

**EVALUACIÓN DE MODELOS
APROXIMADOS PARA EL
DISEÑO DE CONTROL
AUTOMÁTICO EN SISTEMAS
DE RIEGO A CANAL ABIERTO**

EVALUATION OF APPROXIMATE
MODELS FOR THE DESIGN OF
AUTOMATIC CONTROL IN OPEN
CHANNEL IRRIGATION SYSTEMS

AVALIAÇÃO DE MODELOS
APROXIMADOS PARA O
DESENHO DO CONTROLE
AUTOMÁTICO EM SISTEMAS
DE IRRIGAÇÃO DE CANAIS
ABERTOS

**Juan Sebastián Rincón
Merchán**

FICB, Ingeniería Ambiental,
Universidad Central,
jrinconm2@ucentral.edu.co
(Institucional)

**María Fernanda Munar
Rodríguez**

FICB, Ingeniería Ambiental,
Universidad Central,
mmunarr@ucentral.edu.co
(Institucional)

Gregory Johann Conde Méndez
FICB, Maxwell – Ingeniería
Electrónica, Universidad
Central,
gcondem@ucentral.edu.co
(Institucional)

**Mikel Fernando Hurtado
Morales**

FICB, Maxwell- Ingeniería
Electrónica, Universidad
Central,
mhurtadom1@ucentral.edu.

Fecha de Recepción: 30 de septiembre de 2019

Fecha aprobación: 10 de febrero de 2020

Resumen

El aumento de la población y su dependencia a la producción agrícola ha incrementado exponencialmente a lo largo de la historia. Para esto mediante el cultivo de tierras, la agricultura satisface la demanda de alimentos, no obstante, en el proceso esta actividad requiere de millones de litros de agua, los cuales son distribuidos en sistemas de riego a canal abierto. En Colombia la falta de inversión tecnológica y los pocos estudios, conllevan a una deficiencia de estructuras capaces de evitar y controlar el desperdicio de agua. Dicha problemática puede ser abordada desde el control automático de sistemas de riego, los cuales se desarrollan a partir de modelos matemáticos que predicen de forma aproximada las dinámicas de agua, como variaciones del caudal, obstrucciones en el sistema, descargas y nivel de agua a lo largo de los canales. Por esta razón este proyecto tiene como objetivo evaluar modelos reportados en la literatura que han sido usados en el diseño de control automático para canales de riego, mediante un canal propuesto de tres secciones, seleccionando el que más se ajuste a las dinámicas del software SWMM para aplicarlo a un caso de estudio, de lo cual se determina que el ajuste de unos modelos aproximados es más adecuado que otros, y que es posible continuar ampliando la investigación y desarrollo de modelos que se aproximen de manera más precisa a las dinámicas del agua, para así implementar estrategias de diseño de control automático en sistemas de riego a canal abierto en Colombia.

Palabras clave— Modelos aproximados, nivel de agua, control automático, canales abiertos, apertura de compuertas.

Abstract

The increase in the population and its dependence on agricultural production has increased exponentially throughout history. For this through land cultivation, agriculture satisfies the demand for food, however, in the process this activity requires millions of liters of water, which are distributed in open-channel irrigation systems. In Colombia, the

lack of technological investment and the few studies lead to a lack of structures capable of avoiding and controlling water waste. This problem can be addressed from the automatic control of irrigation systems, which are developed from mathematical models approximately predict water dynamics, such as flow variations, system obstructions, discharges and water level along the channels. For this reason this project aims to evaluate models reported in the literature that have been used in the design of automatic control for irrigation channels, through a proposed channel of three sections, selecting the one that best suits the dynamics of SWMM software to apply it to a case study, from which it is determined that the adjustment of some approximate models is more appropriate than others, and that it is possible to continue to expand the research and development of models that are more precisely approaching the dynamics of water, in order to implement automatic control design strategies in irrigation systems to open channel in Colombia.

Keywords— Approximate models, water level, automatic control, open channels, opening of gates.

Resumo

O aumento da população e sua dependência da produção agrícola tem aumentado exponencialmente ao longo da história. Para isso, através do cultivo da terra, a agricultura atende a demanda por alimentos, porém, no processo esta atividade requer milhões de litros de água, que são distribuídos em sistemas de irrigação de canal aberto. Na Colômbia, a falta de investimento tecnológico e os poucos estudos, levam a uma deficiência de estruturas capazes de evitar e controlar o desperdício de água. Este problema pode ser resolvido a partir do controle automático dos sistemas de irrigação, que são desenvolvidos a partir de modelos matemáticos que prevêem, grosso modo, a dinâmica da água, tais como variações no fluxo, obstruções do sistema, descargas e nível de água ao longo dos canais. Por esta razão, o objetivo deste projeto é avaliar modelos relatados na literatura que têm sido utilizados no projeto de controle automático para canais de irrigação, através de uma proposta de canal de três seções,

selecionando aquele que melhor se ajuste à dinâmica do software SWMM para aplicá-lo a um estudo de caso. A partir disto, determina-se que o ajuste de alguns modelos aproximados é mais adequado do que outros, e que é possível continuar expandindo a pesquisa e desenvolvimento de modelos que aproximem com maior precisão a dinâmica da água, a fim de implementar estratégias de projeto de controle automático em sistemas de irrigação de canal aberto na Colômbia.

Palavras chave— Modelos aproximados, nível de água, controle automático, canais abertos, abertura de portões.

Introducción

El aumento de la población y su dependencia de la producción agrícola ha incrementado exponencialmente a lo largo de la historia, y se estima que cerca de 2.600 millones de personas dependen directamente de ésta [1]. Además, mediante una proyección demográfica se calcula que para el año 2030 la población alcanzará los 8.500 millones de habitantes y para el 2050 los 9.700 millones [2], lo que en consecuencia traerá una mayor demanda agrícola.

