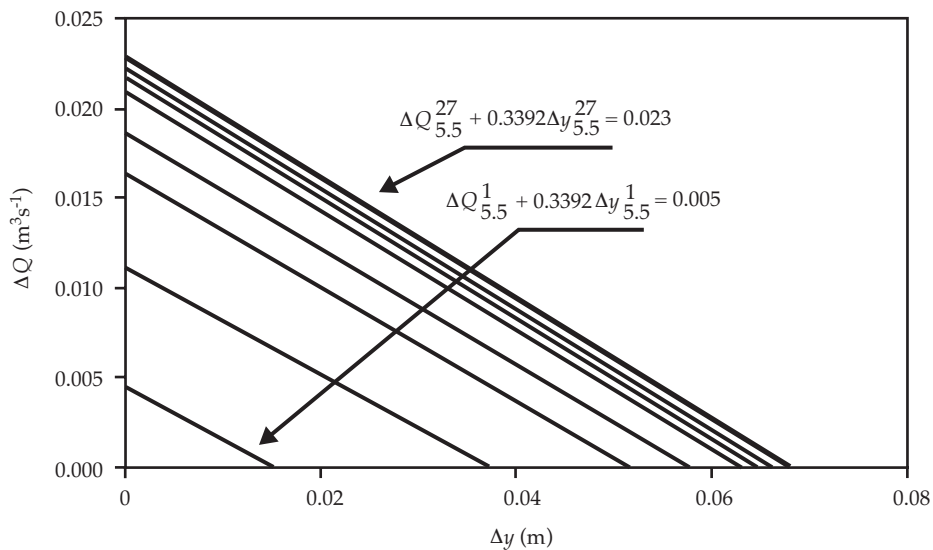


Figura 3. Familia de rectas aporte-almacenamiento en la estructura.

mostrada en la figura 3. Esta familia de rectas representa la variación del gasto y el tirante en la estructura hasta alcanzar un nuevo régimen permanente en 27 pasos de tiempo (4.5 min).

Las rectas resultantes de la ecuación tipo (3) en la vecindad de la estructura, sobrepuestas a las curvas carga-gasto para diferentes aberturas, permitieron analizar los procedimientos de simulación de ejecución de maniobras propuestos por De León *et al.* (2007) para satisfacer una variación en la demanda de riego.

Para satisfacer la variación de la demanda de riego se deben maniobrar las estructuras, lo cual trae consigo una variación de la geometría y de las características de flujo que dificultan el análisis de los términos que conforman las ecuaciones de Saint Venant, por lo que se realizó un análisis global del fenómeno posterior a una maniobra en una vecindad muy próxima a la compuerta.

Para analizar el fenómeno, considerando descarga ahogada, las características geométricas e hidráulicas en la estructura y su vecindad antes de la maniobra ($t = n$) fueron:

Abertura = 0.19 m Tirante aguas arriba = 0.694 m
Gasto = 0.095 m³s⁻¹ Tirante aguas abajo = 0.595 m

Para satisfacer una variación en la demanda de 0.023 m³s⁻¹ un paso de tiempo después de la maniobra ($t = n + 1$) se obtuvieron las siguientes condiciones geométricas e hidráulicas:

Abertura = 0.28 m Tirante aguas abajo = 0.600 m
Tirante aguas Tipo de descarga = ahogada
arriba = 0.667 m

La abertura de la compuerta se obtuvo mediante su ecuación dinámica, mientras que los tirantes aguas arriba y aguas abajo se calcularon con las ecuaciones (19) y (20).

