

TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la Escuela de Ingeniería Agrícola como
requisito parcial para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

DISEÑO DE NUEVA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR DE
RESISTENCIA AL FLUJO DE CORRIENTES MEÁNDRICAS ALUVIALES

CRISTOPHER ALEXANDER GAMBOA MONGE

CARTAGO, 2018

DISEÑO DE NUEVA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR DE
RESISTANCIA AL FLUJO DE CORRIENTES MEÁNDRICAS ALUVIALES

Cristopher Alexander Gamboa Monge

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la Escuela de Ingeniería Agrícola como
requisito parcial para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

Isabel Guzmán Arias
Asesor

Marvin Villalobos Araya
Director Escuela de
Ingeniería Agrícola

TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
CARTAGO, COSTA RICA

2018

El presente trabajo fue supervisado por la doctora Ana Maria Ferreira da Silva, quien es profesora en el Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería y Ciencia Aplicada de Queen's University, Kingston, Ontario, Canadá.

Dedicatoria

A mi madre Yamilette Monge Carranza, mi padre Alexander Gamboa Pacheco, y mi hermana Dahayana Gamboa Monge, por el apoyo incondicional y la motivación constante durante todo este proceso.

Agradecimientos

Primeramente, agradezco enormemente a YHWH por ser bondadoso, permitirme estar saludable y brindarme sabiduría, durante todos y cada uno de mis días.

Además, agradezco a los miembros de mi familia por el apoyo incondicional, en especial a mi madre Yamilette, mi padre Alexander y mi hermana Dahayana. Asimismo, ofrezco mi más sincero agradecimiento a Valeria Marín Guillén y su familia, por su motivación y ayuda mostrada en distintas maneras.

A los profesores y personal administrativo de la Escuela de Ingeniería Agrícola del Tecnológico de Costa Rica, por su asesoramiento y motivación para mantenerme en el proceso. Igualmente, un sincero agradecimiento a la Vicerrectoría de Vida Estudiantil y Servicios Académicos del Tecnológico de Costa Rica, por el apoyo en procesos académicos y financiamiento parcial.

De igual manera, las gracias son extendidas a los profesores y personal administrativo de Queen's University, Kingston, Canadá, por brindarme la oportunidad de formar parte de tan prestigiosa institución.

Finalmente, agradezco a mis amigos, por el apoyo mostrado y compañía en muchos momentos de este proceso. Y a Laura Segura, Chris Trimmer, Cornel Florea, Shane Singh, Brennen Heenan, Daniel Perry y demás amigos, quienes me ayudaron de muchas maneras durante mi estancia en Canadá, e hicieron de esta experiencia algo inolvidable.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	ii
1 INTRODUCCIÓN.....	4
2 OBJETIVOS	6
2.1 OBJETIVO GENERAL	7
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	8
3.1 PRINCIPIOS DE LA TEORÍA DE DIMENSIONES	9
3.1.1 CUANTIDADES DIMENSIONALES Y ADIMENSIONALES.....	9
3.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LAS CORRIENTES MEÁNDRICAS	
10	
3.3 CINEMÁTICA DE LAS CORRIENTES MEÁNDRICAS.....	11
3.4 FUNDAMENTOS DE LA NUEVA PROPUESTA	12
3.5 REVISIÓN DE LAS PROPUESTAS ANTERIORES	14
3.5.1 MÉTODO DEL SERVICIO DE CONSERVACIÓN DE SUELOS DE LOS	
ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA (SCS) (1963)	14
3.5.2 MÉTODO LINEALIZADO DEL SERVICIO DE CONSERVACIÓN DE	
SUELOS DE LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA (LSCS) (1963)	14
3.5.3 MÉTODO DE LEOPOLD ET AL. (1960)	15
3.6 ENFOQUE DE LA NUEVA PROPUESTA	16
3.7 IMPACTO ECONÓMICO	18
3.8 IMPACTO SOCIAL	19
3.9 IMPACTO AMBIENTAL	19
4 METODOLOGÍA.....	20
4.1 VARIABLES QUE DETERMINAN $1/c_M^2$	21
4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS EXPERIMENTALES	22
4.3 ANÁLISIS PRELIMINAR DE LOS DATOS	24
4.4 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE INGRESO	28
4.5 EVALUACIÓN DE IMPACTO ECONÓMICO	29
4.6 EVALUACIÓN DE IMPACTO SOCIAL.....	29