La agricultura requiere aproximadamente el 85% del agua dulce en el mundo y en Colombia se calcula que esta actividad demanda el 43% del agua del territorio nacional, asimismo, se prevé que la demanda aumentará considerablemente para el año 2022. En la actividad agrícola, una de las técnicas más comunes para transportar y suministrar agua son los sistemas de riego, los cuales permiten el acceso al recurso hídrico y una producción continua de alimentos [3]. Actualmente, en Colombia se encuentran consolidados 18 grandes distritos de riego, de los cuales únicamente dos (Zulia en Norte de Santander y el del Valle de Sibundoy en Putumayo) cuentan con estudios del área, y los 16 distritos restantes se catalogan como una actividad improvisada e irresponsable por falta de conocimiento de vocación de suelos, uso desmesurado de agua y manejo manual y empírico de estructuras, lo que en consecuencia trae posibles impactos al ambiente y sus recursos naturales [4].

El territorio nacional se caracteriza por su amplia vocación agrícola y su gran oferta hídrica natural, sin embargo, considerando que el recurso hídrico presenta limitaciones y que la demanda de éste en la agricultura aumenta, surge la necesidad de una gestión sostenible del agua para elevar la producción de alimentos, evitando pérdidas causadas por evaporación, obstrucciones, infiltración o por falta de infraestructura adecuada que aporte al buen uso del agua y a su vez al desarrollo económico y sostenible del país [5]. Por otra parte, la falta de inversión tecnológica y el poco desarrollo de infraestructuras en sistemas de riego a canal abierto, limita la existencia de estudios e información que permitan implementar estrategias y diseño de control automático, no obstante, para su implementación, es necesario contar con información física de los canales, ya que a partir de ésta se pueden simular las dinámicas del agua en cuanto a flujo y nivel.

Dichas dinámicas se describen a partir de las ecuaciones diferenciales parciales de Saint-Venant, por lo que este modelo matemático ha sido aplicado en ingeniería y diseño hidráulico para hallar la variación del caudal y el nivel de agua en tuberías o canales abiertos [6]. Sin embargo, debido a la complejidad de las ecuaciones y su impráctico uso para diseño de sistemas de control, en la literatura se encuentran modelos que aproximan las dinámicas del agua y permiten el diseño de controles automáticos en sistemas de riego a canal abierto.

Como ejemplo, en la literatura se encuentran modelos usados para el diseño de control automático en canales de riego como en [10] donde las aproximaciones conocidas como Muskingum e Integrator Delay son aplicadas para el desarrollo de un modelo de control predictivo (MPC) con el fin de manejar cambios y perturbaciones en cuanto al flujo y nivel en un canal de laboratorio propuesto y diseñado en Technical University of Catalonia. Además, en [11] se comparan los modelos Muskingum e Integrator Delay para el diseño de controladores de nivel de PID y MPC, donde el modelo ID presenta una mejor eficiencia en el diseño de MPC y Muskingum en PID, sin embargo, en ambos modelos la respuesta de control es similar. Por otra parte, en [13] el modelo

Integrator Delay Zero es usado para mantener el nivel del agua sobre un valor deseado, usando estrategias de control descentralizado en sistemas de flujo abierto (redes de navegación interna).

Con base en lo anterior, en este proyecto se compararon los modelos matemáticos aproximados contra el modelo fundamental de Saint Venant sobre un canal de tres secciones propuesto, el cual es simulado en los softwares Matlab y SWMM. Posteriormente se seleccionará el modelo aproximado que más se ajuste al modelo fundamental y éste será validado sobre el caso de estudio propuesto en [14] y trabajado en [15].

Materiales y métodos

Las ecuaciones diferenciales parciales establecidas por Saint-Venant describen las dinámicas del agua a lo largo de un canal en un espacio unidimensional y tiempo determinado [6]. Sin embargo, la teoría para el diseño de sistemas de control se fundamenta sobre modelos descritos por ecuaciones diferenciales ordinarias, por lo que en la literatura se encuentran modelos que presentan aproximaciones a las dinámicas en canales y permiten el diseño de control automático en sistemas de riego a canal abierto.

Las ecuaciones de Saint Venant (SVE) están dadas por la ecuación (1) de continuidad o conservación de masa y la ecuación (2) de momento, como se describe a continuación:

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{1}{B} \frac{\partial q}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{dq}{dt} = -2\beta \frac{q}{A_c} \frac{\partial q}{\partial x} + \beta B \frac{q^2}{A_c^2} \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{lq|qgn^2}{A_c R^3} + g(I - \partial y / \partial x) A_c \quad (2)$$

Donde, B es al ancho del canal (m), g es la constante gravitacional de $9.81 (m/s^2)$, el flujo está dado por q en (m^3/s), R el radio hidráulico en (m), el fondo del canal y en (m), t es el tiempo en (s), x una posición en la longitud del canal en (m), β , es el coeficiente de corrección de momento, A_c es el área mojada del canal, I es la pendiente y n corresponde al coeficiente de rugosidad de Manning que depende del material del canal [16].

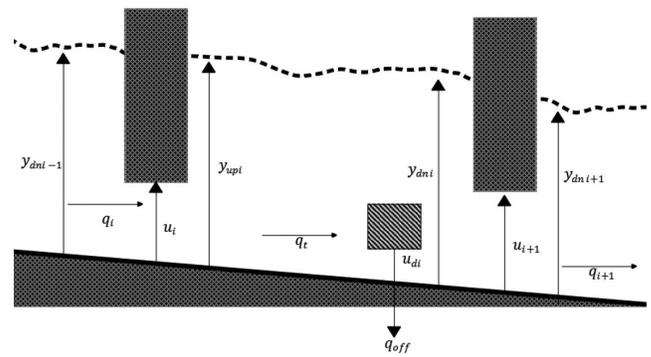


Fig. 1 Descripción canal abierto

Al igual que SVE los modelos aproximados presentan ecuaciones bajo el fundamento de conservación de masa y energía que aproximan las dinámicas del agua en los canales.