Al superponer la familia de rectas de aporte—almacenamiento con las curvas de carga—gasto correspondiente a la estructura, se obtuvo la figura 4, que representa las trayectorias que siguen los métodos de ejecución de maniobras de compuerta propuestos por De León *et al.* (2007). Del análisis de la figura anterior se observa que cuando se reinicializa el gasto y el tirante permanece constante (a),

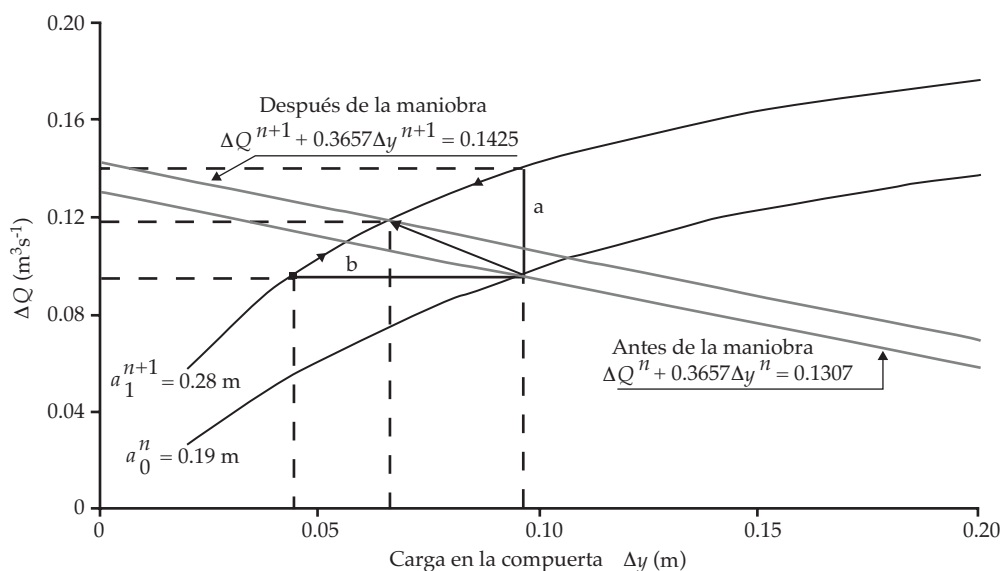


Figura 4. Recorrido del gasto y el tirante para la maniobra de la compuerta correspondiente a la variación de demanda.

la intersección de las ecuaciones (21) y (22) da como resultado un gasto de $0.141 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ sobre la curva de la compuerta $a_1^{n+1} = 0.28 \text{ m}$, que es superior al de referencia ($0.118 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Sin embargo, con la reinicialización del gasto se impone el valor demandado, obligándose al modelo a descender hasta el punto deseado, cuyas coordenadas son $\Delta y = 0.067 \text{ m}$ y $\Delta Q = 0.118 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, sobre la misma curva de la compuerta en un paso de tiempo.

Para el caso en que se reinicialice el tirante y el gasto permanezca constante (b), se tiene un punto de intersección de las ecuaciones (23) y (24) que representa una carga en la compuerta de 0.044 m , la cual es inferior al valor de referencia (0.067 m) sobre la curva de la compuerta $a_1^{n+1} = 0.28 \text{ m}$. Esto ocasiona un gasto de $0.095 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, inferior al gasto demandado de $0.118 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. La diferencia en el gasto se corrige con la reinicialización de los tirantes, imponiendo la carga necesaria para lograr el punto de referencia ($0.067, 0.118$) sobre la misma curva de la compuerta en un paso de tiempo.

Cuando se realiza la maniobra instantánea de la compuerta ocurre una reinicialización del gasto y el tirante (c), por lo que el modelo se desplaza instantáneamente del punto inicial ($0.097, 0.095$) en la curva de la compuerta

$a_0^n = 0.19 \text{ m}$ hasta la ubicación del punto de referencia ($0.067, 0.118$) sobre la curva de la compuerta $a_1^{n+1} = 0.28 \text{ m}$.

