

Protección marginal con espigones, simulación numérica 1D

Riverbank protection with groynes, numerical simulation 1D

Fabián Rivera-Trejo¹

Ayuxi Hernández-Cruz²

¹Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa, Tabasco, México, jose.rivera@ujat.mx, ORCID: 0000-0002-6722-0863

²Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa, Tabasco, México, anhc@hotmail.com

Autor para correspondencia: Fabián Rivera-Trejo, jose.rivera@ujat.mx

Resumen

Las protecciones marginales son esenciales cuando se realizan obras de encauzamiento o redirección del flujo en ríos. Pronosticar su adecuado funcionamiento es responsabilidad de los diseñadores y organismos encargados de salvaguardar la seguridad de la población aledaña a los

misimos. La simulación numérica es una de las herramientas que permiten realizar tales pronósticos. En este trabajo se empleó el *software HEC-RAS 1D* con el objetivo de evaluar su capacidad para reproducir de manera adecuada el funcionamiento hidráulico de una protección marginal con base en siete espigones. El modelo numérico fue calibrado con mediciones experimentales realizadas en un modelo físico reducido, escala 1:40. Se probaron tres formas de ingresar la geometría de los espigones: a) como una barrera, con dimensiones de altura, ancho y longitud promedio; b) como un conjunto de obstrucciones escalonadas, y c) como parte del terreno natural. La barrera fue la geometría óptima. Los resultados, obtenidos numéricamente, reprodujeron de modo satisfactorio los efectos medidos en el modelo físico. A partir de esta calibración, se probaron alternativas de solución, encontrando que un arreglo de cuatro espigones combinados con recubrimiento marginal podría tener el mismo efecto que los siete espigones, pero con un menor volumen de obra. Aunque el fenómeno en estudio evidentemente presenta características 2D, la clave en la modelación numérica 1D está en la calidad de los datos con lo que se calibra. Además, los modelos 1D son más rápidos y presentan menos inestabilidades que los modelos 2D y 3D, lo que permite analizar diferentes condiciones de diseño en menor tiempo.

Palabras clave: *HEC-RAS*, protección marginal, modelos físicos.

Abstract

Riverbank protections are essential when carrying out river channeling or redirection works. Predicting its proper functioning is the responsibility of the designers and agencies in charge of safeguarding the safety of the population surrounding them. The numerical simulation is one of the tools that allow these forecasts to be made. In this work, we used *HEC-RAS 1D* to evaluate its capacity to reproduce adequately the hydraulic behavior of riverbank protection based on seven groynes. The numerical model was calibrated with experimental measurements made in a reduced physical model, 1:40 scale. Three ways to enter the geometry of the groins were tested: a) as a barrier, with dimensions of height, width, and average length; b) as a set of stepped obstructions, and c) as part of the natural terrain. The barrier was the optimal geometry. The numerical results reproduced satisfactorily the effects measured in the physical model. From this calibration, solution alternatives were tested, finding that an arrangement of four combined groynes with bank revetment could have the same effect as the seven groins but with a smaller volume of work. Although the phenomenon under study presents 2D characteristics, the key in numerical modeling 1D is in the quality of the data with which it is calibrated. In addition, the 1D models are faster and have fewer instabilities than the 2D and 3D models, which allows analyzing different design conditions in less time.

Keywords: *HEC-RAS*, riverbank protections, physical models.

Recibido: 14/01/2015

Aceptado: 31/04/2019

Introducción

La protección marginal contra la erosión en ríos es una componente esencial y costosa en los sistemas de protección contra inundaciones. Entre las más comunes se encuentran los recubrimientos, diques marginales y espigones; el objetivo de estas obras es redireccionar el flujo de tal manera que se evite el contacto entre el flujo con alta velocidad y el material que conforma las márgenes del cauce (Nguyen, Vo, & Gourbesville, 2018; Qin, Zhong, Wu, & Wu, 2017; Sukhodolov, 2014). En el caso particular de los espigones, son estructuras colocadas dentro del cauce, colocadas de manera perpendicular o bien con cierto ángulo de inclinación respecto a la margen. Su propósito es redirigir y alejar las líneas de corriente que inciden en la margen, evitando así problemas de erosión y arrastre de material. Existen estudios que reportan el funcionamiento hidráulico de los espigones, desde simulaciones numéricas (Mawandha, Wignyosukarto, & Jayadi, 2018; McCoy, Constantinescu, & Weber, 2007a; McCoy, Constantinescu, & Weber, 2008) hasta estudios de laboratorio (Kang, Yeo, Kim, & Ji, 2011; Weitbrecht, Socolofsky, & Jirka, 2008; Zhang *et al.*, 2017). En su

mayoría, estos trabajos se limitan a estudiar espigones que emergen de la superficie libre del agua y están colocados de forma perpendicular a la margen; siendo los espigones sumergidos y los orientados a un cierto ángulo con la orilla los menos estudiados (McCoy, McCoy, Constantinescu, & Weber, 2007b; Jiménez-León, Mendiola-Lizárraga, Rivera-Trejo, Nungaray-Núñez, & Díaz-Arcos, 2017). Hoy día, un sinnúmero de estas estructuras se han construido usando sólo el buen juicio y la experiencia del constructor en lugar de seguir alguna norma o criterio específico (Minor, Rennie, & Townsend, 2007). En México, como en muchos países de Latinoamérica, la principal referencia en la que se basan la mayoría de los diseños de protecciones marginales es el *Manual de ingeniería de ríos*, elaborado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (Maza-Alvarez, García-Flores, & Olvera-Salgado, 1996); sin embargo, dado que cada corriente natural presenta condiciones hidráulicas que la hacen única, prevalece la necesidad de estudiar el dimensionamiento, espaciamiento y orientación óptima de espigones para cada caso en particular. En este trabajo se simuló numéricamente en *HEC-RAS* (Brunner, 2016) un arreglo de siete espigones orientados con cierto ángulo respecto a la margen, y que tienen una parte sumergida y otra que emerge del cauce. En su diseño se siguió la metodología propuesta por Maza-Alvarez, García-Flores y Olvera-Salgado (1996), y su funcionamiento hidráulico fue analizado por medio de un modelo físico reducido. El análisis en modelos físicos es costoso y, salvo algunas excepciones, lo más común es hacer simulación numérica. Sin embargo, la simulación numérica no es tarea sencilla e involucra experiencia no sólo en el análisis e

interpretación de los resultados, sino también en la manera de introducir los datos y proponer las condiciones de frontera. Debido a que en la modelación numérica no existe una regla sobre la forma de modelar geoméricamente los espigones, en este trabajo se probaron tres alternativas: 1) como una barrera; 2) como un conjunto de obstrucciones escalonadas, y 3) como terreno natural. Se encontró que los perfiles hidráulicos generados por las tres opciones de espigón presentaban un comportamiento similar al medido en el modelo físico reducido. Por lo tanto, se decidió modelar el espigón como una barrera debido a que su ingreso al modelo requiere menos tiempo y esfuerzo. Por último, a partir de simulaciones numéricas se analizaron alternativas que tuvieran el mismo funcionamiento hidráulico del arreglo propuesto de siete espigones, pero que redujeran de modo sustancial el número de los mismos. Los resultados obtenidos fueron una protección marginal con base en recubrimiento y cuatro espigones.

