

Cálculo del coeficiente de rugosidad "n" para canales trapezoidales con presencia de sedimento ($\emptyset = 0.05 \text{ mm}$)

Calculation of the roughness coefficient "n" for trapezoidal channels with sediment presence ($\emptyset = 0.05 \text{ mm}$)

DIEGO MEJÍA¹ Y HOLGER BENAVIDES-MUÑOZ^{1,2}

Recibido: Julio 25, 2017

Aceptado: Septiembre 15, 2017

Resumen

En conducciones naturales y canales artificiales, es frecuente encontrar que la característica física del agua trasegada se vea alterada por la presencia de sedimento en el flujo; el depósito de dichas partículas sobre el fondo y paredes de la conducción, provoca que se modifique el valor de rugosidad del perímetro mojado. Determinar la velocidad o caudal de estos flujos con ecuaciones empíricas como la de Chezy-Manning, requiere considerar cambios físicos al momento de calcular el coeficiente de rugosidad «n» de la sección transversal del cauce. El objetivo fue calcular el coeficiente de rugosidad en un canal con presencia de sedimento. El trabajo fue realizado en el canal trapezoidal del laboratorio hidráulico, campus Universidad Nacional de Loja; se dividió en tres secciones; la primera, sin sedimento (inicio); la segunda, con sedimento (parte media) y una de control, mediante vertedero de 90° (parte final). Se aplicaron dos metodologías: i) el coeficiente de rugosidad ponderado, aplicando la ecuación de Horton-Einsten y ii) método gráfico, con la relación entre función $\phi(R/k)$ y el valor del diámetro de las partículas (k). Se determinó que n se puede expresar en función del diámetro de partículas de sedimento. Con el nuevo valor de n en las ecuaciones de Manning, los valores de velocidad y caudal fueron más cercanos a los medidos con el correntómetro.

Palabras clave: cfd, caudal, coeficiente de rugosidad ponderado y sedimento.

Abstract

In natural conduits and in artificial channels, it is common to find that the physical characteristic of the extracted water is altered by the presence of sediment in the flow, the deposit of said particles on the bottom and walls of the conduction causes that the value of the Wet perimeter roughness would be modified. For to calculate the velocity or flow rate of such flows with empirical equations such as Chezy-Manning requires that this physical change would be considered when the roughness coefficient n of the cross-section of the channel would be calculated. The present study had as objective to calculate the roughness coefficient in a channel with presence of sediment. The work was done in the trapezoidal channel of the hydraulic laboratory of the campus of the National University of Loja. It was divided into 3 sections, one without sediment (beginning), the second with presence of sediment (middle part) and a control section through a 90° weir (final part). For them, two methodologies were applied: i) the roughness coefficient weighted with the equation of Horton-Einsten and ii) the graphical method with the relation between the function $\phi(R / k)$ and the value of the diameter of the particles (k). As a result it was determined that, the roughness coefficient can be expressed as a function of the diameter of the sediment particles. With the new value of n in the Manning equations, the velocity and flow values were closer to those measured with the current meter.

Keywords: cfd, water discharge, weighted roughness coefficient and sediment.

¹ UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA (UTPL) Loja-Ecuador. San Cayetano Alto, Calle París, Loja, Ecuador. Teléfono: (+00) 593-992-679723.

² Dirección electrónica del autor de correspondencia: hmbenavides@utpl.edu.ec.

Introducción

El cambio de uso de suelo de bosque a pastizal en una cuenca hidrográfica, provoca la disminución de cobertura vegetal, factor importante en la regulación de procesos lluvia-escorrentía (Viramontes-Olivas *et al.*, 2012; Delgado *et al.*, 2013; Crespo *et al.*, 2014), esta disminución hace que los procesos erosivos aumenten drásticamente (Alatorre, 2010); aunque no sean las únicas condiciones para la generación de sedimentos (Unesco, 2010; Bustamante y Alvarez, 2011).

La pérdida de materia orgánica de las capas superficiales del suelo, los movimientos en masas, desprendimientos y deslizamientos, son eventos erosivos productores de sedimento (Basile *et al.*, 2005). Además, la erosión depende del tipo y uso que se dé al suelo (Álvarez *et al.*, 2007). Otros factores que influyen son la precipitación y temperatura (Ochoa *et al.*, 2016). La precipitación es la principal fuente de ingreso de agua a una cuenca hidrográfica (Tarboton, 2003). La variabilidad, tanto espacial como temporal, tiene una relación directa en la generación de procesos erosivos (Caballero *et al.*, 2012) en sitios donde las precipitaciones son de baja intensidad y los procesos erosivos son casi nulos, a diferencia de lugares donde las intensidades de precipitación son altas (Unesco, 2010).

La cobertura vegetal, dependiendo de su densidad y estrato, ayuda a reducir la erosión (Silveira *et al.*, 2006), actúa como una barrera protectora y, cuando no existe vegetación, las gotas de lluvia chocan directamente contra el suelo, haciendo que los procesos erosivos aumenten (Morgan, 2005). García-Chevesich (2008) determinó que el impacto de las gotas al suelo desde la copa de los árboles de gran altura (mayor a siete metros), puede generar hasta tres veces más erosión que aquella que pudiese provocar una lluvia en un suelo desnudo.

El mayor impacto del sedimento se da en lugares donde existen obras civiles que se usan

para aprovechamiento del recurso hídrico, como captaciones para agua potable, riego o presas para generación de energía eléctrica (Meneses, 2005). El sedimento, conformado principalmente por sólidos suspendidos, es transportado continuamente por ríos, mientras que el sedimento de arrastre o de fondo de cauce, se da únicamente en presencia de eventos fuertes de precipitación (García & Montoya, 2006).

La calidad del agua de un río se ve fuertemente afectada por la presencia de sedimento (Samaniego, 2009). La producción de sedimentos ha sido subestimada en varios proyectos donde se construyen obras civiles, obligando a disminuir la vida útil de estos; de igual forma, se limita la capacidad de almacenamiento (Victoria, 1999). Ejemplo de este caso, es la presa o reservorio de Poechos (Perú), el reservorio fue diseñado para un volumen de 531 Mm³ de agua y uno adicional de aproximadamente 354 Mm³ para sedimentos, el cual, en función de varias proyecciones debería llenarse en 50 años. En 2012, se realizó una nueva batimetría del reservorio, determinando un volumen de 473.6 Mm³ de sedimentos, disminuyendo la cantidad útil de almacenamiento de agua a 396.1 Mm³, con un promedio de sedimentación de 12.8 Mm³/año (Junes, 2012).