4.7	<i>EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL</i>	30
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	31
5.1	<i>ECUACIÓN PARA $1/c_M^2$</i>	32
5.2	<i>RESULTADOS DEL NUEVO MÉTODO</i>	33
5.3	<i>COMPARACIÓN CON LOS MÉTODOS ANTERIORES</i>	35
5.4	<i>IMPACTO ECONÓMICO</i>	40
5.5	<i>IMPACTO SOCIAL</i>	41
5.6	<i>IMPACTO AMBIENTAL</i>	41
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	42
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
	<i>BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA</i>	46
	<i>FUENTES DE DATOS</i>	49
	ANEXOS	51
	<i>ANEXO A – ECUACIONES PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LAS DUNAS Y ONDULACIONES (DA SILVA Y YALIN, 2017)</i>	52
	<i>ANEXO B – DETALLES DEL DESARROLLO DE LA NUEVA ECUACIÓN</i>	54
	<i>ANEXO C – PLOTEOS ADICIONALES</i>	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de definición: terminología pertinente y cantidades relacionadas a la geometría de las corrientes meándricas. Fuente: da Silva, 2015.	11
Figura 2. Cinemática de las corrientes meándricas. Fuente: da Silva, 2015.	12
Figura 3. Esquema de definición. Fuente: da Silva et al., 2008.	13
Figura 4. Comportamiento relativo de B/Ra con respecto a los cambios de θ_0 . Fuente: Yalin y da Silva, 2001.	13
Figura 5. Ejemplo de las características típicas de un río meándrico. Izquierda: en el círculo rojo es posible observar una barra en el banco interno del meandro; derecha: es un acercamiento a la misma barra puntual mostrada en la figura de la izquierda. Brazos River, West of Monaville, Texas, United States of America. Fuente: Google Earth, Landsat Copernicus, 2018.	18
Figura 6. Contribución de la condición meándrica de la corriente sobre la resistencia general al fluir. Nótese que, para los datos bajo consideración, $(1/c_M^2)/(1/c^2)$ varía desde $\approx 0,02$ hasta $\approx 0,86$	25
Figura 7. Variación de los valores de $1/c_M^2$ con respecto a los valores de θ_0 , para datos ordenados según B/h_{av}	26
Figura 8. Dependencia de los valores de $1/c_M^2$ sobre los valores de B/h_{av}	27
Figura 9. Dependencia de los valores de $1/c_M^2$ sobre los valores de h_{av}/D_{50}	28
Figura 10. Patrón de la nueva ecuación para $1/c_M^2$ (Ec. (28)) para valores de $h_{av}/D_{50} = 10$ (izquierda) y $h_{av}/D_{50} = 5000$ (derecha), y valores seleccionados de B/h_{av}	32
Figura 11. Comparación de los valores de velocidad promedio calculados versus medidos para el nuevo método. Superior izquierda: ploteo de los valores de u_{av} calculados versus medidos; superior derecha: ploteo de los residuos; inferior: función de densidad de probabilidad de los residuos.	34
Figura 12. Caudales calculados versus medidos obtenidos por medio del nuevo método.	35
Figura 13. Comparación de los valores de velocidad promedio calculados versus medidos para el método de da Silva y Yalin (2017). Izquierda: ploteo de los valores de u_{av} calculados versus medidos; derecha: ploteo de los residuos.	36
Figura 14. Caudales calculados versus medidos obtenidos por medio del método de da Silva y Yalin (2017).	37