A. Modelo Integrator Delay (ID)

El modelo Integrator Delay desarrollado por Schuurmans en 1997, es un modelo aproximado que permite el diseño de control en sistemas de transporte de agua. El modelo considera una división aguas arriba y aguas abajo en la estructura hidráulica, en este caso un canal. Donde la división en la parte alta de la sección del canal está determinada por el paso del caudal y la parte baja el almacenamiento. El modelo, solo considera dos variables: el área de almacenamiento del canal y el tiempo de retardo que depende de las descargas [17, 18]

El modelo es descrito por la ecuación:

$$A_i \dot{y}(t) = q_{i(t-\tau)} - q_{off} - q_{i+1} \quad (3)$$

Donde $q_{i(t-\tau)}$ es el caudal de entrada después de un retardo, q_{off} es el caudal de descarga y q_{i+1} el caudal de salida.

El cálculo de τ está definido por:

$$\tau = \frac{L}{C + v} \quad (4)$$

Donde L es la longitud del canal, C es la celeridad y v es la velocidad, aplicando la transformada de Laplace para el modelo se obtiene la función de transferencia.

$$G_{ID}(s) = \frac{y(s)}{q_i(s)} = \frac{1}{As} e^{-s\tau} \quad (5)$$

B. Modelo Integrator Delay Zero (IDZ)

El modelo IDZ propuesto por Litrico y Fromion en 2004, al igual que el modelo ID, considera que un canal se divide en dos, donde la parte alta de la sección del canal se caracteriza por un flujo uniforme y la parte baja por el almacenamiento, no obstante, este modelo además de considerar el nivel en la parte alta del canal, añade un cero a la función de transferencia lo que permite aumentar la precisión del modelo, y a su vez estudia el comportamiento del canal en bajas y altas frecuencias generando las dinámicas del flujo en cualquier condición. En [19] el modelo es descrito por:

$$A_i \dot{y}_{up,i} = q_i - q_{off,i}(t-\tau) - q_i(t-\tau) \quad (6)$$

$$A_i \dot{y}_{dn,i} = q_i(t-\tau) - q_{i+1} - q_{off} \quad (7)$$

C. Modelo Muskingum

El modelo de Muskingum fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos como método para el enrutamiento de inundaciones [20]. El modelo se basa en la ecuación de continuidad simplificada, y una relación algebraica entre el almacenamiento que ocurre en un tramo y las entradas y salidas de este, sin embargo, el método requiere de pasos de calibración y simulación. El paso de calibración se obtiene por medio del uso de datos de hidrogramas de entrada y salida del río y el paso de simulación consiste en el hidrograma de salida determinado por la relación del almacenamiento y descarga del río [21]–[23].

En el método lineal del modelo de Muskingum, el volumen V se representa mediante la ecuación de almacenamiento y descarga a partir de los parámetros K y χ que son el tiempo de viaje promedio y los efectos relativos de la entrada y salida en el almacenamiento de alcance respectivamente [24].

El modelo se describe por la siguiente ecuación:

$$V(t) = k[\chi q_i(t) - (1 - \chi)q_t(t)] \quad (8)$$

Para la sección del canal donde se almacena el agua el modelo se describe a partir del siguiente balance de masa:

$$\dot{V}(t) = q_i(t) - q_t(t) \quad (9)$$

El cual puede verse como:

$$A_i \dot{y}(t) = q_t - q_{i+1} - q_{off} \quad (10)$$

Donde q_i es el caudal de entrada, q_t es el caudal de transición, q_{off} el caudal de descarga y q_{i+1} es el caudal de salida.

Para el cálculo del parámetro k , se encuentra la siguiente aproximación, la cual puede entenderse como el tiempo que toma el agua en recorrer el canal. Siendo así, el parámetro se expresa en unidades de tiempo (segundos).

$$k = \frac{L}{C + v} \quad (11)$$

Donde L es la longitud del canal, C es la celeridad y v es la velocidad en estado estacionario. Por otra parte, aplicando la transformada de Laplace para el modelo se obtiene la función de transferencia.

$$q_{i+1}(s) = G_m(s)q_i(s) = \frac{(1 - k\chi s)}{(k(1 - \chi)s + 1)} q_i(s) \quad (12)$$

Para obtener el parámetro χ , este puede ser aproximado mediante el flujo y las dimensiones del canal y debe estar en un rango de 0 y 0.5. Generalmente para corrientes naturales χ toma un valor medio cercano a 0.2.

D. Modelo First Approximation

El modelo propuesto en [25], menciona las dinámicas dentro de los sistemas de agua descritas por las ecuaciones de Saint-Venant y pueden ser aproximadas por principios físicos como los balances de masa.

En el modelo First Approximation el balance general es descrito por:

$$V = q_i - q_{i+1} \quad (13)$$

Donde V es el volumen total de agua que entra al canal, q_i es el caudal de entrada y q_{i+1} es el caudal de salida. El caudal que pasa por el canal depende

del tipo de compuertas y de su apertura, en este caso de compuertas tipo cortina.

$$q_i = \gamma_i \sqrt{y_{dni} - y_{upi}} \quad (14)$$

Donde y_{dni} es el nivel en la parte baja de la sección del canal, y_{upi} el nivel en la parte alta y γ_i es una constante calculada a partir de $\gamma_i = w_i u_i cd \sqrt{2g}$.

Por otra parte, el modelo supone que el nivel en la parte alta está dado por y_{upi} y que el nivel en la parte baja (y_{dni}) luego de un retardo es similar a y_{upi} y es determinado por: $l_i y_{upi(t-\tau_i)}$, donde l_i corresponde a una diferencia de potencial entre el nivel en la parte alta y la parte baja.

El modelo está descrito por:

$$A_i \dot{y}_{up,i} = q_i - q_{off} - q_{i+1} \quad (15)$$

Donde:

$$q_i = w_i u_i cd \sqrt{2g} \sqrt{l_{i-1} y_{up-1(t-\tau_{i-1})} - y_{upi}} \quad (16)$$

$$q_{off,i} = w_{di} u_{di} cd \sqrt{2g} \sqrt{l_i y_{upi(t-\tau_{i-1})} - \frac{u_{di}}{2}} \quad (17)$$

$$q_{i+1} = w_{i+1} u_{i+1} cd \sqrt{2g} \sqrt{l_i y_{upi(t-\tau_{i-1})} - y_{upi+1}} \quad (18)$$

w hace referencia al ancho de la compuerta, u es la altura de la compuerta y cd es el coeficiente de descarga de 0.65.