La acumulación de sedimento en el paramento aguas arriba de un vertedero o dique, afecta su eficiencia hidráulica (Fahmy, 2015).

Determinar las variables como velocidad y caudal en estas condiciones, se ve sujeta a utilizar ecuaciones universales como la de Manning (Noarayanan *et al.*, 2012; Osíos *et al.*, 2012). De esta ecuación, el área, perímetro mojado, radio hidráulico y pendiente, son fáciles de valorar. El parámetro que crea dificultades para su estimación, es el coeficiente de rugosidad «n». Este coeficiente se puede estimar utilizando varias metodologías como la del Ex - Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (S.C.S.) (Chow, 1982). Además, existen tablas pre establecidas en función de la experiencia de investigadores de donde se puede extraer el valor «n» (Ahmad *et al.*, 2017 y Osíos *et al.*, 2012).

En canales tanto naturales como artificiales a lo largo del perímetro de la sección transversal, existen varios materiales, cada uno de ellos, con diferentes valores de coeficientes de rugosidad (Ponce, 2015), a fin de obtener un solo valor de «n» que proporcione un efecto hidráulico equivalente dentro de la ecuación de Manning, calculándose un coeficiente de rugosidad ponderado o compuesto. Varios investigadores han creado ecuaciones para su cálculo, como por ejemplo: Lotter (1930), Horton-Einsten (1934), Felkel (1960), Krishnamurthy and Christensen Method (KCM) (1970), Cox (1970), Método del Distrito del U.S Army Corps of Engineers (1973), Yen (1990-1992), entre otros (Lopez, 2002; Mahapatra *et al.*, 2016; Noarayanan *et al.*, 2012).

Materiales y métodos

Para alcanzar el objetivo de la presente investigación, se realizó un modelo físico para calcular el coeficiente de rugosidad en un canal trapezoidal con presencia de sedimento. Para ello, se colocó una capa de sedimento de diámetro igual a 0.05 mm a lo largo de dos metros del canal; las velocidades fueron determinadas mediante un correntómetro electrónico de hélice y con la ecuación de

continuidad se determinaron los caudales. Empíricamente, tanto la velocidad como el caudal fueron calculados con las ecuaciones de Manning. El coeficiente de rugosidad necesario en estas ecuaciones y acorde a la investigación, por presencia de sedimento se empleó el valor del coeficiente de rugosidad ponderado de Horton-Einsten (Acosta y Jerson, 2016), y mediante un proceso analítico-gráfico entre la función $\varphi(R/k)$ y el valor del diámetro de las partículas (k) (Castillo *et al.*, 2009; Osíos *et al.*, 2012). Una descripción del canal hidráulico de campo que se utilizó para el trabajo experimental y la metodología empleada en la presente investigación se describen más a detalle en las siguientes líneas.

Trabajo experimental. Para el desarrollo de la presente investigación, se utilizó el prototipo del canal hidráulico de campo de la Universidad Nacional de Loja (UNL), universidad que se encuentra en la parte sur de la ciudad de Loja (Ecuador), cuyas coordenadas UTM son E699715 - N 9555473 a 2160 msnm y un área de 400 m² (Figura 1).

Características del canal hidráulico de campo. El prototipo del canal hidráulico de campo es de hormigón armado, posee varios componentes hidráulicos como vertedero Fayaum, canales Parshall y canales con paredes de diferentes rugosidades. Además, posee un canal trapezoidal con una longitud de ocho metros, el cual fue utilizado para la fase experimental de este trabajo.

Con el fin de tener una mejor precisión en la medición del caudal al final del canal, se colocó un vertedero de pared delgada de sección triangular de 90°, prefabricado de madera recubierto con melanina (Figura 2). Las características del vertedero V-Notch 90° se indican en la Figura 3. Para la ejecución del trabajo se dividió al canal en tres secciones, i) cresta del vertedero en presencia de sedimento (VERT_C_S), ii) zona con sedimento (C_S), y iii) zona sin sedimento (S_S) (Figura 4).

Figura 1. Ubicación cartográfica del prototipo con el canal hidráulico.

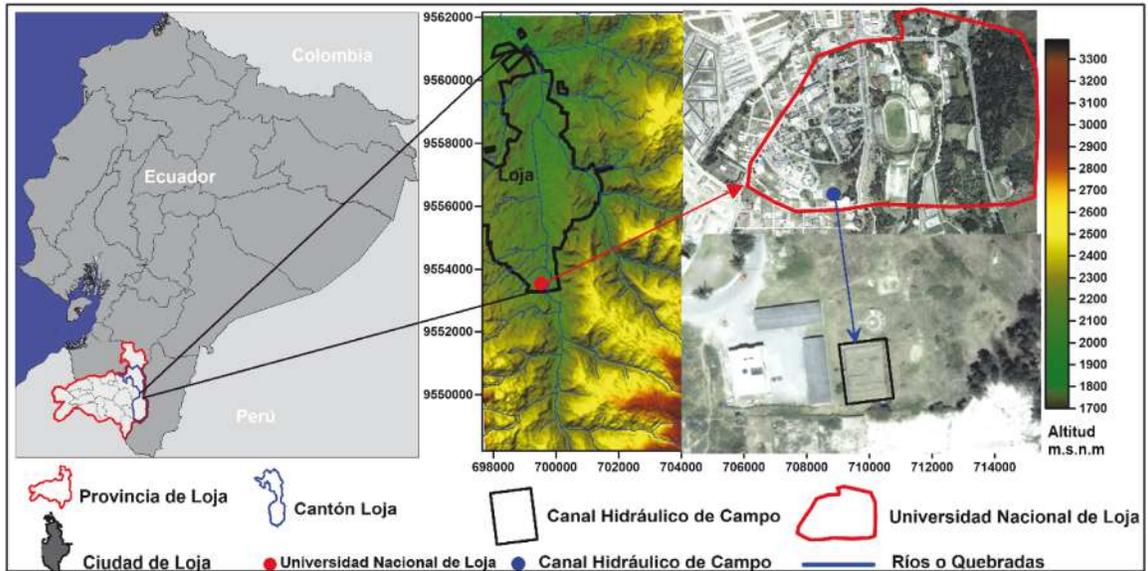
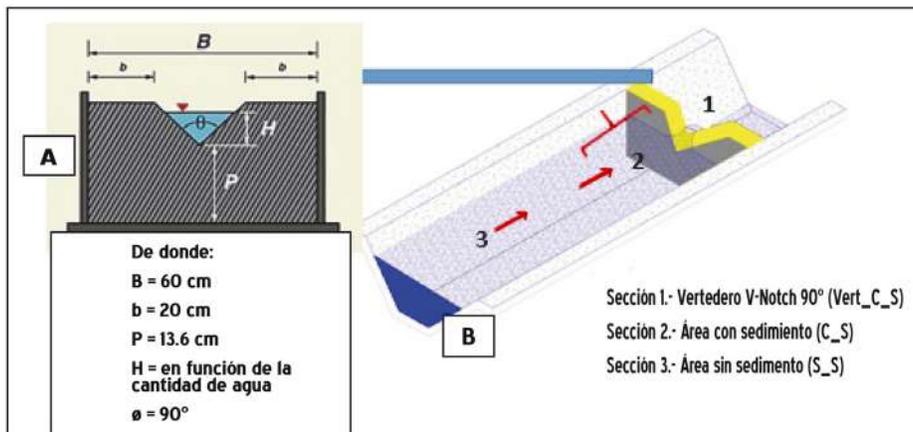