Figura 15. Comparación de los valores de velocidad promedio calculados versus medidos para el método SCS (1963). Izquierda: ploteo de los valores de u_{av} calculados versus medidos; derecha: ploteo de los residuos.	39
Figura 16. Comparación de los valores de velocidad promedio calculados versus medidos para el método LSCS (1963). Izquierda: ploteo de los valores de u_{av} calculados versus medidos; derecha: ploteo de los residuos.	39
Figura 17. Comparación de los valores de velocidad promedio calculados versus medidos para el método de James y Wark (1992). Izquierda: ploteo de los valores de u_{av} calculados versus medidos; derecha: ploteo de los residuos.	39
Figura A1. Diagrama de regiones existentes de dunas y ondulaciones (da Silva y Yalin, 2017).	53
Figura B1. Dependencia de los valores de $1/c_M^2$ sobre B/h_{av} . La línea sólida horizontal en color negro indica que $(1/c_M^2)_{Med} / (1/c_M^2)_{Calc} = 1$	55
Figura B2. Tendencia de los valores $(1/c_M^2)_{Med} / (1/c_M^2)_{Calc}$ respecto a los valores de h_{av}/D_{50} . La línea sólida horizontal en color negro indica que $(1/c_M^2)_{Med} / (1/c_M^2)_{Calc} = 1$; las líneas en color naranja son provenientes de las Ecs. (32) y (33).	56
Figura C1.1. Función de densidad de probabilidad de los residuos para los siguientes métodos: da Silva y Yalin (2017) (superior izquierda); SCS (1963) (superior derecha); LSCS (1963) (inferior izquierda); James y Wark (1992) (inferior derecha).	57
Figura C2.1. Tasas de flujo (caudales) calculados versus medidos obtenidos a partir del método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América (SCS) (1963).....	58
Figura C2.2. Tasas de flujo (caudales) calculados versus medidos obtenidos a partir del método Linealizado del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América (LSCS) (1963).....	58
Figura C2.3. Tasas de flujo (caudales) calculados versus medidos obtenidos a partir del método de James y Wark (1992).	58

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Resumen de la base de datos utilizada en este trabajo (consta de un total de 40 experimentos de laboratorio y 285 observaciones de campo).	23
Cuadro 2. Porcentajes de los valores de calculados dentro de los diferentes rangos de error para el nuevo método.....	34
Cuadro 3. Porcentajes de los valores de velocidad promedio del flujo u_{av} , dentro de los diferentes rangos de error para el método nuevo método, el método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América (SCS), el método Linealizado del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América (LSCS) y el método de James y Wark.....	40

LISTA DE SÍMBOLOS

g	=	Aceleración debida a la gravedad.	τ_i	=	Esfuerzo cortante adicional inducido por la curvatura del canal.
h_{av}	=	Tirante promedio.	τ_s	=	Esfuerzo cortante asociado a la fricción.
S_c	=	Pendiente del río.	τ_0	=	Esfuerzo cortante total.
R_h	=	Radio hidráulico.	$(\tau_0)_f$	=	Esfuerzo cortante debido a la rugosidad de la superficie.
B	=	Ancho de solera.	$(\tau_0)_\Delta$	=	Esfuerzo cortante debido a las irregularidades de la cama del río.
ν	=	Viscosidad cinemática del fluido.	$(\tau_0)_M$	=	Esfuerzo cortante debido a la condición meándrica del río.
ν_*	=	Velocidad cortante promedio o velocidad de fricción promedio.	γ_s	=	Peso específico de las partículas en el fluido.
D_{50}	=	Tamaño medio de las partículas del material de la cama.	ρ	=	Peso específico del agua.
D_{84}	=	Percentil octogésimo cuarto para representar la fracción gruesa de sedimentos.	l_c	=	Coordenada longitudinal a lo largo de la línea central de un flujo meándrico.
k_s	=	Altura de la rugosidad granular.	L	=	Longitud del meandro medida a lo largo de la línea central del río.
Re	=	Número de Reynolds.	θ	=	Ángulo de deflexión (en el punto l_c).
Re_*	=	Número de Reynolds cortante o bajo condiciones de rugosidad.	θ_0	=	Ángulo de deflexión de un flujo meándrico en la sección transversal O_i (en el punto $l_c = 0$).
Fr	=	Número de Froude.	σ	=	Sinuosidad de un flujo meándrico.
n	=	Coefficiente de fricción de Manning.	R_m	=	Radio medio de la curvatura.
n'	=	Coefficiente de fricción de Manning modificado.	R_a	=	Radio medio de la curvatura medido en el vértice.
f	=	Coefficiente de fricción de Darcy Weisbach.	A_M	=	Longitud de la onda del meandro.
f'	=	Coefficiente de fricción de Darcy Weisbach modificado.	Δ	=	Altura de la barra (Δ_b) o profundidad del pozo (Δ_p).
c	=	Coefficiente de fricción de Chézy.			
κ	=	Constante de von Kármán.			
Π_A	=	Contraparte adimensional de la cifra A.			

B_s = Función de rugosidad.
 $J_0(\theta_0)$ = Función de Bessel.
 η_* = Intensidad del flujo.
 X = Tamaño de partícula
número de Reynolds.
 Y = Número de movilidad.
 Z = Profundidad relativa.
 Ξ^3 = Número de material.