Evolución del caudal en maniobra progresiva

Reinicialización del tirante

Al imponer el tirante en el proceso de cálculo durante la simulación de la maniobra de la compuerta, se observó en la figura 5 que a partir de $t = 1 \text{ min}$, momento en que se efectúa la variación de la demanda el gasto aguas arriba, aguas abajo y en la compuerta tienen la misma tendencia, es decir, las oscilaciones se propagan al mismo tiempo y se amortiguan de la misma forma. Sin embargo, el modelo estima un paso de tiempo después de la variación de gasto, siendo ésta de $0.011 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, valor que es inferior al $0.023 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ correspondiente al cambio de la demanda, por lo que se produce una subestimación del aporte ocasionado por la variación de almacenamiento; comportamientos similares fueron encontrados por De León y Prado (2006), y De León et al. (2007).

Las oscilaciones numéricas del gasto provocadas por la maniobra de la compuerta

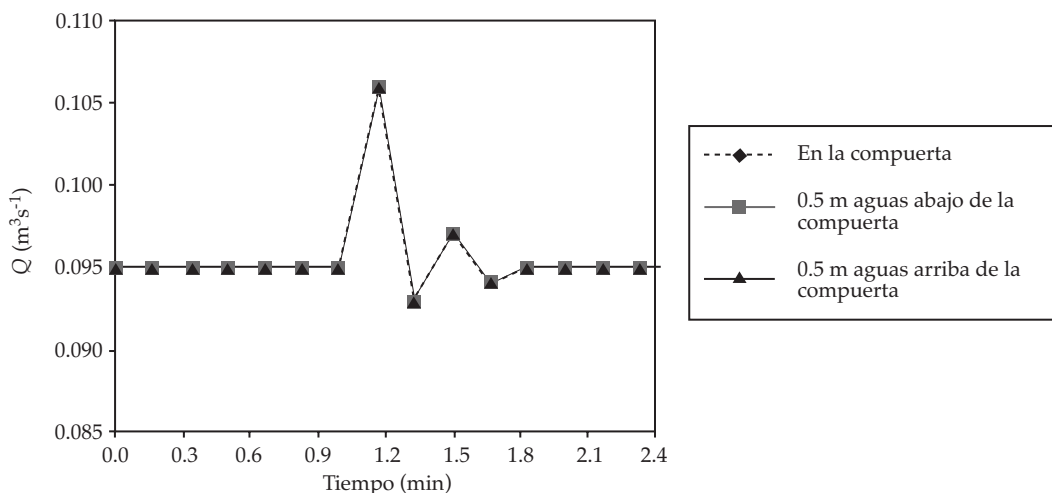


Figura 5. Maniobra progresiva con reinicialización de tirante y gasto constante.

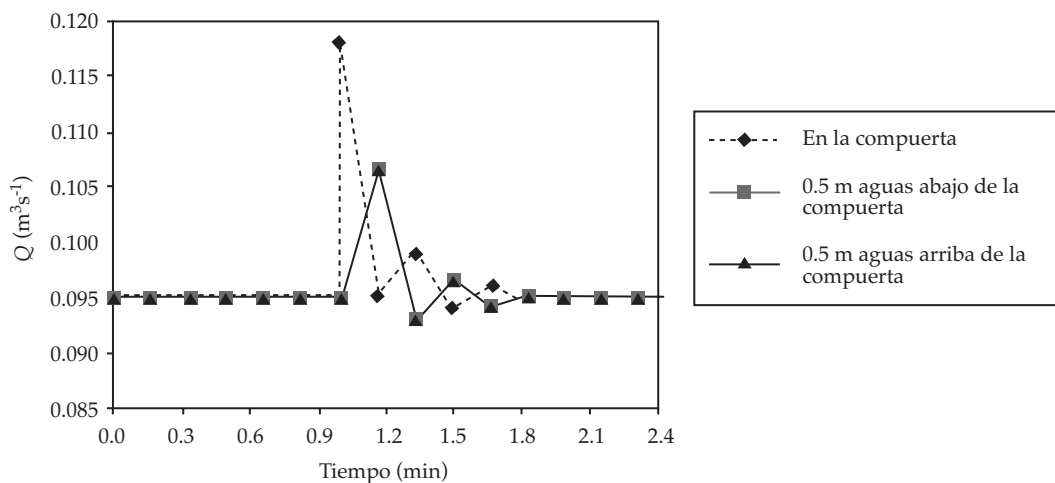


Figura 6. Maniobra progresiva con reinicialización de gasto y tirante constante.