Figura 2. Prototipo del canal trapezoidal que se utilizó para el trabajo de campo.



Figura 3. A) Representación de las características del vertedero V-Notch 90° utilizado. B) Imagen con las tres secciones de estudio del canal.



El sedimento de diámetro 0.05 mm fue colocado aguas arriba del vertedero V-Notch 90°, el cual fue extraído del río Malacatos, ubicado a 500 m del canal de prueba. El sedimento fue distribuido en una distancia de 1 m, con una altura de 10 cm.

Medición de caudal. La obtención de caudales en cada una de las secciones se realizó mediante aforos líquidos, para luego calibrar cada sección de medición elaborando curvas de descarga. En las zonas S_S, C_S y VERT_C_S, se aplicó la ecuación de continuidad para su cálculo (Ec. 1), cuyo método consistió en medir, de la sección transversal, la profundidad del canal (parte trapezoidal) en verticales con una barra graduada. Al mismo tiempo que se midió la profundidad, se determinó la velocidad utilizando el correntómetro de hélice. Dependiendo de la profundidad, se midió la velocidad en dos puntos de la vertical. Con el ancho del canal, la profundidad de agua y la velocidad del flujo se calcularon los caudales correspondientes a cada segmento de cada sección transversal del prototipo del canal. La suma de los caudales de estos segmentos dio el caudal total (Narea y Tamayo, 2006). Los aforos se realizaron a diferentes alturas en el canal trapezoidal (13.0 cm, 15.0 cm, 17.5 cm y 20.0 cm).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(vh) = 0 \quad (\text{Ec. 1})$$

En donde, t es el tiempo; x e y, son coordenadas cartesianas; U, componente la velocidad de la corriente integrada verticalmente en la dirección (x); V, es el componente de la velocidad de la corriente integrada verticalmente en la dirección (y), h es la profundidad. Con los aforos realizados a diferentes profundidades de agua, se caracterizaron cada una de las tres secciones de medición mediante la construcción de curvas de descarga, cuya metodología se describe a detalle en Mejía (2009).

Cálculo y medición de velocidades. Con caudales obtenidos del apartado anterior de las secciones transversales de interés del prototipo de canal hidráulico de campo, mediante fórmulas empíricas se determinó la velocidad en estas secciones a diferentes profundidades.

a) **Velocidad con correntómetro.** En cada una de las secciones, se midió la velocidad media del agua utilizando un correntómetro de hélice. Equipo utilizado para medir la velocidad del flujo en las verticales a diferentes profundidades en las secciones transversales y cuyo detalle de manejo se menciona en Mejía (2009), programando la captura de velocidad media en un tiempo de 30 segundos, para distintos tirantes de agua.

b) **Velocidad de Manning.** En la presente investigación se utilizó la ecuación de Manning para determinar la velocidad empíricamente (Bustos y Montoya, 2015), la misma se describe a continuación (Ec. 2).

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde V, es la velocidad media del agua en (m/s); n es el coeficiente de rugosidad de Manning, valor extraído de tablas pre establecidas de la literatura (Chow, 1982; Noarayanan *et al.*, 2012; Osíos *et al.*, 2012); R es el radio hidráulico y S es la pendiente del fondo del canal en (m/m). Para verificar el comportamiento y cambio de las velocidades en las tres zonas en las que se dividió el canal, se realizó una simulación numérica únicamente para el nivel de 14 cm en la zona con sedimento, para ello, se utilizó el software especializado ANSYS® Academic R18.0.

Calculados los valores de velocidad y el coeficiente de rugosidad ponderado, se determinó el caudal utilizando la ecuación de Manning (Ec. 3):

$$Q = \frac{1}{n_c} A R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (\text{Ec. 3})$$

De donde Q, es el caudal en m^3/s ; A, área de la sección; R_h , radio hidráulico; S, pendiente del canal; n_c , coeficiente de rugosidad ponderado.

Coefficientes para determinar el coeficiente de rugosidad «n» en canales con sedimento de $\varnothing = 0.05 \text{ mm}$:

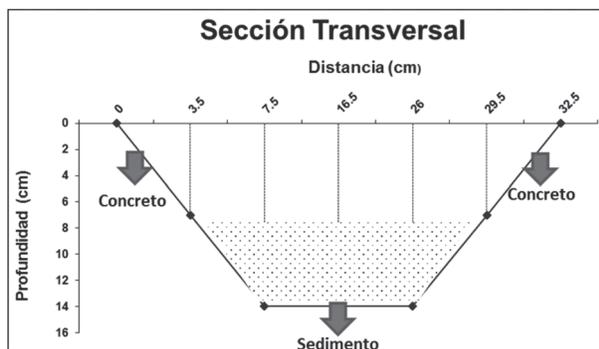
Coeficiente de rugosidad ponderado.