Por su parte, los modelos computacionales desarrollados para estudiar el comportamiento hidráulico de un cauce o un diseño en particular varían por la complejidad de su algoritmo computacional, su grado de sofisticación y confiabilidad. Los distintos modelos se definen como modelos de una (1D), dos (2D) o tres (3D) dimensiones. Los modelos 1D consideran que la componente principal del perfil de velocidades es a lo largo del eje de coordenadas x ; por lo tanto, a diferencia de los modelos bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D), se desprecian las componentes de velocidad en los ejes de coordenadas y y z . Estos modelos consideran la elevación promedio de la superficie de agua en la dirección y y z ; son de gran popularidad, pues son menos

exigentes computacionalmente (Rau-Lavado, 2007), y requieren menor cantidad de información para compilar que los modelos 2D y 3D. Estas características les han dado un uso extendido por encima de modelos más complejos. Ejemplos de modelos 1D son: *HEC-RAS* (Brunner, 2016), *Mike11* (DHI, 2016) e *Iber* (Bladé *et al.*, 2014), entre otros. En este trabajo se empleó el *software HEC-RAS*, el cual es un programa de acceso libre, desarrollado y actualizado de forma constante por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de EUA. Presenta un entorno intuitivo, por lo que los datos son fáciles de editar, modificar y visualizar en pantalla. Aunque *HEC-RAS* tiene la posibilidad de considerar transporte de sedimentos, no se usó debido a que el modelo físico no lo reproducía. *HEC-RAS* es un programa validado en Norteamérica, México, y muchos países de Latinoamérica y el mundo. En México es requerido por dependencias gubernamentales del ámbito federal, estatal y municipal para realizar la modelación hidráulica de cauces abiertos, ríos y canales artificiales.

Materiales y métodos

Caso de estudio

Con la intención de proteger a la ciudad de Villahermosa, Tabasco, contra inundaciones (Rivera-Trejo, Soto-Cortés, & Barajas-Fernández, 2009), en el año 2010 se propuso construir una serie de canales derivadores sobre los principales ríos que escurren hacia la ciudad. El objetivo fue disminuir el caudal de estos ríos y reducir el riesgo de desbordamiento e inundación en la ciudad ubicada aguas debajo de los mismos. Los canales derivadores son aberturas que se realizan en los ríos con el objetivo de desviar parte de su caudal hacia otro lugar. En el caso de Villahermosa, los canales derivadores dirigen el flujo hacia zonas de regulación natural. Para maximizar el caudal derivado, estas obras por lo general se ponen en curvas de ríos. Esto deja a las márgenes susceptibles a la erosión, por lo que deben protegerse.

El caso analizado considera una protección marginal ubicada aguas abajo del canal derivador Sabanillas, localizado en el municipio de Centro, Villahermosa, Tabasco, coordenadas 512627 E, 1979777 N. La protección consiste en un arreglo de siete espigones de roca tal y como se muestra en la Figura 1.

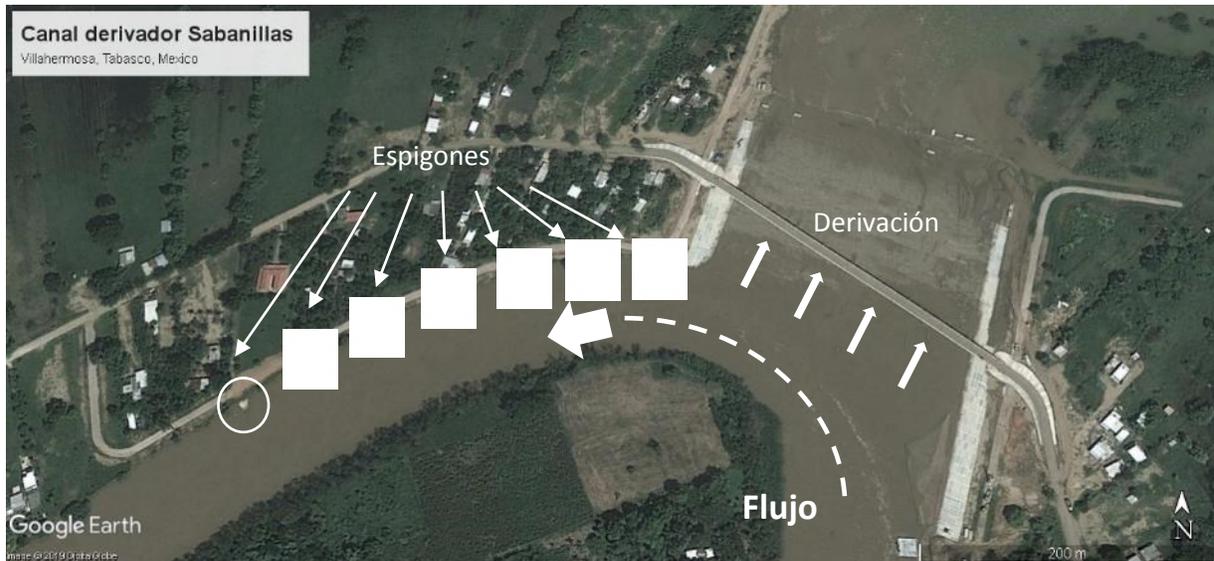


Figura 1. Canal derivador Sabanillas, municipio de Centro, Villahermosa, Tabasco, con protección marginal en su margen derecha con base en siete espigones de roca.