δ_d = Inclinación de las dunas.
 \mathcal{A}_d = Longitud de las dunas.
 δ_r = Inclinación de las
ondulaciones.
 \mathcal{A}_r = Longitud de las
ondulaciones.
 u_{av} = Velocidad promedio del
flujo.
 Q = Caudal promedio del río.

RESUMEN

El presente estudio constituye un nuevo aporte a la metodología utilizada en la evaluación del factor de resistencia de las corrientes meándricas aluviales de origen natural. El conocido enfoque de “resistencia dividida”, comúnmente adoptado en la actualidad para corrientes rectas con irregularidades en el fondo (cama), se amplía para incluir la resistencia adicional debido a la condición meándrica de las corrientes. Para dicho análisis son evaluados 40 experimentos de laboratorio y 285 observaciones de campo, donde se encuentra que la contribución a la resistencia global por la condición meándrica de la corriente, puede variar desde insignificante hasta muy sustancial, dependiendo de la geometría de la misma y de las condiciones del flujo.

Se determina que, los componentes más influyentes sobre el factor de resistencia en condiciones meándricas, dependen de relación entre el tirante del flujo (h_{av}) y el tamaño promedio de las partículas en el fondo de la corriente (D_{50}), así como del ángulo de deflexión del flujo méandrico en la sección transversal (θ_0), y de la relación entre el ancho de solera de la corriente y del tirante promedio (B/h_{av}); generando de esta manera una expresión matemática que contempla dichas condiciones. El método propuesto se basa en la comprensión actual de la estructura mecánica de los flujos meándricos; lo cual genera mayor certeza en los cálculos de los parámetros hidráulicos de las corrientes, y aumenta la precisión y exactitud en la predicción de velocidades promedio del flujo, brindando una herramienta de gran valor para el gestor del recurso hídrico.

PALABRAS CLAVES

Curvatura de la corriente, ecuación de resistencia, factor de resistencia, movimiento circulatorio-transversal, resistencia al flujo, resistencia dividida.

ABSTRACT

This paper aims to be a contribution to the evaluation of the resistance factor of the alluvial meandering streams of natural origin. The well-known “divided resistance” approach, commonly adopted nowadays for straight streams with a bed covered by ripples and dunes is extended to include an additional term that considers the resistance due to the meandering of the stream. For the present analysis, 40 laboratory experiments and 285 field observations are evaluated, where it is found that the contribution of the meandering of the stream to its overall resistance may vary from negligible to very substantial, which depends of the stream geometric and flow conditions.

In addition, it is determined that the most influential components for the resistance factor in meandering conditions depend on the relation between channel-averaged flow depth (h_{av}) and the average grain size of the bed material (D_{50}), as well as the deflection angle of a meandering flow at the crossover O_i (θ_0), besides it depends on the relation between flow width (B) and the channel-averaged flow depth (h_{av}); these relations generate a mathematical expression capable to predict the resistance to flow due to the meandering of the stream. Finally, the results are explained in view of the present understanding of the mechanical structure of meandering flows; which, based on the above-mentioned considerations, it is possible to predict with a higher accuracy the existing influence on natural streams, generating greater certainty in the real hydric capacities, which jointly improves the management of the water source.

KEYWORDS

Cross-circulatory motion, divided resistance, resistance equation, resistance factor, resistance to flow, stream curvature.

1 INTRODUCCIÓN

La morfodinámica fluvial es el estudio del fondo del cauce y de las formas adquiridas por la cama del río en respuesta a los fenómenos de erosión y sedimentación. En el contexto de la morfodinámica de ríos, es esencial estudiar las pérdidas de energía en las corrientes meándricas, debido que determinan la resistencia al flujo de una corriente que presenta encorvaduras o serpenteos (Chow, 1976).

A través del tiempo, varios métodos han sido propuestos para establecer la resistencia adicional al fluir debido a la condición meándrica de las corrientes. Dichos métodos van desde enfoques simples, que contemplan ajustes empíricamente determinados de los factores de fricción hasta enfoques más complejos, tales como formulaciones basadas teóricamente en términos de las variables geométricas y del flujo. De acuerdo a James (1994), los métodos existentes para predecir las relaciones de fase-descarga para canales dan resultados conflictivos, y no han sido verificados fidedignamente con datos independientes.