Debido a que en el perímetro mojado del canal estudiado se identifican diferentes rugosidades, como se representa en la Figura 4 (paredes de concreto y fondo de solera con sedimento), se calculó un coeficiente de rugosidad ponderado mediante la ecuación de Horton-Einsten (Ec.4) (Acosta y Jerson, 2016), los cuales asumen la hipótesis de que la velocidad media del flujo en la sección es la misma que la de cada subsección para determinar un coeficiente de rugosidad ponderado.

$$n_c = \left(\frac{p_1 g n_1^{3/2} + p_2 g n_2^{3/2} + p_3 g n_3^{3/2}}{P_T} \right)^{2/3} \quad (\text{Ec. 4})$$

De donde n_c corresponde al coeficiente de rugosidad ponderado, p_{1-2-3} son los perímetros mojados con distintos materiales; g_{1-2-3} , son los coeficientes de rugosidad de cada una de las subsecciones que se encuentran en el perímetro mojado, P_T es el perímetro mojado total de la sección transversal.

Figura 4.- Representación gráfica de las paredes del canal y sus diferentes rugosidades consideradas para el cálculo del perímetro mojado.



Método gráfico. Para determinar el coeficiente de rugosidad de un canal con presencia de sedimento de diámetro 0.05 mm, se aplicó una gráfica de la relación entre la función $\phi(R/k)$ y el valor del diámetro de las partículas (k). utilizándose las ecuaciones 5 y 6 respectivamente (Osíos *et al.*, 2012):

$$\phi(R/k) = \frac{\left(\frac{R}{K}\right)^{1/6}}{21.9 \log\left(\frac{12.2R}{k}\right)} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$k = \frac{12.2R}{R^{1/6} 10^{21.9n}} \quad (\text{Ec. 6})$$

De donde $\phi(R/k)$ es la relación entre el radio hidráulico y el diámetro, R corresponde al radio hidráulico de la sección transversal, k es el diámetro de la partícula. Como el coeficiente de rugosidad varía con la potencia 1/6 del diámetro de la partícula $k^{1/6}$, se utilizó la (Ec. 7) para determinar el valor de n de Manning (Castillo *et al.*, 2009; Osíos *et al.*, 2012; Ponce, 2015).

$$n = \left(\phi(R/k) k^{1/6} \right) \quad (\text{Ec. 7})$$

De donde n es el nuevo coeficiente de rugosidad.

Resultados y discusión

La pendiente del canal hidráulico de campo se determinó utilizando un nivel automático y un estatal, tal como se muestra en la Figura 5, dando como resultado una pendiente para el canal de 1 m/1000 m, es decir, 0.001 m/m.

En función de tablas preestablecidas (valor extraído de tablas en la literatura (Chow, 1982; Noarayanan *et al.*, 2012; Osíos *et al.*, 2012) y del material de construcción de paredes y solera del canal hidráulico de campo (hormigón armado), se determinó el coeficiente de Manning $n = 0.015$ para la sección del canal sin sedimento (Pantaleón *et al.*, 2013; Ospina y Moyano, 2015).

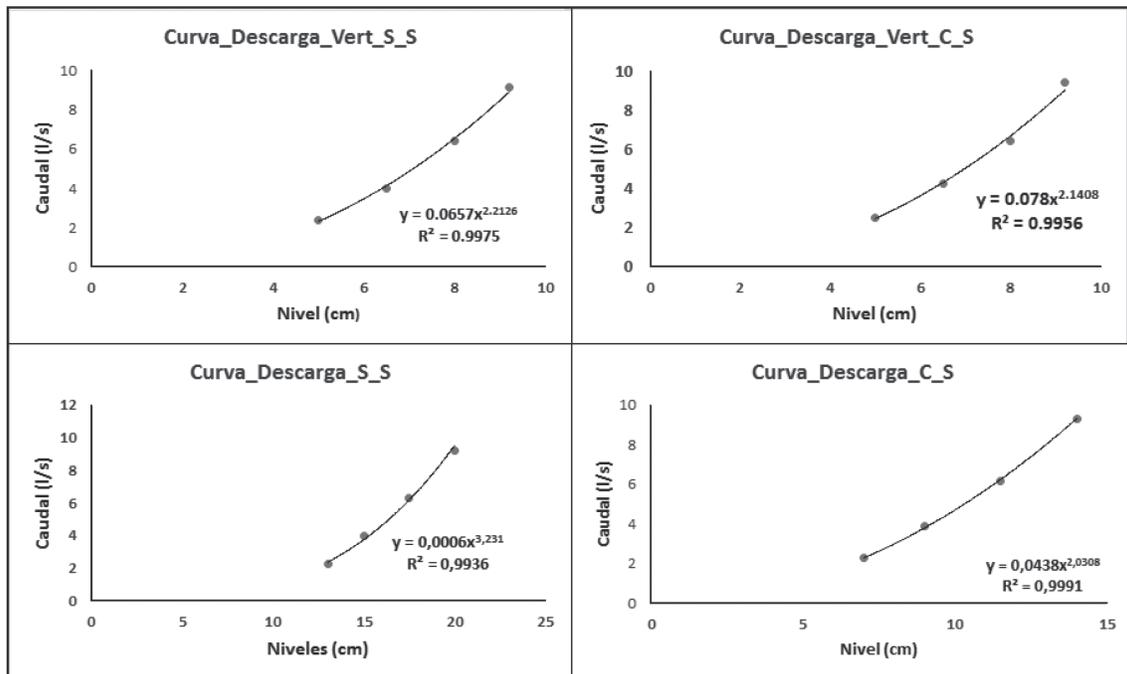
Figura 5.- Trabajo de campo efectuado para medición de la pendiente del prototipo del canal hidráulico.