E. Evaluación de Modelos

De acuerdo a los modelos que aproximan las dinámicas de los sistemas de riego en canal abierto y los pocos criterios de selección de la mejor alternativa en este proyecto se propone la evaluación de los modelos aproximados por medio de la implementación en una herramienta computacional conocida como SWMM, la cual ha sido desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y es usada para la planificación, diseño, evaluación de estrategias de control, que de acuerdo a sus capacidades permite manejar redes de tamaño ilimitado, realizar modelaciones hidráulicas y enrutamiento de escorrentía, a través de sistemas de agua como tuberías y canales [26], se propone un canal de tres secciones con el que se validan los modelos aproximados.

Además, estos son simulados en el software Matlab, diseñado para resolver problemas científicos y de ingeniería a partir del manejo de datos y su herramienta Simulink, la cual soluciona numéricamente ecuaciones diferenciales mediante entradas gráficas, y permite a través de una librería el ingreso de funciones y operaciones matemáticas.

F. Canal Propuesto

Los modelos son validados en el software Matlab mediante un canal de tres secciones propuesto en SWMM como se muestra en la Fig. 2.

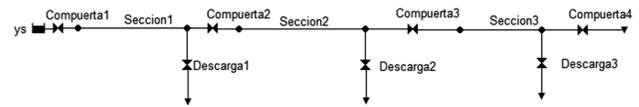


Fig. 2 Canal de tres secciones

Fuente autores

Las condiciones del canal se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones canal de tres secciones

Tanque	Profundidad inicial (m)	10
	Profundidad máxima (m)	15
Compuerta 1,2,3	Altura (m)	0.1
	Ancho (m)	5
	Forma	Rectangular
Descarga 1,2,3	Altura (m)	0.1
	Ancho (m)	1
	Forma	Rectangular
Sección 1,2,3	Profundidad máxima (m)	10
	Longitud (m)	1000
	Forma	Rectangular
Caudal	Sección 1 (m³/s)	6.1828
	Sección 2 (m³/s)	4.6477
	Sección 3 (m³/s)	3.6664

Fuente autores

G. Canal Caso de Estudio

A partir de las simulaciones realizadas y mediante un análisis matemático basado en la correlación, error cuadrático medio, error absoluto medio y los errores acumulados entre los modelos se determina el que presenta un mayor ajuste con respecto al software SWMM y es aplicado al canal propuesto en [14] y trabajado en [15] el cual se describe en Fig. 3.

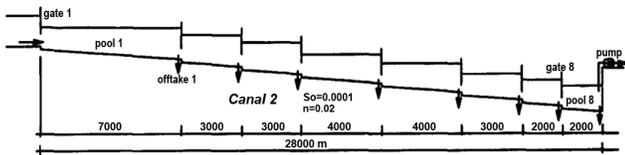


Fig. 3 Canal de ocho secciones, Fuente: Clemmens, A. J., Kacerek, T. F., Grawitz, B., y Schuurmans, W. (1998). Test Cases for Canal Control Algorithms.

Este canal cuenta con dimensiones de longitud, ancho, elevación y flujo de cada sección definidas en [14], en el que se ingresa un caudal total de $11\text{m}^3/\text{s}$. Durante la trayectoria se presentan descargas de $1\text{m}^3/\text{s}$ en cada una de las ocho secciones de este y en consecuencia se obtiene un flujo final de $3\text{m}^3/\text{s}$.

Respecto a la información, se realizan experimentos en el software SWMM y Matlab para calcular las aperturas de las compuertas durante una simulación de 80 horas en estado de equilibrio, evaluando las ecuaciones que rigen el modelo seleccionado para cada sección y teniendo en cuenta la elevación total de 4.4 m, pendiente de 0.0001 y un coeficiente de rugosidad de 0.02.

De acuerdo con las longitudes de cada sección se encuentra la elevación de cada unión, y a partir de la apertura de compuertas y descargas supuestas bajo las condiciones de flujo y dimensiones del artículo, se ingresan las condiciones de Tabla 2 en el software SWMM.

Tabla 2. Condiciones canal ocho secciones

Sección 1	Longitud (m)	7000	Sección 5	Longitud (m)	4000
	Ancho (m)	7		Ancho (m)	6
	Flujo inicial (m^3/s)	11.0237		Flujo inicial (m^3/s)	7.0074
	Unión 1 (m)	2.2524		Unión 9 (m)	2.6230
	Unión 2 (m) Elevación Unión 1(m) Elevación Unión 2(m)	2.6433 4.4 3.2999		Unión 10 (m) Elevación Unión 9(m) Elevación Unión 10(m)	3.0907 1.7285 1.0999
Sección 2	Longitud (m)	3000	Sección 6	Longitud (m)	3000
	Ancho (m)	7		Ancho (m)	5
	Flujo inicial (m^3/s)	10.0141		Flujo inicial (m^3/s)	6.0085
	Unión 3 (m)	2.4653		Unión 11 (m)	2.5905
	Unión 4 (m) Elevación Unión 3 (m) Elevación Unión 4 (m)	2.7223 3.2999 2.8285		Unión 12 (m) Elevación Unión 11(m) Elevación Unión 12(m)	2.9014 1.0999 0.6285
Sección 3	Longitud (m)	3000	Sección 7	Longitud (m)	2000
	Ancho (m)	7		Ancho (m)	5
	Flujo inicial (m^3/s)	9.0090		Flujo inicial (m^3/s)	5.0083
	Unión 5 (m)	2.5005		Unión 13 (m)	2.4792
	Unión 6 (m) Elevación Unión 5(m) Elevación Unión 6(m)	2.8091 2.8285 2.3571		Unión 14 (m) Elevación Unión13(m) Elevación Unión 14(m)	2.7069 0.6285 0.3142
Sección 4	Longitud (m)	4000	Sección 8	Longitud (m)	2000
	Ancho (m)	6		Ancho (m)	5
	Flujo inicial (m^3/s)	8.0077		Flujo inicial (m^3/s)	4.0075
	Unión 7 (m)	2.5092		Unión 15 (m)	2.2633
	Unión 8 (m) Elevación Unión 7(m) Elevación Unión 8(m)	2.8993 2.3571 1.7285		Unión 16 (m) Elevación Unión 15(m) Elevación Unión 16(m)	2.5083 0.3142 0

Fuente autores

Además, en Tabla 3 se presenta el ancho de las compuertas y descargas y la respectiva apertura para cada sección del canal.