Algunos de los métodos más prominentes para cuantificar la resistencia al flujo en corrientes meándricas son los siguientes: método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América (SCS) (1963), método Linealizado del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América (LSCS) (1963), y el método de Leopold et al. (1960) el cual fue subsecuentemente modificado por James y Wark (1992). Estos métodos fueron desarrollados bajo diferentes condiciones y algunos de ellos consideran más variables que otros. Por otra parte, debe ser notado que la mayoría de los métodos no toma en cuenta suficientes variables geométricas, e incluso las condiciones del flujo son usualmente despreciadas como parámetros de las ecuaciones (da Silva y Yalin, 2017).

James (1994), quien realizó pruebas en algunos de los métodos existentes con diferentes datos, demostró que ignorar las pérdidas debidas a las curvaturas, genera enormes errores que son inaceptables cuando se trata de predecir la descarga de las corrientes, y además que algunos métodos dan peores resultados que otros. Esto resalta el hecho que, es necesario analizar los métodos anteriores con el objetivo de verificar cuál es el nivel de error en los resultados, y buscar un nuevo método para resolver este tipo de problemas, donde se tome en cuenta la factibilidad de la aplicación de una metodología en la práctica (da Silva y Yalin, 2017).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Crear una nueva metodología para predecir la velocidad promedio del flujo, tomando en cuenta la capacidad de transporte de sedimentos del flujo en corrientes meándricas, y considerando el efecto de las curvaturas en la pérdida de energía.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar los métodos existentes para predecir la velocidad promedio del flujo y la capacidad de desplazamiento de la corriente;
- Predecir la velocidad promedio del flujo y la capacidad de desplazamiento de la corriente mediante la creación y aplicación de una nueva metodología, para cuantificar las pérdidas originadas por las curvaturas en corrientes meándricas, considerando las variables geométricas y del flujo.
- Evaluar el nivel de mejora en las predicciones, haciendo uso de la nueva metodología en comparación con los métodos anteriores.
- Describir los beneficios económicos, sociales y ambientales derivados de la aplicación de la nueva metodología.

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 PRINCIPIOS DE LA TEORÍA DE DIMENSIONES

3.1.1 CUANTIDADES DIMENSIONALES Y ADIMENSIONALES

Una cantidad es una entidad que puede ser medida y expresada en números. Ningún límite puede ser impuesto sobre la naturaleza y número de las cantidades usadas en las ciencias físicas. Sin embargo, cada una de estas cantidades (número ilimitado) puede ser considerado y tratado simplemente como un arreglo diferente del mismo número limitado de las cantidades (k) – referido como cantidades fundamentales. Convencionalmente $k = 3$, y las cantidades fundamentales son la longitud, el tiempo y la masa (da Silva y Yalin, 2017).

Ahora, tomando L , T y M como las unidades seleccionadas para longitud, tiempo y masa; entonces es claro a partir de lo antes mencionado, que la unidad de cualquier otra cantidad a , viz $[a]$, debe ser ciertamente función de L , T y M :

$$[a] = f_a(L, T, M). \quad (1)$$

El subíndice a en f_a refleja el hecho que la función de la derecha puede variar dependiendo de la naturaleza física de a . La relación de dos diferentes valores numéricos de a no puede depender de la selección de las unidades fundamentales. Considerando esto, se puede demostrar que la función f_a debe tener la forma de producto-potencia

$$[a] = L^\alpha T^\beta M^\omega \quad (2)$$

donde α , β y ω varían dependiendo de la naturaleza física de a .

La cantidad a (la cual no es longitud, tiempo, o masa) es referida como una cantidad derivada, y su unidad $[a]$ también es una unidad derivada. La expresión de la unidad de una cantidad derivada a en términos de las unidades fundamentales, esto es, el lado derecho de la Ec. (2) es conocido como la dimensión de a (da Silva y Yalin, 2017).

La cantidad a , se espera que sea una cantidad dimensional si al menos uno de sus exponentes α , β y ω , no es cero. Una cantidad dimensional a encontrada en mecánica es

$$\begin{aligned} &\text{una cantidad geométrica si } \alpha \neq 0; \beta = 0; \omega = 0, \\ &\text{una cantidad cinemática si } \alpha \neq 0; \beta \neq 0; \omega = 0, \\ &\text{una cantidad dinámica si } \alpha \neq 0; \beta \neq 0; \omega \neq 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Ahora, si todos los exponentes en la Ec. (2) son cero, esto es si:

$$\alpha = \beta = \omega = 0 \text{ y por lo tanto } [a] = L^0 T^0 M^0 = 1, \quad (4)$$

entonces a es una cantidad adimensional.