Efecto del sedimento sobre el caudal

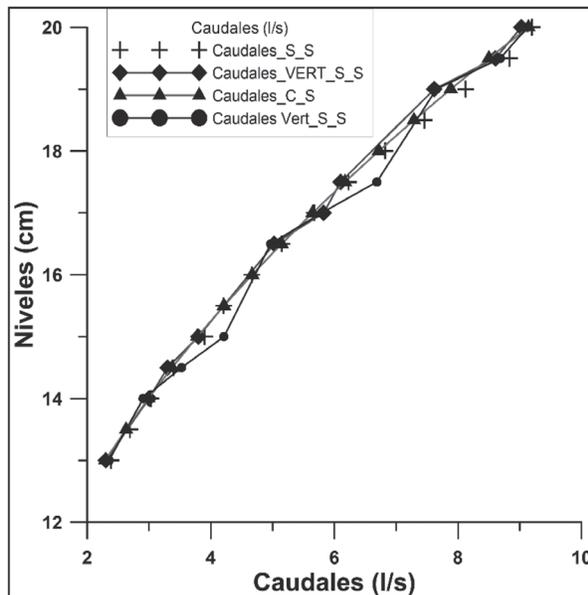
Curvas de descarga. Se realizaron cuatro aforos a distintas profundidades en cada una de las zonas de estudio del prototipo del canal hidráulico de campo; con los aforos y profundidades, se construyeron las curvas de descarga (Figura 6).

Figura 6.- Curvas de descargas de las zonas de estudio en el canal hidráulico.



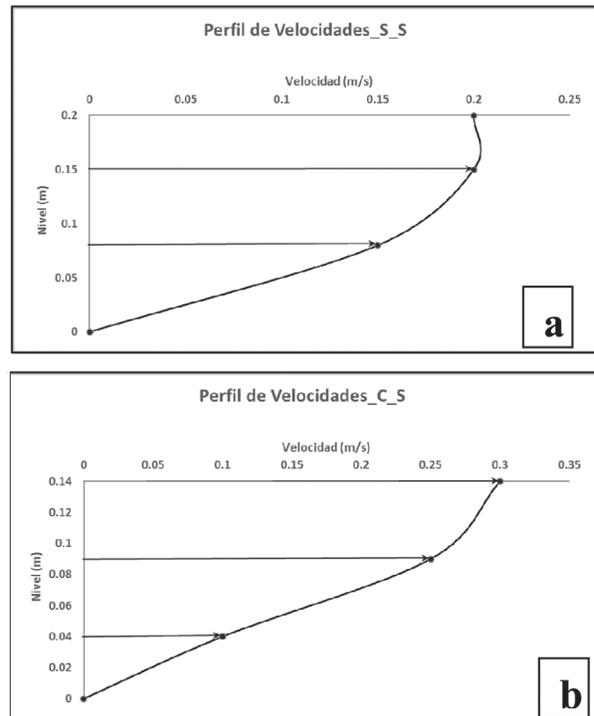
En función de la distribución y ubicación de los puntos de aforos, se dio la línea de tendencia del tipo potencial, siendo este tipo de ajuste el más adecuado para las curvas de descarga (Narea y Tamayo, 2006; Mejía, 2009). Por el coeficiente de correlación R^2 que fue al menos para todos los casos 0.99, ajuste considerado adecuado entre los puntos de aforo. Con las curvas de descarga construidas para cada una de las secciones de monitoreo dentro del prototipo del canal hidráulico de campo, se procedió a determinar el caudal a diferentes alturas, como se puede observar en la Figura 7. Donde primeramente se puede verificar la ley de continuidad, es decir, la cantidad de agua que pasó por la zona sin sedimento fue igual a la que pasó por la cresta del vertedero y, de la misma forma, el caudal que pasó por la zona con sedimento fue igual al caudal que pasó por el vertedero en presencia de sedimento aguas arriba. El coeficiente de correlación entre los caudales de las zonas de monitoreo fue de $R^2 = 0.99$.

Figura 7.- Representación gráfica de los caudales de las zonas de trabajo del canal hidráulico a diferentes alturas.



Efecto del sedimento sobre la velocidad del flujo en el canal. Como se puede observar en la Figura 8, la velocidad cerca de la superficie de la zona C_S (Figura 8b) es mayor a la de la zona S_S (Figura 8a), con valores de 0.3 y 0.2 m/s, respectivamente.

Figura 8.- Gráfico del perfil de velocidades. a) Zona Sin Sedimento, b) Zona Con Sedimento.



Esto se debe a la presencia del sedimento que provoca la reducción de la sección transversal del canal y, por ende, una mayor velocidad. Mientras que la velocidad del flujo en el fondo es mayor en S_S y menor en C_S, valores correspondientes a 0.15 y 0.10 m/s, respectivamente. Esta disminución es producida por partículas del sedimento que actúan como retenedoras del fluido, debido a que se forma un contorno hidráulico rugoso liso (Hambrug, 2015; Serrano, 2017), es decir, los granos de sedimento se encuentran por debajo de la capa viscosa que se forma entre el sedimento y el fluido (Hamburg, 2015), y además, por el diámetro de las partículas (0.05 mm). En caso de existir más transporte de sedimento, esta baja velocidad del fluido ayuda a que las partículas se depositen en el fondo, aumentando el nivel del sedimento y modificando aún más la sección transversal del canal.

Coeficiente de rugosidad ponderado n_c . Como se puede observar en el Cuadro 1, se calcularon los nuevos coeficientes de rugosidad ponderados para diferentes profundidades. Los valores de n_c varían desde un mínimo de 0.022

a un máximo de 0.024, entre los niveles 0.07 m y 0.14 m. Con los coeficientes n_c del Cuadro 1, se determinó un valor medio (0.023). Este valor fue utilizado en la Ec. 4 y se calcularon los nuevos caudales con el coeficiente de rugosidad ponderado de Horton-Einsten. Como se puede observar en el Cuadro 2, los caudales por medio de la ecuación de Manning tienen una diferencia de 0.18 l/s a los calculados con la ecuación de Continuidad.

De la misma manera, el coeficiente de rugosidad ponderado de Horton-Einsten se utilizó en la ecuación de velocidad de Manning (Ec. 2), dando como resultado valores de velocidad muy semejantes a aquellos medidos con el correntómetro, siendo la diferencia de 0.01 m/s. Resultados similares se encontraron en la simulación de velocidades del flujo en el canal, aplicando el software especializado de CFD (Figura 9).

Cuadro 1. Coeficientes de rugosidad ponderada (n_c).