Tabla 3. Condiciones compuertas canal ocho secciones

Compuerta	Ancho (m)		Descarga	Ancho (m)	
	Compuerta	Descarga		Compuerta	Descarga
Compuerta 1	Ancho (m)	7	Descarga 1	Ancho (m)	1
	Alto (m)	0.33		Alto (m)	0.2202
Compuerta 2	Ancho (m)	7	Descarga 2	Ancho (m)	1
	Alto (m)	1.1755		Alto (m)	0.2158
Compuerta 3	Ancho (m)	7	Descarga 3	Ancho (m)	1
	Alto (m)	0.9488		Alto (m)	0.2117
Compuerta 4	Ancho (m)	6	Descarga 4	Ancho (m)	1
	Alto (m)	0.8462		Alto (m)	0.2079
Compuerta 5	Ancho (m)	6	Descarga 5	Ancho (m)	1
	Alto (m)	0.7796		Alto (m)	0.2005
Compuerta 6	Ancho (m)	5	Descarga 6	Ancho (m)	1
	Alto (m)	0.59		Alto (m)	0.2076
Compuerta 7	Ancho (m)	5	Descarga 7	Ancho (m)	1
	Alto (m)	0.5352		Alto (m)	0.2155
Compuerta 8	Ancho (m)	5	Descarga 8	Ancho (m)	1
	Alto (m)	0.4178		Alto (m)	0.2246

Fuente autores

Resultados

Se propone un escenario donde las alturas de las compuertas varían como se muestra en Tabla 4 con el fin de observar y comparar las dinámicas del agua para los modelos aproximados.

Tabla 4. Variaciones canal tres secciones

Time(h)	Variación de las compuertas y descargas								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
	Variación (m)								
Comp.1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Comp.2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Comp.3	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Comp.4	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Desc. 1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
Desc. 2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Desc. 3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2

Comp. hace referencia a la compuerta y Desc. a la descarga.

Fuente autores

A. Simulaciones

De acuerdo con las variaciones realizadas, se presentan las simulaciones para cada modelo en un tiempo de 80 horas.

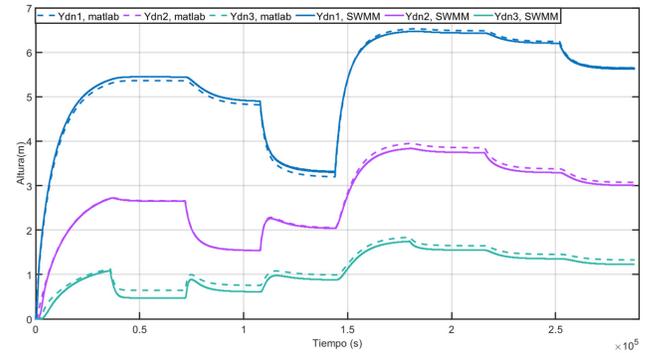


Fig. 4 Simulación Integrator Delay

Fuente autores

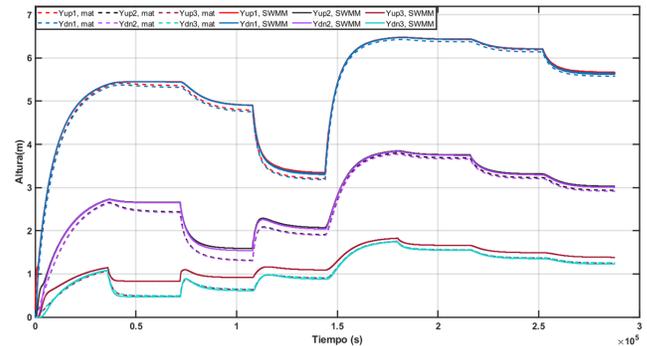


Fig. 5 Simulación Integrator Delay Zero

Fuente autores

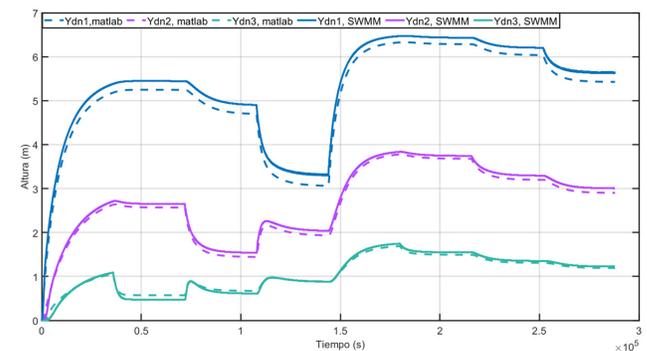


Fig. 6 Simulación Muskingum

Fuente autores

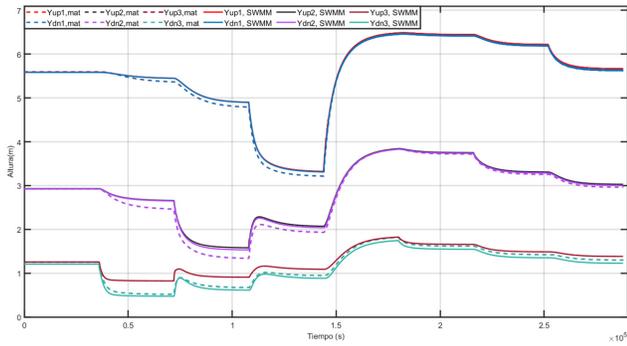


Fig. 7 Simulación First Approximation
Fuente autores

Como se observa en las Fig. 4, 5, 6 y 7, la línea punteada representa la simulación en Matlab de cada uno de los modelos para los niveles y_{upi} y y_{dni} , y la línea continua es la simulación en SWMM.

