

Modelación del factor hidráulico de sección para diseñar canales regulares

PhD. Laura de Jesús Calero Proaño¹,
PhD. Marcial Sebastián Calero Amores²,

Fecha de recepción:
24 de julio, 2018

Fecha de aprobación:
14 de noviembre, 2018

Resumen

Los canales representan sistemas hidráulicos fundamentales que impactan en la factibilidad técnica y económica del proyecto. El diseño hidráulico involucra dos variables, pero, se dispone de una ecuación. La bibliografía actual, resuelve el problema mediante tablas, gráficos, ecuaciones explícitas de relativa aplicación, procesos iterativos y softwares. Estas soluciones están limitadas a ciertos canales, paquetes computacionales y por aproximaciones. La investigación aborda la problemática, desarrollando modelos explícitos, operativos y flexibles, que estiman un factor hidráulico de la sección para diseñar la estructura. El trabajo se desarrolló en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, Industria y Construcción de la Universidad Laica VICENTE ROCAFUERTE de Guayaquil, manejándose y validando más de 500 registros analíticos y experimentales. Los modelos se estimaron normalizando la ecuación de resistencia al flujo de Manning para hallar la función transformada de sección, la cual se correlacionó con parámetros geométricos adimensionales y calcular el factor hidráulico de sección K . Este factor K se relacionó con los parámetros de diseño del proyecto para determinar el tirante, ancho o talud y diseñar el canal. El tirante Y_{modelo} calculado con los modelos de factor K , se evaluaron con el tirante $Y_{\text{teórico}}$ determinado de Manning y con el $Y_{\text{laboratorio}}$ estimado por experimentación, obteniendo niveles de confianza que exceden el 98% que validan los modelos desarrollados. Los modelos del factor K y tirante Y_{modelo} son explícitos, operativos y confiables, siendo desarrollados y validados analítica y experimental que aporta científicamente a las ciencias hidráulicas y optimizan técnica y económicamente los diseños de canales.

Palabras claves: Canal, diseño estructural, optimización, modelización, flujo.

Abstract

The channels represent fundamental hydraulic systems that impact on the technical and economic feasibility of the project. The hydraulic design involves two variables, but, an equation is available too. The current bibliography solves the problem by means of tables, graphs, explicit equations of relative application and iterative processes. These solutions are limited to certain channels, computational and approximation packages. The research addresses the problem, developing

¹Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador. Docente-Investigador/a Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Miembro del Comité Científico, Facultad de Arquitectura, Universidad de Guayaquil. laura.calerop@ug.edu.ec

²Universidad Laica VICENTE ROCAFUERTE de Guayaquil, Ecuador –Docente Investigador-Director Laboratorio Hidráulica –FIIC –ULVR. Facultad de Ingeniería, Industria y Construcción. mcaleroa@ulvr.edu.ec

explicit, operational and flexible models that estimate a hydraulic factor of the section to design the structure. The work was developed in the Hydraulic Laboratory of the Faculty of Engineering, Industry and Construction of the Universidad Laica VICENTE ROCAFUERTE de Guayaquil, managing and validating more than 500 analytical and experimental records. The models were estimated by normalizing the Manning flow resistance equation to find the transformed section function, which was correlated with dimensionless geometric parameters and to calculate the hydraulic factor of section K. This K factor was related to the design parameters of the project to determine the tie, width or slope and design the channel. The Y-tie model calculated with the K-factor models, were evaluated with the determined Y-tie model of Manning and with the Y-tie model estimated by experimentation, obtaining confidence levels exceeding 98% that validate the developed models. The models of the K factor and the Y-tie model are explicit, operative and reliability, being developed and validated analytical and experimental that contributes scientifically to the hydraulic sciences and optimizes technically and economically the channel designs.

Keywords. Channel. Design. Optimize. Modeling. Flow.

Introducción

El diseño de canales es un componente fundamental en la ingeniería hidráulica, siendo conducciones para satisfacer la demanda hídrica de la comunidad (García, 2015), el estudio sistemático de los canales se remonta al siglo XVIII, con Chezy, Bazin y otros (Estrada, 2013). Dimensionar estas estructuras, implica relacionar la geometría del canal con las características hidromecánicas del flujo para proyectar sistemas hidráulicos que optimicen técnica y económicamente los proyectos de aprovechamiento y control del recurso hídrico (Calero 2018).