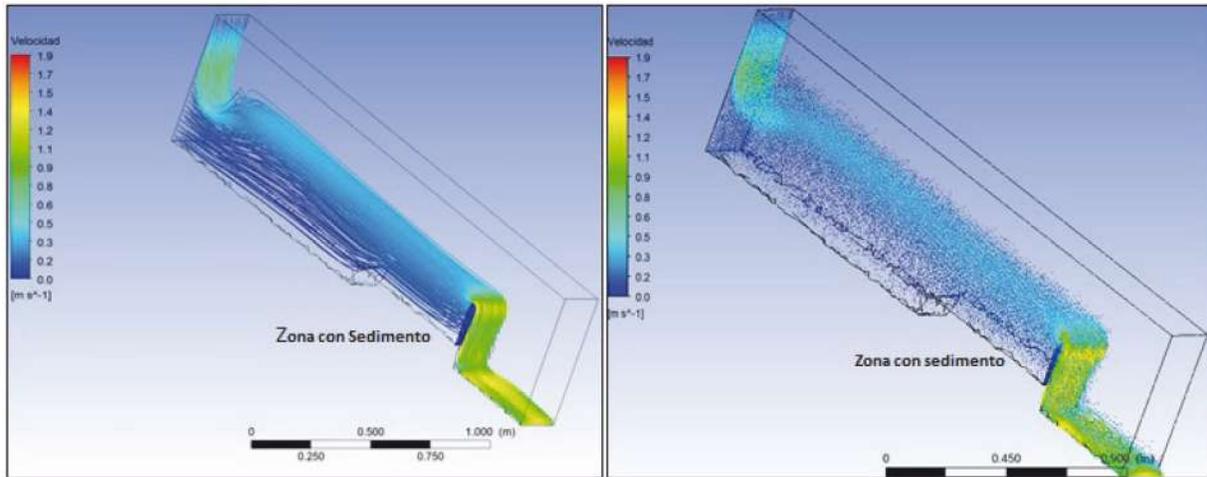
| Nivel (m) | Subsecciones | Perímetro mojado_área | Perímetro Mojado Sección | Coefficiente de Rugosidad | n_c (Horton - Einsten) |
|-----------|--------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0.070 | Área 1 | 0.031 | 0.341 | 0.015 | 0.023 |
| | Área 2 | 0.280 | | 0.024 | |
| | Área 3 | 0.031 | | 0.015 | |
| 0.090 | Área 1 | 0.039 | 0.386 | 0.015 | 0.022 |
| | Área 2 | 0.308 | | 0.024 | |
| | Área 3 | 0.039 | | 0.015 | |
| 0.115 | Área 1 | 0.039 | 0.442 | 0.015 | 0.023 |
| | Área 2 | 0.365 | | 0.024 | |
| | Área 3 | 0.039 | | 0.015 | |
| 0.140 | Área 1 | 0.007 | 0.498 | 0.015 | 0.024 |
| | Área 2 | 0.484 | | 0.024 | |
| | Área 3 | 0.007 | | 0.015 | |

Cuadro 2. Velocidad y caudales con el coeficiente de rugosidad ponderado.

| H | A | P | RH | S | n_c | Velocidad (m/s) | | Caudal (l/s) | |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|---------------|--------------|-------------|
| | | | | | | (Manning) | Correntómetro | (Manning) | Continuidad |
| 0.07 | 0.015 | 0.342 | 0.044 | 0.001 | 0.023 | 0.17 | 0.15 | 2.57 | 2.25 |
| 0.09 | 0.021 | 0.386 | 0.054 | | | 0.20 | 0.19 | 4.14 | 3.99 |
| 0.115 | 0.028 | 0.442 | 0.064 | | | 0.22 | 0.22 | 6.15 | 6.18 |
| 0.14 | 0.038 | 0.498 | 0.076 | | | 0.25 | 0.24 | 9.40 | 9.12 |
| Media | | | | | | 0.21 | 0.20 | 5.57 | 5.39 |
| δ^* | | | | | | 0.33 | | 2.95 | |

* δ = Desviación estándar

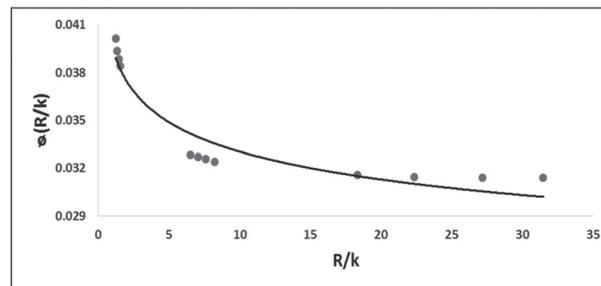
Figura 9. Resultado gráfico de la simulación de las velocidades en presencia de sedimento con CFD.



De acuerdo con la simulación, la velocidad en la zona con sedimento alcanza un valor de 0.27 m/s en el tirante más alto. Este valor es 8% mayor al registrado por el correntómetro (0.25 m/s) y en 10% se incrementa a la velocidad calculada con la ecuación de Manning (0.24 m/s). Estas diferencias pueden deberse al error de medición del correntómetro, además de la precisión del equipo de medición y también por efectos de la simulación.

Coeficientes para determinar «n» en canales con presencia de sedimento $\phi = 0.05$ mm. Una vez graficados los puntos entre la función $\phi(R/k)$ vs. R/k , los cuales se obtuvieron aplicando las ecuaciones 5-6 de acuerdo con su distribución, se les dio una línea de tendencia, siendo esta de tipo potencial, obteniéndose un coeficiente de correlación de 0.92. Como se puede observar en la Figura 10, para un rango amplio de R/K , la variación de la función $\phi(R/k)$ es pequeña, con lo que se puede indicar que existe buena relación entre las dos variables (Osíos *et al.*, 2012). El coeficiente $\phi(R/k)$ de la Ec. 7, es igual a 0.0396, valor obtenido de la línea de tendencia. Este resultado es aproximadamente 5% diferente al valor encontrado por Strickler que es de 0.0342 para ríos de Suiza (Ponce, 2015). Resultados similares encontró Osíos (2012) en su estudio de coeficiente de rugosidad para varios ríos en Venezuela, siendo en este caso, el valor de 0.0336 para la función $\phi(R/k)$.

Figura 10. Representación gráfica entre la función $\phi(R/k)$ y la relación R/k .