A pesar de que los modelos ID y Muskingum no presentan dinámicas en la parte alta de la sección del canal, se resalta que el modelo ID aparentemente tiene el mejor ajuste en y_{dn2} , no obstante, First Approximation e ID muestran dinámicas similares respecto al modelo de tres canales propuesto en SWMM. Con el fin de verificar el ajuste de los modelos se realiza un análisis matemático para determinar qué modelo tiene un mejor ajuste respecto al modelo fundamental y aplicarlo al caso de estudio.

B. Correlación de los modelos

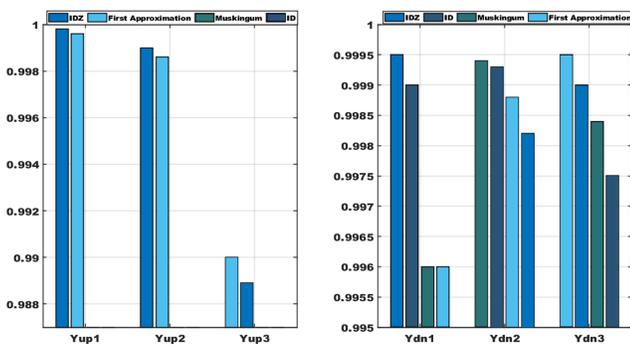


Fig. 8 : Correlación de modelos a) y_{upi} b) y_{dni}
Fuente: autores

Para la simulación en el canal propuesto de tres secciones en SWMM de los modelos aproximados, existe una relación lineal fuerte. No obstante, aplicar los modelos ID y Muskingum al caso de estudio no resulta conveniente debido a la correlación de 0

que presentan en el nivel y_{upi} . Además, estos dos modelos requieren de información extrínseca como: caudales de entrada, salida y descarga para su simulación y sus dinámicas no tienen en cuenta el nivel y_{upi} .

Por el contrario, los resultados de los modelos First Approximation e IDZ, presentan correlaciones no menores a 0.99 para y_{upi} y y_{dni} respecto al modelo fundamental, donde la relación lineal con tendencia positiva indica que, si el nivel de agua en el modelo fundamental aumenta, en el modelo aproximado aumentará de la misma manera.

C. Error cuadrático medio y Error absoluto medio

En el análisis de los modelos se tuvo en cuenta el tiempo en que las compuertas 1, 2, 3, y 4 incrementaron en 0.1 m la apertura para la hora: 40, 30, 20 y 10 respectivamente, ya que dichas variaciones representaron un cambio considerable en las dinámicas de los modelos aproximados en una simulación de 80 horas como se muestra en la Fig. 9 y en la Fig. 10.

En comparación a los niveles de agua en la parte alta (y_{upi}), la hora 10 presenta un cambio notable en las partes bajas de las secciones del canal (y_{dni}). En esta hora se aprecia un ajuste muy cercano de y_{dn2} en los modelos con relación al modelo fundamental, en especial el modelo First Approximation e ID. No obstante, su error aumenta para la tercera sección del canal, es decir, y_{dn3} . En la hora 30 y 40 a razón de las variaciones de compuertas, la susceptibilidad aumenta en los modelos, donde se resalta el modelo IDZ como el más afectado por las variaciones del sistema.

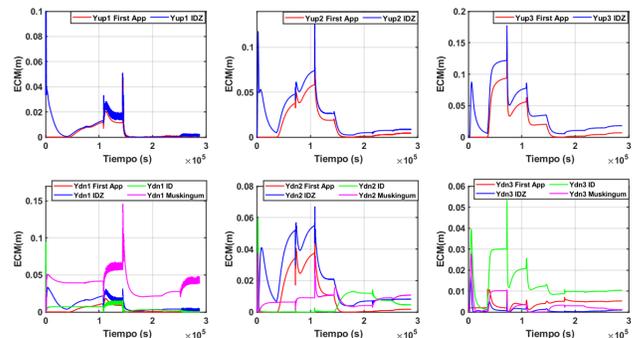


Fig. 9: Error cuadrático medio a) y_{up1} b) y_{up2} c) y_{up3} d) y_{dn1} e) y_{dn2} f) y_{dn3} .
Fuente: autores

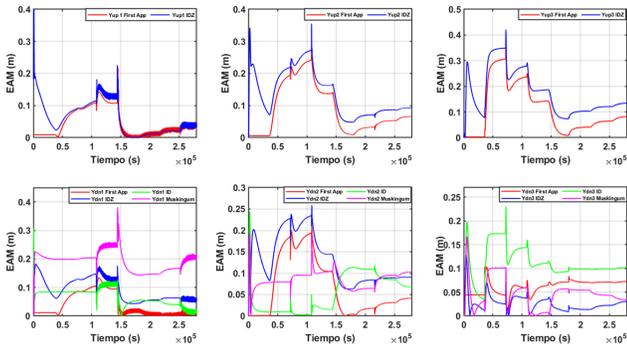


Fig. 10: Error absoluto medio a) y_{up1} b) y_{up2} c) y_{up3} d) y_{dn1} e) y_{dn2} f) y_{dn3} .

Fuente: autores

Con base en el error absoluto medio, el aumento de la apertura en las compuertas 3 y 4 no influencia notoriamente las dinámicas para y_{up1} en comparación a y_{up2} y y_{up3} . A las 10 horas de simulación el modelo First Approximation tiene la mejor respuesta y para la hora 10 y 20 donde varían las compuertas 4 y 3 respectivamente el modelo ID se ajusta más al modelo fundamental en y_{dn2} .