Las Ecs. (3) y (4) indican que la unidad y el valor numérico de una cantidad dimensional es dependiente de la selección de las unidades; la unidad y el valor numérico de una cantidad adimensional es independiente de la selección de las unidades fundamentales. (Las cantidades dimensionales tienen los mismos valores numéricos en todos los sistemas de unidades) (da Silva y Yalin, 2017).

3.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LAS CORRIENTES MEÁNDRICAS

De acuerdo con da Silva (2015) las corrientes meándricas exhiben diferentes anchos de solera y tirantes, así como diferentes distribuciones de tamaños de partículas, regímenes de flujo, etc., y en cualquier corriente dada, las condiciones pueden variar desde extensiones pequeñas hasta grandes, o de una curva de un meandro a otra. No obstante, a pesar de esas diferencias, las corrientes meándricas comparten algo esencial que define sus propiedades geométricas. Estas propiedades son descritas a continuación:

- **Longitud de onda del meandro:** de acuerdo a los trabajos de Inglis (1947), Leopold y Wolman (1957), y Zeller (1967), es claro que la longitud de onda del meandro A_M (ver Figura 1) es directamente proporcional al ancho de solera B , esto es:

$$A_M = n_M B \quad (5)$$

donde n_M es el factor de proporcionalidad.

- **Forma del plano de una corriente meándrica:** de acuerdo a Leopold and Langbein (1966), las líneas centrales de una corriente meándrica natural regular, siguen cercanamente un patrón de una “curva generada sinusoidalmente”. Esta afirmación fue introducida debido que los autores antes mencionados hicieron una aproximación, que resulta de la derivación probabilística de la trayectoria del meandro por von Schelling (1951), que se apoyó en el postulado que para una longitud dada entre dos puntos A y B (dos cruces consecutivos), una curva meándrica adquirirá la forma correspondiente a la curvatura total (promedio) mínima (da Silva y Yalin, 2017).

pequeña, se deduce que el comportamiento del plano de las oscilaciones laterales del flujo, se refleja de manera muy adecuada, por la contraparte verticalmente promediada del flujo tridimensional real.

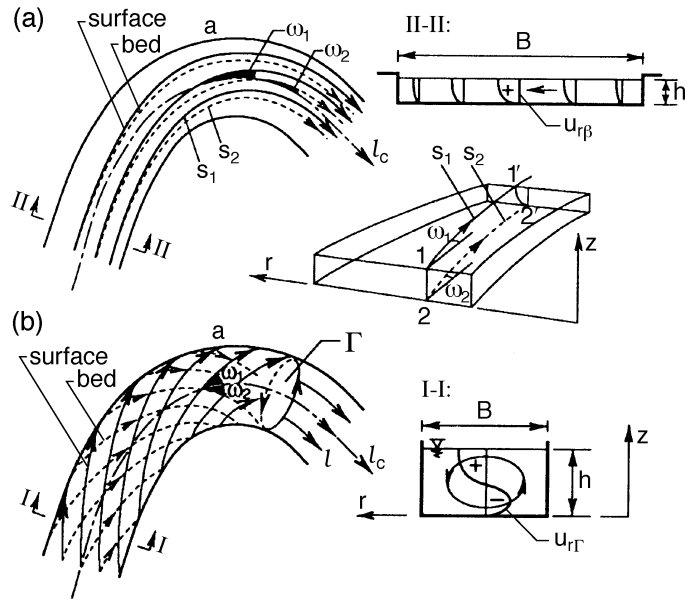


Figura 2. Cinemática de las corrientes meándricas. Fuente: da Silva, 2015.

3.4 FUNDAMENTOS DE LA NUEVA PROPUESTA

La resistencia al flujo puede ser expresada con la ayuda de la ecuación de resistencia de Chézy, es decir

$$u_{av} = c \sqrt{g S_c R_h}, \quad (6)$$

en la cual c es el factor de resistencia al flujo de Chézy (adimensional).