El cálculo optimizado del tirante y ancho de la sección es fundamental para dimensionar canales (Jiménez, 2013). Autores como Morales y Parra (2013) proponen métodos gráficos para estimar la sección en base de relacionar solamente parámetros hidrodinámicos y no de las variables que intervienen directamente en la geometría del canal.

Puertas y Sánchez-Juny (2013) señalan,

el diseño de canales generalmente implica conocer el caudal a transportarse, tipo de material o coeficiente de rugosidad, pendiente, talud, entre otros que están directamente vinculado con el desarrollo del flujo, lo cual debe relacionarse con la geometría hidráulica para calcular el tirante y ancho de solera.

Las referencias bibliográficas y actualizadas a la última década pasada, pero, fundamentales para el desarrollo de la hidráulica, indican que diseñar la geometría de la sección implica disponer de una ecuación para solucionar dos incógnitas, esta característica determina conflictos para desarrollar modelos eficientes, operativos y confiables. La problemática es abordada y solucionada por la investigación, desarrollando y validando modelos analíticos explícitos y operativos que faciliten el diseño de la sección transversal de canales regulares.

El dimensionamiento del canal se estima mediante la introducción de un factor de sección hidráulico K que es relacionado con las demandas del proyecto para estimar directamente el tirante, lo cual constituyen un

impacto positivo y novedoso a la ingeniería hidráulica.

Autores como Jiménez, Ortiz, Castillo, Romero y Godos (2013), calculan el tirante normal del flujo de modelos como Manning y Chezi para lo cual han desarrollado gráficos, tablas o procesos iterativos que relacionan caudal, rugosidad y pendiente con ancho y tirante.

Actualmente, modelos analíticos para diseñar canales que relacionen directamente las características geométricas con el factor de sección del canal no existen y los métodos de solución analítico o gráfico que plantea varios autores son de relativa eficiencia y precisión por las escalas manejadas generando imprecisiones que pueden superar el 25%.

Para determinar la geometría del canal, se han elaborado ecuaciones explícitas, pero, para cierto tipo de canal y aplicando la informática para solucionar las iteraciones, estas ecuaciones se fundamentan en funciones diferenciales, gráficos y nomogramas.

Aplicando métodos numéricos como, Newton-Raphson, Bisección, Falsa posición o de la Secante, se han desarrollado funciones para determinar el tirante normal para el régimen uniforme en las cuales se combinan las técnicas computacionales para resolver los sistemas lineales y no-lineales determinados por los métodos numéricos.

Basado en la ecuación de Manning, se han desarrollado varios trabajos para calcular la profundidad normal en canales rectangulares o trapezoidales mediante funciones explícita o diferenciales teniendo que aplicarse métodos numéricos para calcular la profundidad del flujo.

Rojas (2013) estudia el diseño de canales con flujo uniforme, describiendo métodos

gráficos para estimar la sección del canal. Cadavid (2013) calcula el tirante mediante la correlación gráfica entre una función dimensional del flujo con una relación adimensional de ancho y tirante, lo cual permite determinar la geometría del canal.

El número de variables intervinientes en los modelos de resistencia al flujo, ha determinado que el cálculo de la profundidad normal se particularice de acuerdo al tipo de sección. Rodríguez (2017), desarrolló ecuaciones explícitas para el cálculo del tirante normal en canales rectangulares utilizando nomogramas y gráficos elaborados por diferentes autores y validándolo a través de una hoja en Excel. Martínez (2017), plantea el diseño de canales circular en base del tirante normal, mientras que Gómez (2016), para el modelo de Darcy Weibach calcula el tirante en flujo uniforme para el mismo tipo de sección en base de procesos iterativos.

Debido a que diseñar canales regulares implica manejar diferentes tipos de secciones y variables, así como, procesos iterativos para calcularlos, autores como Duarte (2016) y Organismo Internacionales para el desarrollo del recurso agua, han desarrollado tablas y gráficos para calcular la geometría del canal. Además, se han elaborado programas informáticos como Hidra-Bas (Pérez, 2015) para hidráulica de canales, así como, paquetes computacionales para diseñar estructuras hidráulicas como U.S. Army (s. f.) Hec Ras v5.1 y Rojas (2013) HCanalesv3.3, en los cuales uno de sus módulos responde al cálculo de la sección de la estructura proyectada.