D. Error cuadrático medio acumulado y Error absoluto medio acumulado

De acuerdo con los resultados obtenidos del error cuadrático y absoluto medio para los modelos aproximados, se considera al modelo First Approximation como el más adecuado, por otra parte, debido al error que este presenta en el nivel y_{dn3} y al ajuste que el modelo ID muestra en y_{dn2} se calcula el error cuadrático y absoluto medio acumulado como se observa en Fig. 11.

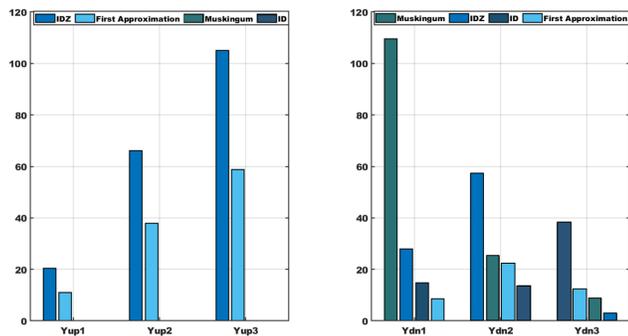


Fig. 11: Error cuadrático medio acumulado a) y_{upi} b) y_{dni}

Fuente: autores

El error cuadrático medio acumulado, evidencia que First Approximation presenta un mejor ajuste

en los niveles de la parte alta del canal con valores de: 10.923 m, 37.826 m, 58.868 para y_{up1} , y_{up2} y y_{up3} respetivamente y el nivel y_{dn1} , con 8.521 m de error, además, el modelo ID acumula un menor error en el nivel y_{dn2} con un valor de 25.167 m. Cabe resaltar que a pesar de que en y_{dn3} el modelo First Approximation no es el que acumula el menor error, muestra un bajo nivel respecto a las tres secciones del canal presentando así un mejor ajuste durante la simulación de 80 horas.

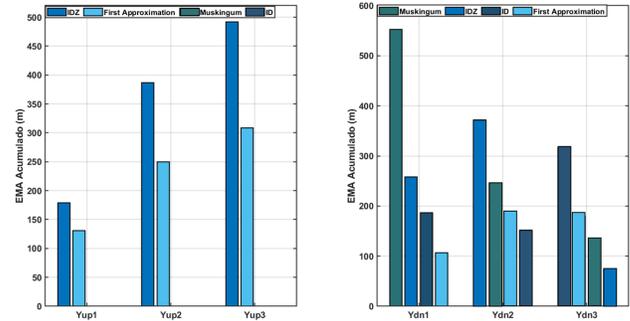


Fig. 12: Error absoluto medio acumulado a) y_{upi} b) y_{dni}

Fuente: autores

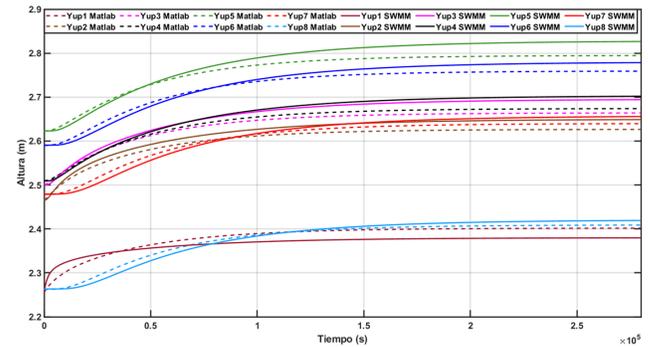


Fig. 13 Validación First Approximation en caso de estudio

Fuente: autores

Asimismo, el error absoluto medio acumulado muestra un comportamiento similar en las dinámicas del canal para el modelo First Approximation con valores de: 130.645 m, 250.076 m, 308.811 m, 107.175 m y 189.789 m para y_{up1} , y_{up2} , y_{up3} , y_{dn1} y y_{dn2} , respectivamente por lo que el modelo se valida en el caso de estudio.

E. Caso de estudio

La simulación del modelo First Approximation en el canal de ocho secciones el cual considera una pendiente de 0.0001 y una elevación de 4.4 m se presenta en Fig.13

El modelo presenta un ajuste aproximado en las dinámicas de la parte alta de las secciones del canal, donde el mayor error se da en y_{up5} con un valor de $0.0315 m$ entre el modelo fundamental y el aproximado, y el menor error se da en y_{up8} con $0.0101 m$, siendo un error aceptable debido a que las dinámicas son similares a las del software SWMM. Sin embargo, en la simulación del modelo en los niveles de la parte baja de las secciones del canal, aumenta el error entre el modelo fundamental y el aproximado, es decir, no se aproxima con precisión las dinámicas del agua, donde el error mínimo es de $0.2533 m$ y máximo de $0.5691 m$ lo cual representa una diferencia considerable entre las distancias de los modelos.

El modelo First Approximation inicialmente simulado en el canal propuesto de tres secciones, tiene un ajuste preciso al modelo fundamental para los niveles y_{dni} debido a la inclinación despreciable del canal, no obstante, al aplicarlo al caso de estudio el cual tiene una pendiente de $0.0001 m$ y una elevación de $4.4 m$, el ajuste disminuye en los niveles de la parte baja de las secciones del canal. Por lo que se puede inferir que el modelo no considera la inclinación de manera explícita (ya que este mediante I_i considera implícitamente una posible elevación con la diferencia de potenciales), lo cual se representa en el aumento del error de la parte bajas de las secciones del canal.

Conclusiones

Con base en el error cuadrático medio acumulado y error absoluto medio acumulado de las simulaciones del canal propuesto de tres secciones el modelo First Approximation resultó ser el más adecuado en comparación a los otros. Sin embargo, al aplicar el modelo al canal de ochos secciones, la precisión en los valores de y_{dni} disminuyó ya que no considera la pendiente del canal. Esto no resulta ser eficiente para para el diseño de control automático ya que generalmente simulaciones los sistemas de riego a canal abierto cuentan con inclinaciones dependiendo de la topografía de la zona determinada.