Modelo físico reducido

Con la finalidad de determinar el funcionamiento hidráulico de la estructura derivadora, se construyó un modelo físico reducido Esc 1:40 (Figura 2). En el modelo se midieron de forma experimental: a) los niveles de agua sobre la curva y el canal; b) el caudal derivado.



Figura 2. Prototipo y modelo físico de la estructura derivadora Sabanillas, municipio de Centro, Villahermosa, Tabasco.

El modelo físico se instrumentó con medidores dinámicos de nivel distribuidos a lo largo de la curva del río y el canal (Figura 3a). El caudal derivado (Figura 3b) fue medido por medio de vertedores triangulares; mientras que las velocidades en el canal se midieron con una micropropela de baja velocidad (Figura 3c). La topografía fue calibrada con el auxilio de un perfilador topográfico marca Wallingford, con una tolerancia de 0.001 m (Figura 3d). La instrumentación del modelo físico y la calidad de los datos permitieron lograr una buena calibración del modelo numérico.

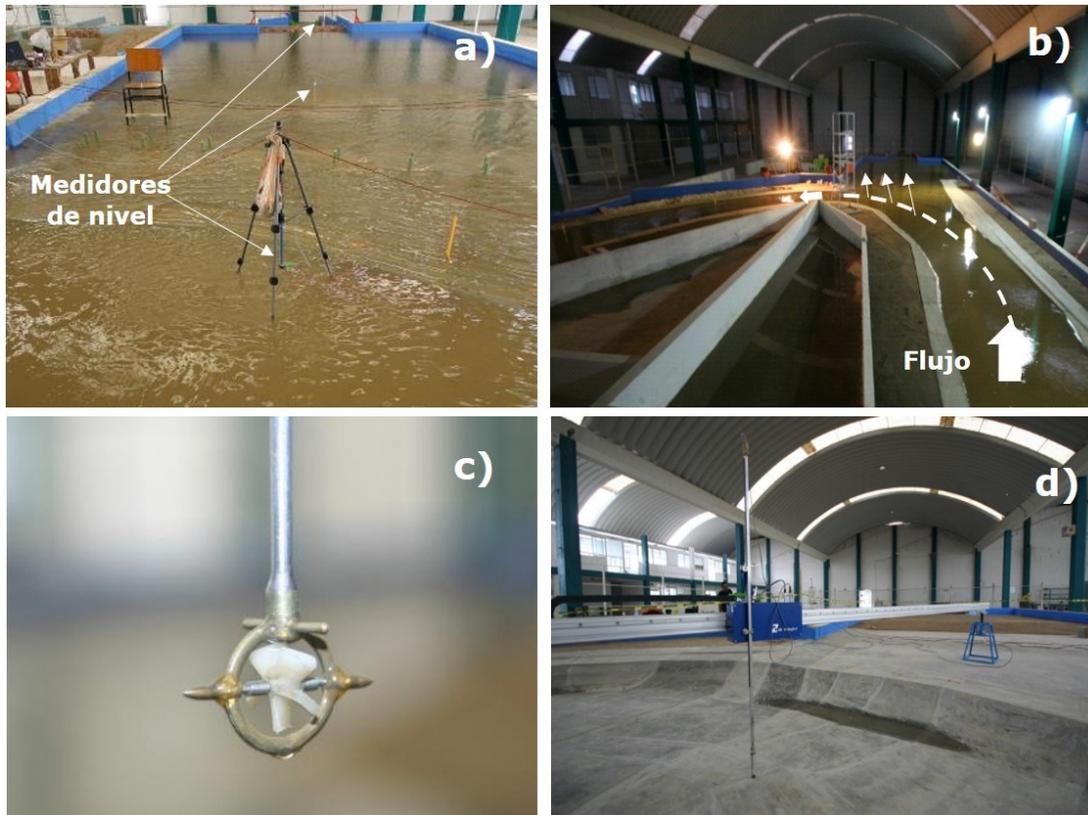


Figura 3. Medición de niveles: a) detalle del medidor de nivel; b) detalle de canal derivador; c) microprolela de baja velocidad; d) perfilador topográfico.

En el modelo experimental se estudiaron: a) los efectos que tendría un solo espigón ubicado sobre la margen derecha del río donde termina el canal derivador; b) el arreglo de siete espigones distribuidos a lo largo de la margen derecha. Ambos experimentos fueron simulados numéricamente y los valores medidos se usaron con fines de calibración del modelo.

Modelación numérica

El primer paso en la simulación numérica fue determinar la forma de ingresar la geometría de los espigones al modelo. Esto debido a que es posible hacerlo de varias maneras y cada una de ellas difiere en el grado de complejidad. Los elementos físicos y las variables geométricas que se emplean para caracterizar a los espigones se muestran en la Figura 4.

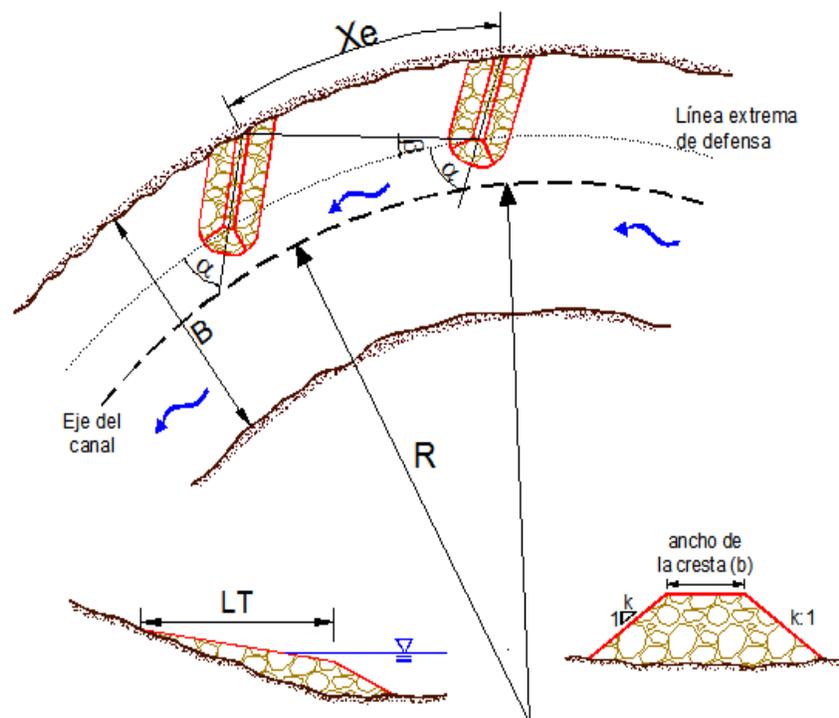


Figura 4. Características físicas de un espigón.