Diseñar canales regulares sin utilizar algoritmo computacional, procesos iterativos o gráficos, son el objetivo de la investigación. Los modelos analíticos determinados, son funciones explícita, operativa y flexible

que relacionan parámetros adimensionales de la geometría del canal con el factor de sección hidráulico K , con el cual se diseña la conducción. Los modelos tienen confiabilidad superior al 98% y representan el aporte científico de la investigación a las ciencias hidráulicas e impactan en los costos de la estructura proyectada.

Método y Materiales

El estudio aborda el cálculo del factor hidráulico de sección para diseñar canales regulares, fue desarrollado por la Cátedra de Ingeniería Hidráulica en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, Industria y Construcción (FIIC) de la Universidad Laica VICENTE ROCAFUERTE de Guayaquil (ULVR) en el período 2017-2018. La investigación se enmarca en el método científico analítico y modelación teórica y práctica experimental aplicada. La línea base se generó con

más de 500 datos evaluados y validados estadísticamente.

Los modelos analíticos y gráficos y las validaciones teórica y experimental, se analizaron y generaron con programas tipo R, Regresión y hojas Excel, obteniendo coeficientes con correlación superior al 98% y desviaciones que no exceden el 1,8%.

La ecuación (1) de resistencia al flujo de Manning, se normalizó para obtener la función geométrica transformada (ecuación 2) en la cual, el factor hidráulico de sección K (ecuación 3) se representó por las características geométricas de la sección transversal.

La ecuación (3) fue discretizada con la función (4) por tipo de canal para calcular el factor hidráulico de sección K como describen las ecuaciones (5) al (12).

$$Q = \frac{1}{n} \frac{A^{5/3}}{P^{2/3}} S_0^{1/2} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$Q n S_0^{1/2} Y^{8/3} = \frac{A^{5/3}}{P^{2/3} Y^{8/3}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$K = \frac{A^{5/3}}{P^{2/3} Y^{8/3}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$c = \varphi\left(\frac{Y}{b}\right) = \varphi\left(\frac{Y}{b}, Z\right) = \varphi(Z) = \varphi\left(\frac{Y}{D}\right) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Canal rectangular

$$K_{RECTANGULAR} = \frac{1}{\left[\left(\frac{Y}{b}\right) \left(1 + 2\frac{Y}{b}\right)^{2/3}\right]} \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$K = \varphi\left(\frac{Y}{b}\right) \quad (\text{Ecuación 6})$$

Canal trapezoidal

$$K_{TRAPEZOIDAL} = \frac{\left(\frac{1}{Y} + Z\right)^{5/3}}{\left(\frac{1}{Y} + 2\sqrt{1+Z^2}\right)^{2/3}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$K = \varphi\left(\frac{Y}{b}, Z\right) \quad (\text{Ecuación 8})$$

Canal triangular

$$K_{\text{TRIANGULAR}} = \frac{(Z)^{5/3}}{(2\sqrt{1+Z^2})^{2/3}} \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$K = \varphi(Z) \quad (\text{Ecuación 10})$$

Canal circular

$$K_{\text{CIRCULAR}} = \frac{\left[\frac{\pi}{180}(2\cos^{-1}(1-2\frac{Y}{D})) - \sin(2\cos^{-1}(1-2\frac{Y}{D}))\right]^{5/3}}{((2)^{1/3})\left(\frac{Y}{D}\right)^{8/3} \left[\frac{\pi}{180}(2\cos^{-1}(1-2\frac{Y}{D}))\right]^{2/3}} \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$K = \varphi\left(\frac{Y}{D}\right) \quad (\text{Ecuación 12})$$

Siendo:

Q = caudal

n= coeficiente de rugosidad de Manning

A= área hidráulica

P= perímetro hidráulico

S₀= pendiente de solera

K= factor de sección hidráulico

Y= tirante normal

Z= talud lateral

D=diámetro

c= función geométrica adimensional

Asignando valores a la ecuación (5) y reemplazados en las ecuaciones (5), (7), (9) y (11) se calcularon valores de (c, k_i). Correlacionando los valores de c y k_i se obtuvieron modelos gráfico y analítico con niveles de confianza que exceden el 98%. El modelo analítico permite en base de la relación de llenado asumida para el proyecto, calcular el valor de K_i que se reemplaza en la

ecuación (13) para estimar Y_{modelo}. El tirante calculado se relaciona con la ecuación (4) para complementar el diseño del canal.

$$Y_{\text{modelo}} = \left[\frac{Q n}{S_0^{1/2} K_i} \right]^{3/8} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Relacionando y evaluando las desviaciones $\bar{V}_{i,j}$ producidas entre el tirante Y_{modelo} calculado con el modelo (13), con el tirante Y_{teórico} determinado con el modelo de Manning y con el tirante Y_{laboratorio} determinado experimentalmente en el Laboratorio de Hidráulica de la FIIC, se validaron los modelos calculados con la investigación.