se atenúan de forma rápida, ya que el tiempo en alcanzar un nuevo régimen permanente es de 1.8 min.

Reinicialización del gasto

Cuando se reinicializa el gasto en el proceso de simulación, se aprecia en la figura 6 que a partir de $t = 1$ min, momento en que se efectúa el cambio en la demanda, hay un desfase del gasto en la estructura con respecto a sus vecindades aguas arriba y aguas abajo. La maniobra repercute de manera instantánea en la variación del gasto en la compuerta, mientras que en su vecindad sucede el cambio un paso de tiempo después, propagándose en fase las oscilaciones en ambos lados de la estructura. Además existe una diferencia de gasto de $0.011 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ entre la compuerta y las secciones aguas arriba y aguas abajo, que se atenúa a los 1.8 min.

La variación del comportamiento del gasto en el tiempo para las secciones analizadas se debe a la incompatibilidad entre la escala numérica y la escala física del fenómeno de propagación, coincidiendo con De León *et al.*

(2007), lo cual pudiera solucionarse reduciendo el paso de tiempo en el proceso de simulación, pero traería como desventaja el incremento del tiempo de procesamiento en la computadora.

Evolución del caudal en maniobra instantánea

Cuando se realiza la reinicialización del gasto y el tirante, se observa en la figura 7 que a partir de que comienza el régimen no permanente ($t = 1$ min) existe un comportamiento similar de los gastos con respecto a la maniobra progresiva que reinicializa el gasto, pero la amplitud de las oscilaciones es mayor. Como puede apreciarse, existe variación del gasto en la estructura al momento de realizar la maniobra, mientras que aguas arriba y aguas abajo se observa un paso de tiempo después y se propaga en fase, estabilizándose las oscilaciones numéricas en 1.8 min.

Como se reinicializa el valor del gasto, es de esperarse que al momento de efectuar la maniobra, el gasto en la estructura sea igual al demandado, como se observa en la figura 7. También se aprecia que es el único procedimiento de ejecución de maniobras en el

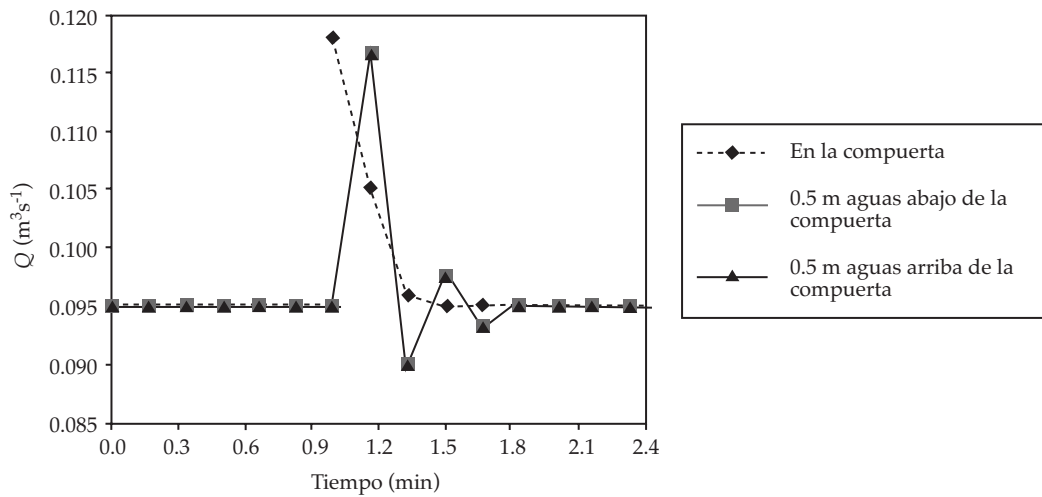


Figura 7. Maniobra instantánea con reinicialización de gasto y tirante.