Los resultados de la línea de tendencia de la Figura 10 se combinaron con la Ec. 7, estableciendo un modelo para calcular el coeficiente de rugosidad en canales con presencia de sedimento de diámetro con un rango de partícula entre 0.002 mm y 0.050 mm:

$$n = \left(0.0396k^{1/6}\right) \quad \text{(Ec. 8)}$$

Aplicando la Ec. 8 con un diámetro de partícula de sedimento igual a 0.05 mm, se determinó el coeficiente de rugosidad propio para este diámetro de partícula, dando como resultado un $n_c = 0.024$. Este nuevo coeficiente fue aplicado tanto para la velocidad como para el caudal de las ecuaciones de Manning, como se muestran los resultados en el Cuadro 3.

Comparando los dos métodos para determinar el coeficiente de rugosidad «n», el uno con el coeficiente de rugosidad ponderado de Horton-Einsten y el otro, gráficamente entre la relación de la función $\varphi(R/k)$ y el valor del diámetro de las partículas (k), produjeron como resultado 0.023 y 0.024 respectivamente. Estos valores

se aplicaron a las ecuaciones de Manning, demostrando que el método gráfico genera mejores resultados y más cercanos a la realidad del sistema, los cuales fueron comparados con los medidos mediante el correntómetro y el modelo informático del CFD.

Cuadro 3. Velocidades y caudales con el coeficiente de rugosidad gráfico.

| H | A | P | RH | S | n_c | Velocidad (m/s) | | Caudal (l/s) | |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|---------------|--------------|-------------|
| | | | | | | Manning | Correntómetro | Manning | Continuidad |
| 0.070 | 0.015 | 0.342 | 0.044 | | | 0.16 | 0.15 | 2.46 | 2.25 |
| 0.090 | 0.021 | 0.386 | 0.054 | 0.001 | 0.024 | 0.19 | 0.19 | 3.97 | 3.99 |
| 0.115 | 0.028 | 0.442 | 0.064 | | | 0.21 | 0.22 | 5.90 | 6.18 |
| 0.140 | 0.038 | 0.498 | 0.076 | | | 0.24 | 0.24 | 9.01 | 9.12 |
| Media | | | | | | 0.20 | 0.20 | 5.33 | 5.39 |
| δ | | | | | | 0.031 | | 2.82 | |

Conclusiones

El modelo matemático que se determinó mediante el modelo gráfico entre la relación de la función $\varphi(R/k)$ y el valor del diámetro de las partículas (k) para obtener el coeficiente de rugosidad en un canal con presencia de sedimento, aportó mejores resultados en comparación con la ecuación de Horton-Einsten. Cabe mencionar que la Ec. 8 resulta útil y fácil de utilizar, ya que se requiere conocer únicamente el diámetro de las partículas. Se recomienda utilizarla para diámetros que estén entre el rango de 0.002-0.050 mm. Por lo que su aplicabilidad para otros diámetros de partículas está sujeta a una nueva investigación o validar si el modelo de este estudio requiere una modificación o sigue con la tendencia de la Figura 10.

El efecto negativo del sedimento se ve reflejado en las velocidades del flujo a lo largo del canal. La velocidad del flujo en el fondo del canal o solera fue mayor en el tramo sin sedimento que aquel con depósito sedimentario, esto se debe a que las partículas que lo

constituyen, actúan aumentando la rugosidad y como «detenedoras» del flujo. Las bajas velocidades del flujo, hacen que las partículas se azolven, aumentando así la cantidad de sedimento acumulado en el canal. Mientras que las mayores velocidades se dieron en la parte media y superficie de la zona con sedimento, la sección transversal del canal disminuyó y por ende las velocidades del flujo aumentaron.

Agradecimientos

Al señor Alejandro Patiño por la ayuda en la elaboración del vertedero 90° en Playwood con melanina. A la Universidad Nacional de Loja, en especial a la Ing. Natalia Samaniego por el apoyo en los trámites necesarios para poder utilizar el prototipo y poder realizar el trabajo de campo en el canal hidráulico de campo.

Bibliografía

- ACOSTA, E., y Jerson, V. 2016. Evaluación hidrológica-hidráulica de la ciudadela El Recreo en el cantón Duran para el control de Inundaciones. Universidad de Guayaquil.
- AHMAD, N. A., Iswal, S., Ali, Z., Mat, A. M., y S. Musa. 2017. Effect Of Flow Resistance In: *Rectangular Channel*. Vol.7, pp. 1-6. Consultado en: <http://doi.org/10.1051/mateconf/20179701107>.