Donde X_e es la separación entre espigones; B , el ancho del río; R , radio de curvatura; LT , longitud de trabajo; k , talud; φ , ángulo de orientación, y β es ángulo de expansión.

Se consideraron tres alternativas para el análisis. La primera consideró ingresar la geometría del espigón como una barrera (Figura 5a). La longitud fue la equivalente a la longitud de trabajo más la mitad de la longitud de la punta del espigón; la altura se definió como la elevación al final de la longitud de trabajo más la mitad de la altura de la longitud de trabajo. La segunda consideró al espigón como un conjunto de obstrucciones escalonadas (Figura 5b), con una obstrucción inicial en el fondo y obstrucciones escalonadas alrededor de la primera. El ancho de cresta propuesto originalmente en los espigones, fue el equivalente a la longitud de trabajo, y la altura se definió como la elevación al final de la longitud de trabajo más la mitad de la altura. El resto de las obstrucciones fueron distribuidas de tal manera que cubrieran la superficie del espigón original. La tercera opción fue modelar al espigón como parte del terreno natural (Figura 5c). Se modificó la configuración topográfica del terreno y se generó un modelo digital del terreno (MDT). La construcción del MDT se llevó a cabo a partir de datos topográficos recolectados en campo.

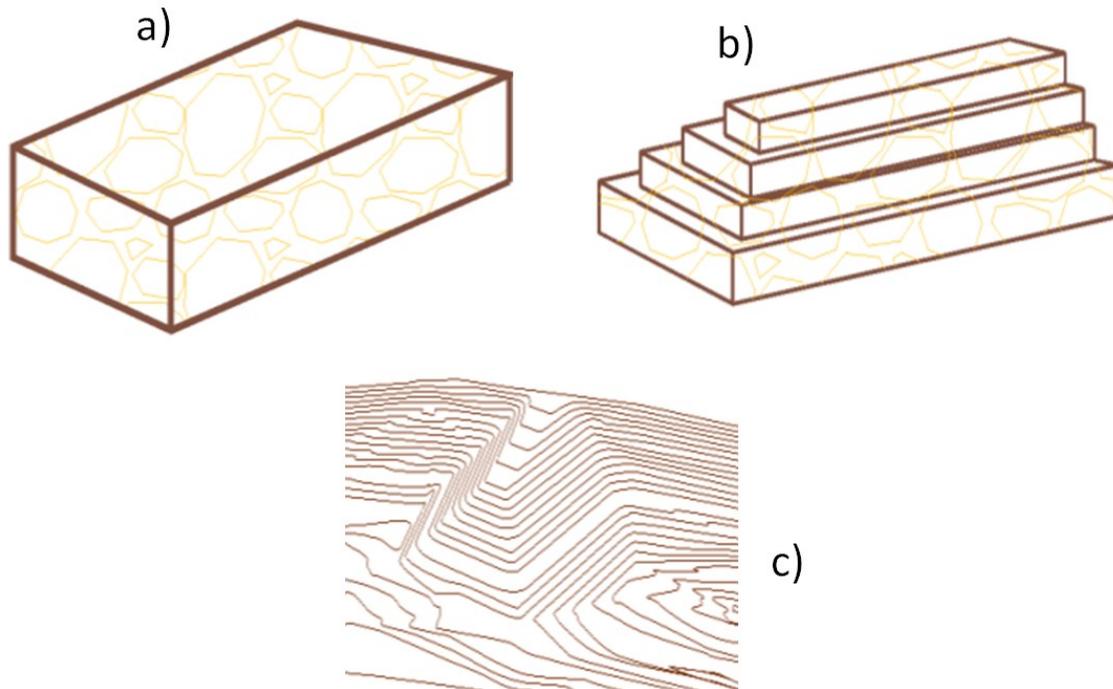


Figura 5. a) Espigón modelado como una barrera; b) espigón modelado como obstrucciones escalonadas; c) espigón modelado como parte del terreno natural.

Calibración

El modelo numérico fue calibrado con los caudales de entrada y salida medidos en el modelo físico, el caudal derivado y los niveles de la superficie libre del agua medidos en seis puntos de sondeo h_0-h_6 (Figura 6). Se varió el coeficiente de rugosidad hasta que los resultados de la

modelación numérica reprodujeran de forma aceptable los resultados medidos de manera experimental en el modelo físico.

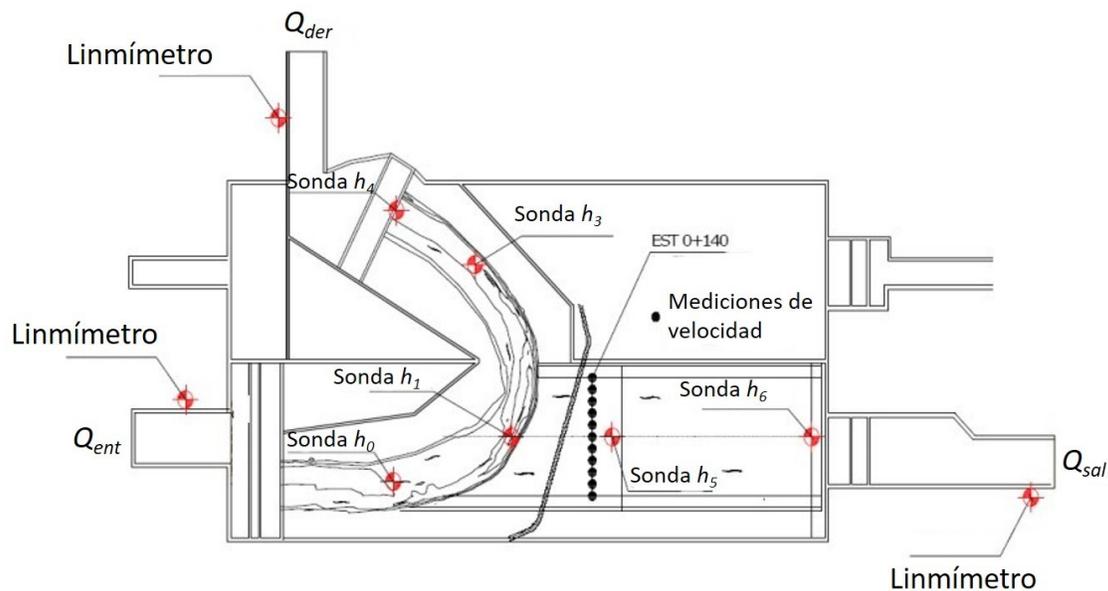


Figura 6. Variables monitoreadas en el modelo físico reducido: Q_{ent} , caudal de entrada; Q_{sal} , caudal de salida; Q_{der} , caudal derivado; h_0 - h_6 , ubicación de medidores dinámicos de nivel.