que desaparecen las oscilaciones numéricas en la compuerta. Sin embargo, aunque el tiempo en que ocurre el fenómeno transitorio es el mismo en los tres procedimientos, en éste las oscilaciones numéricas son mayores.

Se verificaron los tres procedimientos de simulación de maniobras de compuerta propuestos por De León *et al.* (2007), los cuales minimizan el problema del desfaseamiento entre el gasto de las compuertas consecutivo a la operación y los gastos en la vecindad de ésta, además pueden integrarse estos procedimientos en la ejecución de maniobras de estructuras de control en modelos de flujo no permanente. Sin embargo, la selección del método de operación dependerá del problema a resolver; en caso de que la variable a regular sea el gasto, entonces se debe usar la maniobra progresiva con reinicialización de los tirantes, pero cuando la variable a regular es el tirante, se debe utilizar la maniobra progresiva con reinicialización de gasto.

Al evaluar el comportamiento de los procedimientos de simulación de operación de compuerta (figuras 5, 6 y 7) se pudo determinar que la maniobra progresiva con reinicialización de tirante es la que más se corresponde con el funcionamiento real de una compuerta en un

sistema de riego, ya que las variaciones del gasto ocurren al mismo tiempo en la estructura y en su vecindad al momento de efectuar una maniobra.

Conclusiones

Se cumplieron las hipótesis planteadas por De León *et al.* (2007) sobre la aplicación de tres procedimientos de simulación de maniobras de compuerta en canales de riego.

Los procedimientos de simulación de maniobras evaluados minimizan el problema del desfaseamiento de gastos en la vecindad de las estructuras provocados por una variación en la demanda.

El procedimiento de simulación con reinicialización de tirante es el que mejor representa la dinámica del flujo ante una ejecución de maniobra de la compuerta.

Recibido: 07/06/10

Aceptado: 21/05/13

Referencias

ARTEAGA, E. *Análisis y verificación de modelos matemáticos para el régimen impermanente en canales de riego*. Tesis