- ALATORRE, L. C. 2010. Erosión del suelo y fuentes de sedimento en la cuenca del río Ésera (Pirineo Central) Análisis espacial y dinámica temporal mediante técnicas de simulación y teledetección. *Universidad de Zaragoza*.
- ÁLVAREZ, C., Álvarez, A., Quintana, R., y M. Martínez. 2007. Análisis de áreas deforestadas en la región centro-norte de la Sierra Madre Occidental, Chihuahua, México. *Tecnociencia Chihuahua 1(1)*:36-43.
- BASILE, P., Riccardi, G., y Stenta, H. 2005. Modelación de la producción de sedimentos a escala de cuenca en el sistema de la producción. *Ao Ludueña (1)*:1-16.
- BUSTAMANTE, M., y J. L. Alvarez. 2011. Determinación de las zonas vulnerables a erosión hídrica en la cuenca alta del río catamayo por medio de sistemas de información geográfica. Universidad Nacional de Loja.
- BUSTOS, P., y J. Montoya. 2015. Desarrollo de software para la comparación de la velocidad de un canal abierto utilizando el factor de fricción de Darcy-Weisbach y la ecuación de Manning. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas.
- CABALLERO, L. A., Rimmer, A., Z. M. Easton y T. S. Steenhuis. 2012. Rainfall runoff relationships for a cloud forest watershed in Central America: implications for water resource engineering. *Jornal of the American Water Resources Association 48*:1022-1031.
- CASTILLO, L., J. P. Martin y M. Marin. 2009. Coeficientes de resistencia, transporte de sedimentos y caudal dominante en regiones Semiáridas: 1-10.
- CHOW, V. T. 1982. Hidráulica de canales abiertos. M. Suárez, Ed. Colombia.
- CRESPO, P., R., Céleri, B Ochoa, I. Cárdenas, V. Iñiguez y P. Borja. 2014. Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. Avances.
- DELGADO, M. I., F. Gaspari y G. Senisterra. 2013. Tendencia de cambio espacio - temporal del escurrimiento superficial en una cuenca serrana. *Tecnociencia Chihuahua 7(2)*:99-109.
- FAHMY, M. R. 2015. Effect of sediment deposition on the efficiency of Fayoum weir. *Flow Measurement and Instrumentation 46*:133-138.
- GARCÍA, T., y A. Montoya. 2006. Monitoreo de la cuenca hidrográfica del canal de Panamá. Panamá.
- HAMBURG, G. 2015. Ingeniería Hidráulica.- Transporte de sedimento.
- JUNES, D. 2012. Sedimentación del reservorio poechos y propuesta de alternativas para su afianzamiento. *Piura*.
- LOPEZ, R. 2002. Métodos para la determinación del coeficiente de resistencia al flujo en cauces de rugosidad heterogénea. *Ciencia y Técnica 69*:11-17.
- MAHAPATRA, S., Patra, K., y A. Pradhan. 2016. Flow Analysis and Its prediction methods for Compound Channels: 1-10.
- MEJÍA, D. 2009. Variabilidad Temporal y espacial de la cantidad y calidad de agua en la cuenca del río San Francisco, Zamora Chinchipe. *Universidad Nacional de Loja*.
- MENESES, R. 2005. Variación en la generación de caudales y de sedimentos en suspensión, con énfasis en eventos de tormenta para una microcuenca de la provincia de Valdivia, Décima Región. *Universidad Austral de Chile*.
- MORGAN, R. 2005. Soil Erosion and Conservation. *Cranfield University, Oxford*.
- NAREA, D., y M. Tamayo. 2006. Transporte de Sedimento en Suspensión en Ríos de Montaña. *Universidad de Cuenca*.
- NOARAYANAN, L., Murali, K., y V. Sundar. 2012. Manning's «n» coefficient for flexible emergent vegetation in tandem configuration. *Hydro-Environment Research 6*:51-62.
- OCHOA, P. A., A. Fries, D. Mejía, J. I. Burneo, D. Ruíz-Sinoga y A. Cerdà. 2016. Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk in a semiarid basin of the Andes. *Catena 140*:31-42. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.011>
- OSÍOS, M., F. Valencia, E. Ventura y H. Cartaya. 2012. Cálculo del coeficiente de rugosidad «n» de manning en los grandes ríos de Venezuela .
- OSPINA, E., y Y. Moyano. 2015. Evaluación del aprovechamiento para consumo humano del agua de lluvia en una microcuenca urbana de Ibagué. *Ingenium 9*:11-22.
- PANTALEÓN, J., P. Perèz, R. Cordero, A. Torres y J. Feliz. 2013. Determinación del coeficiente de rugosidad para encachado usado en el revestimiento de cunetas en la República Dominicana. *Ciencia y Sociedad 38*:551-568.
- PONCE, V. 2015. Fundamentos de la Hidráulica de canales. In Fundamentos de la Hidráulica de canales. Retrieved from <http://site.ebrary.com/lib/bibliotecauplsp/detail.action?docID=10844701&p00=hidrologia>.
- SAMANIEGO, N. 2009. variabilidad espacial y temporal de la producción de sedimentos en suspensión en la cuenca del río San Francisco, Zamora Chinchipe. *Universidad Nacional de Loja*.
- SERRANO, J. 2017. Transporte de Sedimentos.- *Apuntes de Clase. Loja-Ecuador*.
- SILVEIRA, L., Alonso, J., y Martínez, L. 2006. Efecto de las plantaciones forestales sobre el recurso agua en el Uruguay. *Agrociencia 10(2)*:75-94.
- TARBOTON, D. G. 2003. Rainfall -runoff process. in rainfall. *Runoff Process: 1-159*.
- UNESCO. 2010. Procesos de erosión - sedimentación en cauces y cuencas. J. Brea & F. Balocchi, Eds.
- VICTORIA, J. 1999. Sedimentos fluviales - riesgo para obras de infraestructura. Guatemala.
- VIRAMONTES-OLIVAS, O., V. Reyes-Gómez, A. Rangel-Rodríguez, C. Ortega-Ochoa, R. Soto-Cruz y J. Caramillo-Acosta. 2012. Papel hidrológico-ambiental de pastizales nativos e introducidos en la cuenca alta del río Chuvíscar, Chihuahua, México. *Tecnociencia Chihuahua 6(3)*:181-193. 

Este artículo es citado así:

Diego Mejía y Holger Benavides-Muñoz. 2017. Cálculo del coeficiente de rugosidad "n" para canales trapezoidales con presencia de sedimento ($\emptyset = 0.05$ mm). *TECNOCIENCIA Chihuahua 11(2)*:69-81.

Resumen curricular del autor y coautores

HOLGER M. BENAVIDES-MUÑOZ. En 1999 le fue otorgado el título de Ingeniero Civil por la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL). En 2005 obtuvo el Certificado Internacional del BID en "Formulación y gerencia de proyectos" de la Universidad Politécnica Nacional (BID-UPN), además en el mismo año le confirieron su título de Maestría en "Gerencia de proyectos para el desarrollo" en la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Su grado de especialista universitario en "Gestión urbana del agua" lo obtuvo el 2007 en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y obtuvo su título de Doctor en "Ingeniería hidráulica y medio ambiente" el año 2010 en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Actualmente es docente investigador titular principal de la sección de Recursos Hídricos del Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil en la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL). Ha dirigido proyectos de investigación relacionados con la eficiencia hidráulica y energética en abastecimientos, gestión urbana de sistemas de agua, sectorización y balance hídrico de redes, detección y localización de fugas, y temas relacionados al desarrollo sostenible, diseño económico de redes, diagnóstico de sostenibilidad - ISA, valoración contingente de recursos hídricos, diseño de sistemas de fluidos en edificios, hidráulica a presión y valoración de impactos ambientales, entre otros. Es autor de artículos científicos, conferencias y ponencias en congresos nacionales e internacionales, capítulos de libros científicos. Es autor de 5 aplicaciones técnicas con Registro de Propiedad (IEPI). Es evaluador de proyectos de investigación y formativos de posgrado del CES (ante la Comisión Permanente de Posgrados del Consejo de Educación Superior - (CES - Ecuador) y es árbitro de cuatro revistas científicas de circulación internacional.