Resultados y Discusión

Resultados

Asignado valores a la relación de llenado y/o talud Z, se determinaron los factores de sección hidráulico K_i por tipo de sección y se elaboraron modelos gráficos y analíticos descritos en las figuras 1, 2, 3 y 4. Los modelos tienen coeficiente correlación que excede el 98%.

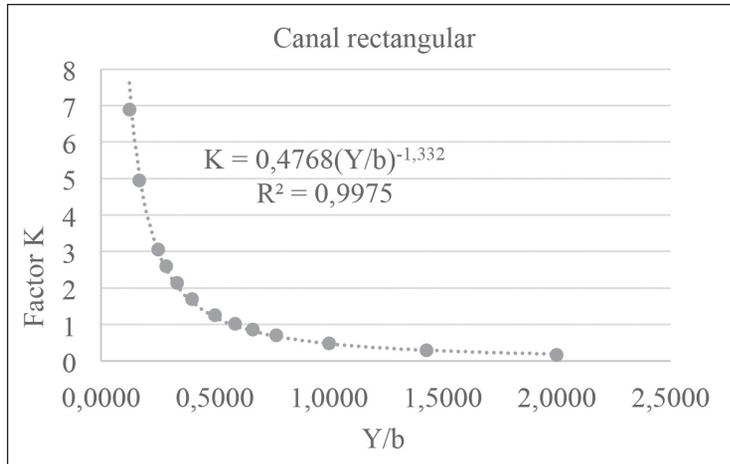


Figura 1. Factor de sección K para canal rectangular

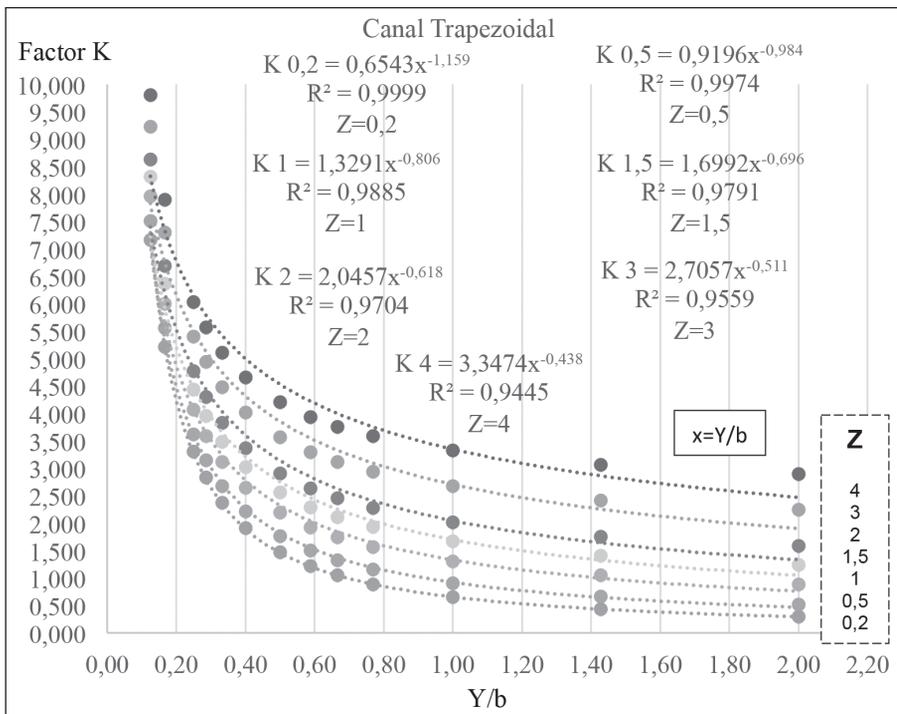


Figura 2. Factor de sección K para diferentes taludes Z. Canal trapezoidal

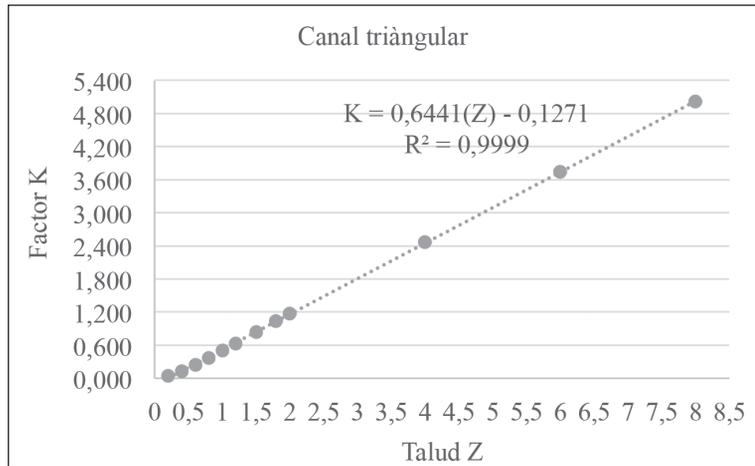


Figura 3. Factor de sección K. Canal triangular

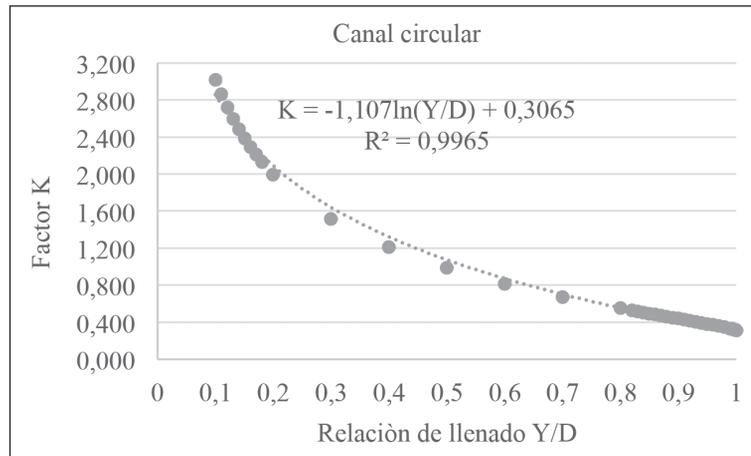


Figura 4. Factor de sección K. Canal circular

El tirante calculado Y_{modelo} mediante el factor de sección hidráulica K, se relacionó para diferentes casos con los tirantes $Y_{teórico}$ y $Y_{laboratorio}$, para calcular las desviaciones

entre los modelos aplicados. La tabla 1 describe las desviaciones para los casos analizados.

Tabla 1. Validación de los modelos Ki y Y_{modelo}

Código	Caudal Q (m ³ /s.)	Rugosidad n	Pendiente solera So	Ancho solera b (m.)	(Y/b) asumido	Tirante (mtr)			Desviación d (%)	
						Yteórico	Y modelo	Ylaboratorio	d teórico- modelo	d modelo- laboratorio
						01	0,00694	0,011	0,001	0,30
02	0,01389	0,011	0,001	0,30	0,3453	0,1036	0,1051	0,103	1,42	2
03	0,025	0,011	0,001	0,30	0,5323	0,1597	0,1626	0,159	1,82	2