De acuerdo con Langbein y Leopold (1966), las líneas centrales de las corrientes pueden ser idealizadas como curvas generadas sinusoidalmente, dado por $\theta = \theta_0 \cos [2\pi (l_c / L)]$, en el cual θ es el ángulo de deflexión (ver el esquema de la Figura 3), θ_0 es el ángulo de deflexión de un flujo meándrico en la sección transversal O_i (Figura 3), l_c es la coordenada longitudinal a lo largo de la línea central de un flujo meándrico ($l_c = 0$ en la sección transversal O_i), y L es la longitud del meandro medida a lo largo de la línea central del canal. Como es mostrado en da Silva y Yalin (2017), la curvatura de la línea central de las corrientes generadas sinusoidalmente es dada por $B/R = [\theta_0 J_0 (\theta_0)] \text{sen} [2\pi (l_c / L)]$, donde B es el ancho de solera y $J_0 (\theta_0)$ es la función de Bessel de primer orden y de tipo cero de θ_0 .

Como sigue a partir de esta expresión, las curvas generadas sinusoidalmente exhiben una variación continua de la curvatura de la línea central a lo largo de la dirección de la corriente: $|B/R|$ es igual a cero en la sección transversal O_i y alcanza un máximo valor de B/R_a en el vértice a_i :

$$B/R_a = \theta_0 J_0(\theta_0). \quad (7)$$

El gráfico de B/R_a es mostrado en la Figura 4. Obsérvese que con el incremento de θ_0 , la curvatura relativa B/R_a incrementa primero desde cero en adelante, alcanzado un valor máximo en $\theta_0 = 70^\circ$ y después comienza a decrecer según el valor de θ_0 incrementa hasta $\approx 126^\circ$ (este es el punto en el que las curvas del meandro llegan a entrar en contacto una con otra, y el patrón meándrico es destruido).

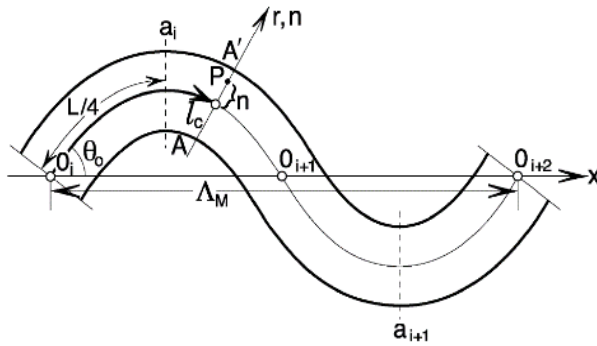


Figura 4. Esquema de definición. Fuente: da Silva et al., 2008.

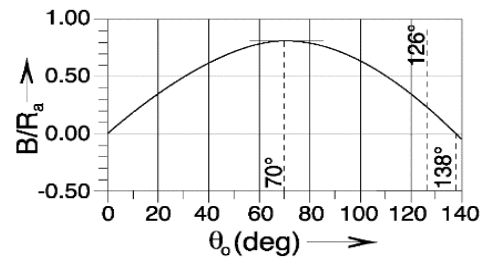


Figura 3. Comportamiento relativo de B/R_a con respecto a los cambios de θ_0 . Fuente: Yalin y da Silva, 2001.

También puede mostrarse que la sinuosidad $\sigma = L/\Lambda_M$, donde Λ_M es la longitud de onda del meandro, es únicamente relacionada a θ_0 , como sigue:

$$\sigma = \frac{1}{J_0(\theta_0)}. \quad (8)$$

3.5 REVISIÓN DE LAS PROPUESTAS ANTERIORES

3.5.1 MÉTODO DEL SERVICIO DE CONSERVACIÓN DE SUELOS DE LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA (SCS) (1963)

El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América (SCS) (1963), propuso contabilizar las pérdidas por meandros ajustando el valor básico de la n de Manning, con base en la sinuosidad (σ), como sigue:

$$\frac{n'}{n} = 1,0 \quad \text{si } \sigma < 1,2, \quad (9)$$

$$\frac{n'}{n} = 1,15 \quad \text{si } 1,2 \leq \sigma < 1,5, \quad (10)$$

$$\frac{n'}{n} = 1,3 \quad \text{si } \sigma \geq 1,5, \quad (11)$$

donde n' = valor ajustado; n = valor básico. La sinuosidad es definida como la relación de la longitud a lo largo de la línea central del canal entre dos puntos equivalentes de la sección transversal y la distancia en línea recta entre los mismos puntos.