Una vez calibrado el modelo, se analizaron las diferencias de los niveles de la superficie libre del agua medido experimentalmente contra los simulados con las opciones de geometría propuestas (barrera, escalones y terreno natural); así como el perfil hidráulico resultante.

Elegida la manera óptima de ingresar la geometría de los espigones, se procedió a ingresar el arreglo de los siete espigones

(Figura 7), y se comparó su funcionamiento medido de modo experimental contra el simulado de forma numérica.

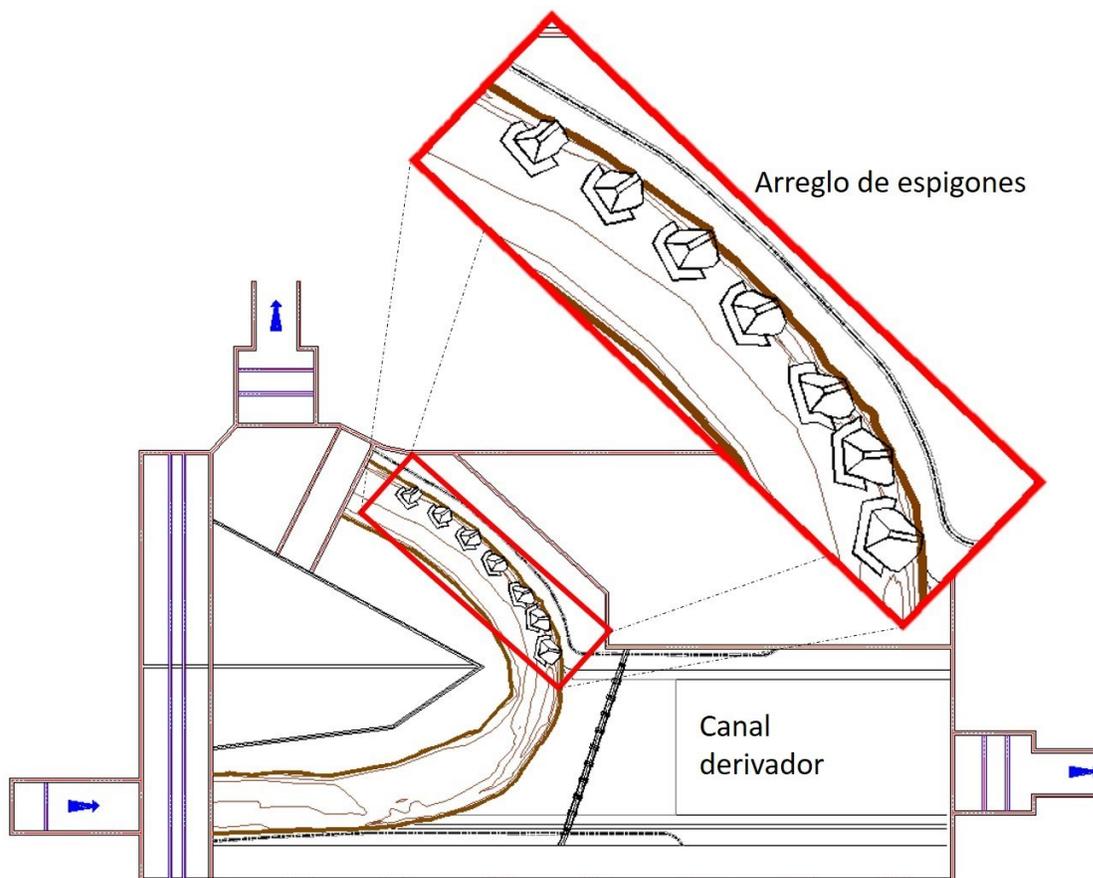


Figura 7. Arreglo de siete espigones.

Propuesta alterna al arreglo de espigones

Además, a la comprobación de la simulación numérica del arreglo de espigones, se decidió aplicar el modelo numérico con fines de diseño. Por lo tanto, se revisaron los criterios de diseño de espigones considerados en el *Manual de ingeniería de ríos* (Maza-Alvarez et al., 1996), en cuanto a: el ángulo de expansión y de orientación, la separación entre espigones y la longitud de trabajo de los mismos, etcétera. El objetivo fue evaluar la posibilidad de algún otro tipo obra de protección, que tuviera el mismo efecto, pero pudiera reducir el volumen de obra. Las opciones propuestas fueron: a) la colocación de un recubrimiento marginal (Figura 8a), y b) combinación de recubrimiento marginal, con un arreglo menor de espigones (Figura 8b). Ambas alternativas se modelaron en *HEC-RAS* y se obtuvieron los perfiles hidráulicos, al igual que las curvas de funcionamiento del canal derivador.

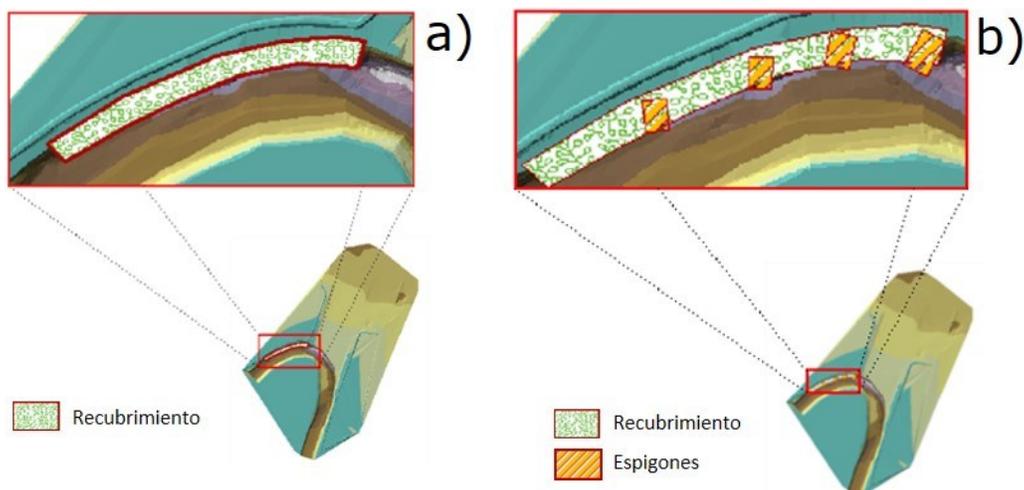


Figura 8. a) Recubrimiento marginal; b) recubrimiento marginal y espigones.