04	0,03333	0,011	0,001	0,30	0,6635	0,1991	0,2022	0,198	1,57	2
05	2	0,011	0,001	2	0,3240	0,6481	0,6563		1,26	*
06	3	0,011	0,001	2,5	0,2834	0,7085	0,7146		0,86	*

Discusión

Las funciones normalizadas y transformadas que generan los modelos, se fundamentan en el modelo de Manning y su desarrollo, no implica aproximaciones o distorsión numérica al aplicarse para diseñar canales.

Los modelos de ajuste desarrollados para estimar el factor hidráulico de sección K, se obtuvieron con niveles de confiabilidad superior al 98% y evita los conflictos por distorsión que presentan los métodos gráficos, analíticos e iterativos que son actualmente utilizados para diseñar estas estructuras.

Los modelos desarrollados son funciones explícitas, operativos y de fácil aplicación, calculan directamente el tirante Y son aplicable a los principales tipos de canal que se proyectan en la práctica. Estos modelos, evitan procesos gráficos, iterativos, computacionales, numéricos y expresiones diferenciales, propuestas en la documentación revisada.

El factor K se estimó, asignando valores por relación de Y/b, Y/d o talud Z en parámetros geométrico transformado y adimensional, el cual se relacionó con los parámetros de entrada para el diseño para dimensionar la estructura. La metodología y modelos desarrollados implica formular y analizar las alternativas necesarias para optimizar el diseño y evita la rigidez del diseño como plantean diferentes autores.