En la validación de los modelos aproximados, se evidenció que los modelos Integrator Delay y Muskingum, no tienen en cuenta el nivel en la

parte alta de las secciones del canal y necesitan de información extrínseca como son los flujos de entrada, salida y descarga, por lo tanto, sus dinámicas no se pueden inferir a partir de la solución numérica de las ecuaciones diferenciales de cada modelo. Debido a esto fueron descartados para su aplicación en el canal de ocho secciones, no obstante, cabe resaltar que estos modelos presentan un buen ajuste para ser usados en diseño de control automático en canales

Considerando el desajuste que presento el modelo First Approximation en y_{dni} cuando el canal presenta pendientes, se está trabajando una mejora del modelo, basado en la diferencia de potenciales, el cual ha presentado un mejor ajuste a las dinámicas de agua de un canal con pendientes. Por lo que se determina que es posible continuar ampliando la investigación y desarrollo de modelos que se aproximen de manera precisa al modelo fundamental de Saint-Venant para así poder diseñar e implementar controles automáticos en sistemas de riego a canal abierto más precisos.

Agradecimientos— Los autores agradecen a la Universidad Central y al proyecto “DESARROLLO DE METODOLOGÍA PARA EL MODELO Y DISEÑOS DE SISTEMAS DE CONTROL DEL RECURSO HIDRICO EN SISTEMAS ABIERTOS DE CANAL DE RIEGO” por el financiamiento y apoyo para realizar esta investigación.

Referencias

- [1] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO, (2005) *Agricultura y Dialogo de Culturas*. Roma, Italia.
- [2] Organización de las Naciones Unidad ONU, (2019). *Perspectivas de la Población Mundial 2019*, from. <https://population.un.org/wpp/>.
- [3] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, (2018). Reporte de avance del Estudio Nacional del Agua 2018, Colombia.
- [4] Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, (2017). *Producción agropecuaria en los grandes Distritos de riego de Colombia ha sido improvisada: IGAC*, from. <https://igac.gov.co/noticias/produccion-agropecuaria-en-los>

- grandes-districtos-de-riego-de-colombia-ha-sido-improvisada.
- [5] Pedroza, E. y Hinojosa, G. (2014). *Manejo y distribución del agua en distritos de riego. Breve introducción didáctica*. México.
- [6] Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994). *Applied Hydrology*, Ed. McGraw-Hill Interamericana S.A.
- [7] Rijo, M. y Arranja, C. (2010). *Supervision and Water Depth Automatic Control of an Irrigation Canal*, *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 136, no. 1, pp. 3–10, Jan.
- [8] Nguyen, L. D., Prodan, I., Lefevre, L. y Genon-Catalot, D. (2017). *Distributed Model Predictive Control of Irrigation Systems using Cooperative Controllers*, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 6564–6569, Jul.
- [9] Horváth, K., Galvis, E., Gómez, M. y Rodellar, J. (2015) *New offset-free method for model predictive control of open channels*, *Control Eng. Pract.*, vol. 41, pp. 13–25.
- [10] Horváth, K. (2013). *Model Predictive Control of Resonance Sensitive Irrigation Canals*, University Of Catalonia Barcelona Tech.
- [11] Bolea, Y., Puig, V., y Grau, A. (2014). "Discussion on Muskingum versus integrator-delay models for control objectives," *J. Appl. Math.*
- [12] Overloop, P. J., Clemmens, A. J., Strand, R. J., Wagemaker, R. M. J., y Bautista, E. (2010). *Real-time implementation of model predictive control on maricopa-stanfield irrigation and drainage District's WM canal*, *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 136, no. 11, pp. 747–756.
- [13] Segovia, P., Rajaoarisoa, L., Nejjari, F., Puig, V. y Duviella, E. (2017). *Decentralized control of inland navigation networks with tributaries: application to navigation canals in the north of France*, in *proceedings of the 2015 American Control Conference (ACC)*, May.
- [14] Clemmens, A. J., Kacerek, T. F., Grawitz, B., y Schuurmans, W. (1998). *Test Cases for Canal Control Algorithms*, *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 124, February, pp. 23–30, 1998.
- [15] Clemmens, A. J., Tian, X., Overloop, P. J., y Litrico, X. (2017). *Integrator delay zero model for design of upstream water-level controllers*, *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 143, no. 3.
- [16] Schuurmans, J. (1997). *Control of Water Levels in Open-Channels*, Delft University of Technology.
- [17] Litrico, X., Malaterre, P. O., Baume, J. P., Vion, P.-I. y Ribot-Bruno, J. (2007). *Automatic tuning of PI controllers for an irrigation canal pool*, *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 133, no. 1, pp. 27–37.
- [18] Overloop, P. J., Miltenburg, I. J., Bombois, X., Clemmens, A. J., Strand, R. J., Giesen, N. C. y Hut, R. (2010) *Identification of resonance waves in open water channels*, *Control Eng. Pract.*, vol. 18, no. 8, pp. 863–872.
- [19] Litrico, X. y Fromion, V. (2004). *Simplified Modeling of Irrigation Canals for Controller Design*, *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. Volume 130, no. Issue 5, p. Pages 373-383.
- [20] Gerald T McCarthy. (1939) *The unit hydrograph and flood routing*. U.S. Engineer Office, Providence, R.I..
- [21] Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill Book Company INC.
- [22] Gill, M. A. (1978). *Flood routing by the Muskingum method*, *J. Hydrol.*, vol. 36, no. 3–4, pp. 353–363, Feb. 1978.
- [23] Das, A. (2004). *Parameter Estimation for Muskingum Models*, *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 130, no. 2, pp. 140–147, Apr.
- [24] Cunge, J. A. (1969). *On The Subject Of A Flood Propagation Computation Method (Muskingum Method)*, *J. Hydraul. Res.*, vol. 7, no. 2, pp. 205–230, Jan.
- [25] Conde, G. J., Quijano, N. y Ocampo, C. (2019), *Modeling and Control of Interacting Irrigation Channel*, *IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control*. Colombia, Medellín.
- [26] United States Environmental Protection Agency EPA. (s.f). *Storm Water Management Model (SWMM)*. from. <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm#tab-3>.