Resultados

Modelación en condiciones naturales

En la Tabla 1 se muestran los valores de la n de Manning propuestos, los resultados numéricos obtenidos y el valor medido de forma experimental, y que reproduce las condiciones naturales.

Tabla 1. Calibración de coeficiente de rugosidad de Manning.

Coeficiente de rugosidad n	Gasto m^3/s	LA (msnm)
0.025	1 305	6.63
0.024	1 357	6.61
0.023	1 417	6.61
0.023 y 0.0226 en la última estación aguas abajo	1 438	6.59

Medición en modelo físico	1 450	6.60
---------------------------	--------------	-------------

Por lo tanto, en la curva se empleó el coeficiente de Manning (n) de 0.023 y en la sección aguas abajo 0.0226. Además, debido a que tanto la curva como el canal de derivación fueron construidos con el mismo material, en el canal también se empleó un coeficiente de Manning de 0.023.

Modelación numérica del tipo de geometría de los espigones

Se compararon los perfiles hidráulicos medidos en el modelo físico contra las simulaciones numéricas con las distintas maneras de ingresar la geometría de los espigones. En la Tabla 2 se muestran los niveles medidos experimentalmente y los generados a partir de la modelación numérica en los puntos de sondeo en la curva del río (h_0 , h_3 y h_4) y el canal derivador (h_1 , h_5 y h_6). En la simulación se consideraron las tres opciones de geometría del espigón: a) barrera, b) conjunto de obstrucciones escalonadas (escalones), y c) terreno natural (TN). El rango de los caudales analizados fue desde el momento en que el canal

empieza a derivar (1 000 m³/s) hasta el caudal de desbordamiento (1 600 m³/s).

Tabla 2. Niveles medidos en el modelo físico reducido y simulaciones numéricas.

$Q_{ent} = 1\ 600\ m^3/s$							
Sondeo	Exp	Barrera	Δh (m)	Escalones	Δh (m)	TN	Δh (m)
Nivel (msnm)							
Curva	6.84	6.92	0.08	6.91	0.07	6.91	0.07
	7.13	6.93	0.20	6.93	0.20	6.92	0.21
	6.96	6.91	0.05	6.91	0.05	6.91	0.05
Canal	6.73	6.83	0.10	6.81	0.08	6.81	0.08
	5.94	6.10	0.16	6.27	0.33	6.27	0.33
	3.38	3.05	0.33	3.05	0.33	3.05	0.33
Δh promedio =			0.15		0.18		0.18
$Q_{ent} = 1\ 503\ m^3/s$							
Sondeo	Exp	Barrera	Δh (m)	Escalones	Δh (m)	TN	Δh (m)
Nivel (msnm)							
Curva	6.76	6.77	0.01	6.75	0.01	6.75	0.01
	6.86	6.71	0.15	6.71	0.15	6.71	0.15
	6.74	6.69	0.05	6.69	0.05	6.69	0.05
Canal	6.73	6.68	0.05	6.65	0.08	6.66	0.07
	5.81	5.97	0.16	6.11	0.30	6.11	0.30
	3.69	2.93	0.76	2.93	0.76	2.93	0.76
Δh promedio =			0.20		0.23		0.22

$Q_{ent} = 1\ 450\ m^3/s$							
Sondeo	Exp	Barrera	Δh (m)	Escalones	Δh (m)	TN	Δh (m)
Nivel (msnm)							
Curva	6.64	6.70	0.06	6.68	0.04	6.68	0.04
	6.79	6.62	0.17	6.62	0.17	6.62	0.17
	6.57	6.60	0.03	6.60	0.03	6.60	0.03
Canal	6.50	6.61	0.1	6.59	0.09	6.59	0.09
	5.62	5.92	0.30	6.05	0.43	6.05	0.43
	2.61	2.89	0.28	2.89	0.28	2.89	0.28
Δh promedio =			0.16		0.17		0.17
$Q_{ent} = 1\ 397\ m^3/s$							
Sondeo	Exp	Barrera	Δh (m)	Escalones	Δh (m)	TN	Δh (m)
Nivel (msnm)							
Curva	6.66	6.59	0.07	6.56	0.10	6.57	0.09
	6.62	6.47	0.15	6.47	0.15	6.47	0.15
	6.50	6.45	0.05	6.45	0.05	6.45	0.05
Canal	6.57	6.50	0.07	6.47	0.10	6.48	0.09
	5.54	5.85	0.31	5.97	0.43	5.97	0.43
	3.42	2.82	0.60	2.82	0.60	2.82	0.60
Δh promedio =			0.21		0.24		0.24
$Q_{ent} = 1\ 307\ m^3/s$							
Sondeo	Exp	Barrera	Δh (m)	Escalones	Δh (m)	TN	Δh (m)
Nivel (msnm)							

Curva	6.57	6.48	0.09	6.45	0.12	6.46	0.11
	6.48	6.32	0.16	6.32	0.16	6.32	0.16
	6.33	6.30	0.03	6.30	0.03	6.30	0.03
Canal	6.4	6.4	0.00	6.37	0.03	6.37	0.03
	5.53	5.75	0.22	5.84	0.31	5.84	0.31
	3.31	2.73	0.58	2.73	0.58	2.73	0.58
Δh promedio =			0.18		0.21		0.20
$Q_{ent} = 1\ 199\ m^3/s$							
Sondeo	Exp	Barrera	Δh (m)	Escalones	Δh (m)	TN	Δh (m)
	Nivel (msnm)						
Curva	6.40	6.50	0.10	6.29	0.11	6.30	0.10
	6.24	6.32	0.08	6.13	0.11	6.13	0.10
	6.10	6.30	0.20	6.10	0.00	6.10	0.00
Canal	6.33	6.43	0.10	6.22	0.11	6.22	0.11
	5.31	5.62	0.31	5.70	0.39	5.70	0.39
	3.13	2.62	0.51	2.62	0.51	2.62	0.51
Δh promedio =			0.22		0.21		0.20
$Q_{ent} = 1\ 102\ m^3/s$							
Sondeo	Exp	Barrera	Δh (m)	Escalones	Δh (m)	TN	Δh (m)
	Nivel (msnm)						
Curva	6.28	6.18	0.10	6.14	0.14	6.15	0.13
	6.00	5.93	0.07	5.93	0.07	5.93	0.07
	5.96	5.90	0.06	5.90	0.06	5.90	0.06