- de Doctor en Ciencias Técnicas. La Habana: Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría, 1997, 121 pp.
- CEMAGREF. Simulation of irrigation canals. Volume II. *Theoretical concepts modeling approach*. Montpellier, France: CEMAGREF, 2000, 80 pp.
- CHOW, V.T. *Hidráulica de canales abiertos*. Santafé de Bogotá, Colombia: Editorial McGraw Hill Interamericana S.A., 1994, pp. 513-543.
- CLEMMENS, A.J., HOLLY, F.M., BURT, C.M., and DEVRIES, J.J. *Future needs for unsteady flow canal models*. ASCE National Conference on Irrigation and Drainage Engineering, Hawaii, 1991, pp. 501-507
- CUNGE, J.A. *Simulation des écoulements non permanents dans les rivières et canaux*. Grenoble: Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique de Grenoble, 1988, 173 pp.
- DE LEÓN, B. Modelación matemática de la maniobra de estructuras en una red de canales de riego. *Agrociencia*. Serie Agua-Suelo-Clima. Vol. 1, núm. 4, 1990, pp. 101-109.
- DE LEÓN, B., PRADO, V., VERDIER, J. y FUENTES, C. Simulación numérica del movimiento de estructuras de control en canales de riego. *Agrociencia*. Vol. 41, núm. 1, 2007, pp. 75-86.
- DE LEÓN, B. y PRADO, V. *Ejecución de la maniobra de compuertas en una red de canales de riego*. Documento Interno. Jiutepec: IMTA, 2006, 22 pp.
- DE LEÓN, B., VERDIER, J., PIQUEREAU, A., RUIZ, V. y RENDÓN, L. Control of an Irrigation Canal Network. *Hydraulic Engineering in Mexico*. Vol. XVII, No. 4, October-December, 2002, pp. 21-34.
- DE LEÓN, B. y EXEBIO, A. *La modelación matemática aplicada al estudio de la planeación de la operación de Unidades de Riego*. Montecillo, México: Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, 1990, 14 pp.
- GOUSSARD, J. *Modèles de Simulation du Fonctionnement des Canaux*. Grenoble, France: ICID-CIID, 2000, 28 pp.
- HUSAIN, T., ABDERRAHMAN, W., KHAN, H., KHAN, S., KHAN, A., and EQNAIBI, B. Flow simulation using channel network model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Vol. 114, No. 3, 1988, pp. 424-441.
- LIGGETT, A. and CUNGE, J.A. Numerical methods of solution of the unsteady flow equations. Chapter 4 of "Unsteady flow in open channels". Vol. I. Edited by Mahmood, K. and Yevjevich, V. Ft. Collins, USA: Water Resources Publications, 1975, pp. 89-163.
- LITRICO, X. and FROMION, V. Boundary control of linearized Saint Venant equations oscillating modes. *Automática*. Vol. 42, 2006, pp. 967-972.
- MALATERRE, P.O. and BAUME, J.P. *Modeling and regulation of irrigation canals: existing applications and ongoing researches*. International Conference on Systems, Man and Cybernetics, California, USA, 1998, pp. 3850-3855.
- MANZ, D.H. *Evaluación del funcionamiento de los sistemas de conducción de agua para riego, usando modelos de simulación dinámica*. Calgary, Canadá: Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Calgary, 1998, pp. 7-35.
- PRADO, V. *Calibración de compuertas y simulación de la maniobra*. Documento Interno. Jiutepec, México: IMTA, 2006, 37 pp.
- SAAVEDRA, Y. y LÓPEZ, J.L. Comparación de dos esquemas en diferencias finitas para la solución de ecuaciones de flujo no permanente en canales abiertos. *En Memorias del XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Guayaquil, Ecuador, 1996, pp. 97-108.

Dirección institucional de los autores

Dr. Gilberto de Jesús López Canteñs

Dr. Víctor Prado Hernández

Universidad Autónoma Chapingo
Km. 38.5 carretera México-Texcoco
56230 Chapingo, Estado de México, MÉXICO
Teléfonos: +52 (595) 9521 680 y 9526 298
alelopez10@hotmail.com
vpradohdez@gmail.com

Dr. Benjamín de León Mojarro

Director de Conagua en Zacatecas
Comisión Nacional del Agua
Avenida Secretaría de la Defensa Nacional 90
Colonia Industrial
98604 Guadalupe, Zacatecas, MÉXICO
Teléfono: +52 (492) 4914 951
felipe.deleon@conagua.gob.mx

Dr. Víctor Manuel Ruiz Carmona

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Coordinación de Riego y Drenaje
Subcoordinación de Operación y Mantenimiento de
Infraestructura Hidroagrícola
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
Teléfono: +52 (777) 3293 600, extensión 609
Fax: + 52 (777) 3293657
vmruiz@tlaloc.imta.mx

Dr. Mauricio Carrillo García

Dra. Laura Ibáñez Castillo

Dr. Eduardo Arteaga Tovar

Universidad Autónoma Chapingo
Km. 38.5 carretera México-Texcoco
56230 Chapingo, Estado de México, MÉXICO
Teléfonos: +52 (595) 9521 649 y 9521 551
Fax: +52 (595) 9521 650
mauricio@correo.chapingo.mx
libacas@gmail.com
eatovar@correo.chapingo.mx