Los modelos se fundamentan en procesos analítico y se evaluaron con desarrollos teóricos iterativos y experimentales, validándolos para un amplio intervalo de caudales y relación de llenado, determinando desviaciones que no exceden el 2%.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Se desarrollaron modelos analíticos explícitos para el factor de sección hidráulica y diseñar canales regulares con confiabilidad superior al 98%.

La investigación abordó el cálculo teórico, analítico y experimental en el laboratorio de la FIIC para determinar los tirantes Y_{modelo} , $Y_{\text{teórico}}$ y $Y_{\text{laboratorio}}$ los cuales se evaluaron estimando distorsiones inferiores al 2%.

Los modelos desarrollados son operativos, flexibles, solucionan una problemática en canales regulares y de aplicación directa para el diseño, evitando los conflictivos por procesos iterativos, numéricos, computacionales, diferenciales y gráficos que son parte de la documentación actual para diseñar estas estructuras.

Los modelos permiten formular y evaluar diferentes alternativas para optimizar el diseño de canales de uso común en proyectos hidráulicos.

Recomendaciones

La investigación genera escenarios para investigaciones como: canales de sección irregular y regular para proyectos especiales.

Los modelos desarrollados pueden ser relacionados con investigaciones que abordan el cálculo de coeficientes modificados de la resistencia al flujo n de Manning por la hidrodinámica y evaluar el impacto técnico y económico en canales.

Referencias

Cadavid, J. (2013). *Hidráulica de canales: Fundamentos* [Colección Académica]. Medellín, Colombia: Universidad EAFIT.

Calero, M. y Calero, P. (2018). *Modelación del coeficiente de resistencia al flujo "n" de Manning para diseño de canales*. XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica –LADHI, Buenos Aires, Argentina.

Duarte, C. (2016). *Introducción a la hidráulica de canales* (4ª ed.). Bogotá,

Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Estrada, G. (2013). *Manual de Hidráulica de Canales*. Chapingo, México: Universidad Autónoma de Chapingo.

García, N. (2015). *Operación de canales, conceptos generales*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Gómez, H. (2016). Fórmula Iterativa para calcular la profundidad normal en canales circulares. Ecuación de Darcy.

Jiménez, M. (2013). Manual para el diseño de sistemas de agua potable y alcantarillado. Recuperado de <https://ingenieroscivil.com/agua-potable>

Jiménez, M., Ortiz, A., Castillo, E., Romero, R. y Godos, R. (2013). *Manual de Apuntes de la Experiencia Educativa de tuberías y canales*. Recuperado de <https://www.uv.mx/ingenieriacivil/files/2013/09/manual-de-ee-hidraulica-de-tuberias-y-canales.pdf>

Martínez, E. (22 de febrero 2017). Hidráulica Práctica. DEXTRA EDITORIAL Recuperada de <https://www.gandhi.com.mx/hidraulica-practica>

Morales, J. y Parra, A. (enero/abril, 2013). Mejoras al método usual de diseño hidráulico de alcantarillas. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34(1), 3-18. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382013000100001

Pérez, L. (2015). *Hidra-Bas sistema computacional de hidráulica de canales* (Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México). Handle: <http://hdl.handle.net/20.500.12013/1561>

- Puertas, J. y Sánchez-Juny, M. (2013). *Hidráulica* [Colección Escuelas]. Barcelona, España: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Rojas, H. (13 de diciembre, 2013). *Diseño de canales* [Presentación en PPT]. Recuperada de <https://es.slideshare.net/linoolascuagacruzado/diseo-de-canales>
- Rojas, P. (25 de julio, 2013). HCanales v3 [Desarrollado por Máximo Villón]. En *Ingeciv*. Recuperado de <https://www.ingeciv.com/descargar-hcanales-v3/>
- US Army. (s. f). *HEC-RAS* (Herramienta de edición v5.1). Recuperada de <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/downloads.aspx>
- Rodríguez, J. (2017). Estimación de una ecuación explícita derivada de un Nomograma para el cálculo del tirante normal de un canal Rectangular y evaluación de su grado de interrelación mediante hoja de cálculo en Excel (Tesis de grado, Universidad Nacional de Trujillo, Perú). Recuperada de <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/9477>

Para citar este artículo utilice el siguiente formato:

Calero, L. y Calero, M. (noviembre-diciembre de 2018). Modelación del factor hidráulico de sección para diseñar canales regulares. *YACHANA, Revista Científica*, 7(3), 101-110.