Canal	6.10	6.11	0.01	6.07	0.03	6.08	0.02
	5.15	5.48	0.33	5.53	0.38	5.53	0.38
	3.04	2.51	0.53	2.51	0.53	2.51	0.20
Δh promedio =			0.18		0.20		0.14
$Q_{ent} = 1\ 000\ m^3/s$							
Sondeo	Exp	Barrera	Δh (m)	Escalones	Δh (m)	TN	Δh (m)
	Nivel (msnm)						
Curva	6.16	6.01	0.15	5.97	0.19	5.98	0.18
	6.80	5.74	0.06	5.74	0.06	5.74	0.06
	5.68	5.70	0.02	5.70	0.02	5.70	0.02
Canal	6.00	5.95	0.05	5.91	0.09	5.92	0.08
	5.03	5.36	0.33	5.39	0.36	5.39	0.36
	2.87	2.41	0.46	2.41	0.46	2.41	0.46
Δh promedio =			0.18		0.20		0.19

Las diferencias promedio de elevaciones entre los datos medidos y los simulados fue de: $\Sigma\Delta h_{Barrera} = 0.18$, $\Sigma\Delta h_{escalones} = 0.20$ y $\Sigma\Delta h_{TN} = 0.19$

Debido a que la menor variación se obtuvo modelando al espigón como barrera, se eligió este tipo de geometría con dimensiones de ancho, altura y longitud promedio. Esta opción requiere de un menor tiempo para ingresar su geometría al modelo numérico.

Modelación numérica del arreglo de los siete espigones

Una vez determinada la manera de ingresar la geometría de los espigones al modelo, el siguiente paso fue ingresar el arreglo de los siete espigones. Debido a que el efecto producido por el arreglo de espigones se refleja sobre todo en la curva del canal (punto de sondeo h_1), fue el que se tomó de referencia para comparar las mediciones experimentales contra las simulaciones numéricas. La Tabla 3 muestra los niveles medidos experimentalmente (Exp) y los generados a partir de la modelación numérica en *HEC-RAS* con el arreglo de siete espigones. En la columna Δh se muestra la diferencia de niveles entre ambos resultados y la Δh promedio.

Tabla 3. Resumen de niveles en la derivación con arreglo de siete espigones.

Caudales		<i>h</i> deriv		Δh (m)
<i>Q</i> alimentación	<i>Q</i> derivación	Exp	<i>HEC-RAS</i>	
(m ³ /s)		(msnm)		
1 438	639	6.94	6.86	0.08
1 397	596	6.89	6.76	0.13
1 309	500	6.76	6.68	0.08
1 204	385	6.57	6.59	0.02

1 102	294	6.42	6.46	0.04
1 001	223	6.28	6.31	0.03
Δh promedio =				0.06

Se observó que la variación entre los resultados medidos y los simulados numéricamente fue en promedio de 0.06 m. Se consideró que este resultado es aceptable y, por lo tanto, el modelo numérico simulaba de forma adecuada el funcionamiento de la estructura derivadora. El siguiente paso fue modelar una alternativa que reprodujera el mismo efecto ocasionado por el arreglo de siete espigones, pero con volumen de obra menor.

Propuesta alterna al arreglo de siete espigones

Los resultados obtenidos con las propuestas consideradas fueron los siguientes:

a) **Recubrimiento marginal.** La Tabla 4 muestra los niveles medidos en la curva h_1 con arreglo de siete espigones (columna Exp), y los compara contra los obtenidos con el recubrimiento en *HEC-RAS* (columna RECUB). En la columna Δh se muestra la diferencia entre ambos resultados, así como el promedio de los mismos.

Tabla 4. Resumen de niveles en la derivación con recubrimiento.

Caudales		h deriv		Δh (m)
Q alimentación	Q derivación	Exp	RECUB	
(m ³ /s)		(msnm)		
1 438	639	6.94	6.57	0.37
1 397	596	6.89	6.44	0.45
1 309	500	6.76	6.33	0.43
1 204	385	6.57	6.19	0.38
1 102	294	6.42	6.03	0.39
1 001	223	6.28	5.86	0.42
Δh promedio =				0.41

Se observó que la diferencia promedio en la lámina de agua entre ambas configuraciones fue de 0.41 m. Es decir, que con el recubrimiento marginal no se alcanza a reproducir de modo adecuado el efecto de derivación.

b) **Recubrimiento más cuatro espigones.** La Tabla 5 muestra los niveles medidos en la curva (h_1) con el arreglo de siete espigones (columna Exp), y los compara contra los obtenidos con la modelación numérica del recubrimiento y un arreglo de cuatro espigones propuesto (columna Rec + 4E). En la columna Δh se muestra la diferencia de nivel

entre los resultados de las modelaciones numéricas y los resultados experimentales.

Tabla 5. Resumen de niveles en la derivación con recubrimiento y cuatro espigones.

Caudales		<i>h</i> deriv		Δh
<i>Q</i> alimentación	<i>Q</i> derivación	Exp	Rec+4E	Rec+4E
m^3/s		msnm		m
1 438	639	6.94	6.81	0.13
1 397	596	6.89	6.70	0.19
1 309	500	6.76	6.62	0.14
1 204	385	6.57	6.52	0.05
1 102	294	6.42	6.39	0.03
1 001	223	6.28	6.24	0.04
		Δh promedio =		0.10

Se observó que entre los resultados de las mediciones experimentales y de la modelación numérica de la alternativa propuesta, la variación promedio en la lámina de agua es de 0.10 m, y la variación entre los resultados obtenidos con la modelación de los siete espigones y la modelación del recubrimiento combinado con el arreglo de cuatro espigones es de 0.04 m. Se considera que esta variación no es significativa, por lo que esta alternativa puede reproducir de manera adecuada el efecto derivador.

Volumen de obra

Con fines comparativos, se muestra el concentrado de la estimación en volumen de obra que requiere cada alternativa (Tabla 6).

Tabla 6. Comparación de volúmenes de obra.

Volumen original del proyecto (m³)	
Arreglo de siete espigones	12 687.21
Volumen de alternativa propuesta (m³)	
Recubrimiento	4 948.16
Arreglo de cuatro espigones	6 024.28
Total =	10 972.44
Diferencia =	1 714.77

Se estimó una reducción en el volumen de obra de alrededor de 1 700 m³, lo cual, en términos económicos, representa un ahorro significativo.

Conclusiones

En las simulaciones numéricas se empleó el *software HEC-RAS*, modelo numérico hidráulico que puede trabajar en 1D o 2D. El objetivo fue realizar el análisis hidráulico en una curva de un río, en la cual se hizo una derivación y se agregó una protección marginal con base en espigones. El fenómeno hidráulico es evidentemente tridimensional (3D), por lo que se piensa que el uso de un *software* 1D, podría considerarse limitado. Aquí se empleó *HEC-RAS 1D* y se contrastó su desempeño contra datos medidos experimentalmente en un modelo físico reducido, teniendo resultados aceptables. Se encontró que la mejor manera de modelar espigones en este caso fue como una barrera, pues además de que los resultados numéricos comparados contra los medios presentaron la menor diferencia (0.06 m), esta opción requiere un menor tiempo para ingresar la geometría al modelo numérico. También se llevó a cabo la modelación de una alternativa de protección, que consistió de un recubrimiento y cuatro espigones, encontrando que este arreglo reproduce el efecto generado por el arreglo original de siete espigones, pero con menor volumen de obra. Por último, en este estudio se empleó como parámetro de comparación y calibración la elevación de

la lámina de agua, encontrando que *HEC-RAS 1D* presentó un buen desempeño para análisis hidráulicos de espigones en curvas. Sin embargo, se recomienda una vez realizado el análisis 1D y elegido el diseño final, emplear un análisis 2D, hacer un análisis de sensibilidad y contrastar estos resultados con los obtenidos en el modelo 1D.

Referencias

- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). *Iber*: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30, 1-10. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS 5.0 Users Manual.pdf*. Davis, USA: US Army Corps of Engineers, Institute of Water Resources, Hydrologic Engineer Center. Recuperado de [https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS% 205.0%20 Reference %20 Manual.pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf)
- DHI. (2016). *Mike 11*. Hørsholm, Denmark: DHI.
- Jiménez-León, E., Mendiola-Lizárraga, L., Rivera-Trejo, F., Nungaray-Núñez, A., Díaz-Arcos, J. (2017). Cambio hidrodinámico y evolución del fondo en ríos de planicie por espigones. *Epistemus*, 11, 27-35.
- Kang, J., Yeo, H., Kim, S., & Ji, U. (2011). Experimental investigation on the local scour characteristics around groynes using a hydraulic

- model. *Water and Environment Journal*, 25, 181-191. Recuperado de <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2009.00207.x>
- Mawandha, H. G., Wignyosukarto, B. S., & Jayadi, R. (2018). Mini polders as alternative flood management in the lower Bengawan Solo river, Indonesia. *Irrigation and Drainage*, 67, 72-80. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/ird.2198>
- Maza-Alvarez, J. A., García-Flores, M., & Olvera-Salgado, R. (1996). Estabilización y rectificación de ríos. Cap. 14. En: *Manual de ingeniería de ríos*. México, DF, México: Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- McCoy, A., Constantinescu, G., & Weber, L. (2007a). A numerical investigation of coherent structures and mass exchange processes in channel flow with two lateral submerged groynes. *Water Resources Research*, 43. Recuperado de <https://doi.org/10.1029/2006WR005267>
- McCoy, A., Constantinescu, G., & Weber, L. (2007b). Hydrodynamics of flow in a channel with two lateral submerged groynes. *World Environmental and Water Resources Congress 2007* (pp. 1-11), American Society of Civil Engineers, Reston, USA. Recuperado de [https://doi.org/10.1061/40927\(243\)118](https://doi.org/10.1061/40927(243)118)
- McCoy, A., Constantinescu, G., & Weber, L. J. (2008). Numerical investigation of flow hydrodynamics in a channel with a series of groynes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134, 157-172. Recuperado de [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:2\(157\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:2(157))

- Minor, B., Rennie, C. D., & Townsend, R. D. (2007). "Barbs" for river bend bank protection: Application of a three-dimensional numerical model. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34, 1087-1095. Recuperado de <https://doi.org/10.1139/l07-088>
- Nguyen, Q. B., Vo, N. D., & Gourbesville, P. (2018). Flow around groynes modelling in different numerical schemes. *13th International Conference on Hydroinformatics, HIC 2018* (pp. 1513-1502), Palermo, Italy, July, 1-6. Recuperado de <https://doi.org/10.29007/2nlb>
- Qin, J., Zhong, D., Wu, T., & Wu, L. (2017). Advances in water resources sediment exchange between groin fields and main-stream. *Advances in Water Resources*, 108, 44-54. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.07.015>
- Rau-Lavado, P. C. (2007). *Comparación de modelos unidimensionales y bidimensionales en la simulación hidráulica de ríos. Aplicación al río Majes-sector Querulpa-Tomaca*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rivera-Trejo, F., Soto-Cortés, G., & Barajas-Fernández, J. (2009). The 2007 flooding in Tabasco, Mexico: Evolution of water levels. *Ingeniería Hidráulica en México*, 24(4), 159-166.
- Sukhodolov, A. N. (2014). Hydrodynamics of groyne fields in a straight river reach: Insight from field experiments hydrodynamics of groyne fields in a straight river reach: Insight from field experiments. *Journal of Hydraulic Research*, 1, 105-120. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/00221686.2014.880859>

- Weitbrecht, V., Socolofsky, S. A., & Jirka, G. H. (2008). Experiments on mass exchange between groin fields and main stream in rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134, 173-183. Recuperado de [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2008\)134:2\(173\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2008)134:2(173))
- Zhang, Y., Chen, G., Hu, J., Chen, X., Yang, W., & Tao, A. (2017). Experimental study on mechanism of sea-dike failure due to wave overtopping. *Physics Procedia*, 68, 171-181. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.08.009>