Por lo tanto, la ecuación de Manning debe ser aplicada de la siguiente forma

$$u_{av} = \frac{1}{n'} R_h^{2/3} S_c^{1/2}, \quad (12)$$

donde u_{av} es la velocidad promedio del flujo, R_h es el radio hidráulico y S_c es la pendiente de la línea central de la corriente.

3.5.2 MÉTODO LINEALIZADO DEL SERVICIO DE CONSERVACIÓN DE SUELOS DE LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA (LSCS) (1963)

La naturaleza escalonada del método SCS introduce discontinuidades en los límites de los rangos de sinuosidad definidos, con una consecuente ambigüedad e incertidumbre. Para superar este problema, la relación ha sido linealizada y es expresada como

$$\frac{n'}{n} = 0,43\sigma + 0,57 \quad \text{si } \sigma < 1,7, \quad (13)$$

$$\frac{n'}{n} = 1,30 \quad \text{si } \sigma \geq 1,7, \quad (14)$$

donde los nuevos valores (n') obtenidos para la n de Manning son utilizados en la ecuación original de Manning (ver Ec. (12)) para calcular la velocidad promedio del flujo (u_{av}).

3.5.3 MÉTODO DE LEOPOLD ET AL. (1960)

Leopold et al. (1960) presentaron una relación gráfica, entre la relación del esfuerzo cortante adicional inducido por la curvatura del canal (τ_i) y el esfuerzo cortante debido a la fricción (τ_s), y la relación del ancho de solera (B) y el radio medio de la curvatura (R_m). Dicha relación gráfica puede ser expresada matemáticamente por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{\tau_i}{\tau_s} = 2,632 \left(\frac{B}{R_m} \right) - 0,526, \quad (15)$$

la cual aplica por debajo de un valor crítico del número de Froude (aproximadamente 0,5). Al relacionar los esfuerzos cortantes límite con los gradientes de pérdida de energía, la Ec. (15) puede ser interpretada como un ajuste del factor de fricción de Darcy Weisbach (James y Wark, 1992), y puede ser representada de manera matemática de la siguiente forma

$$\frac{f}{f'} = 2,632 \left(\frac{B}{R_m} \right) + 0,474. \quad (16)$$

De acuerdo con la Ec. (16), f'/f puede ser menor que 1,0, lo cual es claramente irrealista, y 1,0 debería ser tomado como el valor mínimo. Esta anomalía surge del hecho de que la relación entre τ_i/τ_s y B/R_m presentada por Leopold et al. (1960), está basada solamente sobre cuatro puntos de datos y requiere mayor investigación para valores de B/R_m más pequeños.

No obstante, partiendo de los desarrollos matemáticos alcanzados por James y Wark (1992), es posible de igual forma realizar aproximaciones para predecir la velocidad promedio del flujo, la cual puede ser calculada a partir de la siguiente relación:

$$u_{av} = \left(\frac{8gS_c R_h}{f'} \right)^{1/2}, \quad (17)$$

donde g es la aceleración debida a la gravedad.

3.6 ENFOQUE DE LA NUEVA PROPUESTA

Como es bien sabido, siguiendo a Einstein y Barbarossa (1952), Engelund (1966), Yalin (1964), entre otros; el enfoque prevaleciente para determinar el factor de resistencia al flujo en una corriente recta, donde el fondo móvil está cubierto por diferentes formas (ondulaciones y/o dunas), es basado en la división del total de la resistencia al flujo, la cual se compone por la resistencia debida a los sedimentos y la resistencia debida a la forma. Este enfoque, comúnmente conocido como el enfoque de “resistencia dividida”, considera el total del esfuerzo cortante como la suma de los esfuerzos cortantes del fondo del río debido a la rugosidad de la superficie $(\tau)_f$ y al esfuerzo cortante del fondo del río debido a las formas que presenta la base del mismo $(\tau)_\Delta$, esto es entonces matemáticamente como sigue:

$$\tau_0 = (\tau_0)_f + (\tau_0)_\Delta. \quad (18)$$

De ello se deduce que el factor de resistencia al flujo c puede ser expresado como:

$$\frac{1}{c^2} = \frac{1}{c_f^2} + \frac{1}{c_\Delta^2}, \quad (19)$$

donde $1/c_f^2$, es la componente de fricción pura de $1/c^2$, y $1/c_\Delta^2$ es la componente de $1/c^2$ debida a las formas del fondo del río.

Considérese ahora una corriente meándrica. Con base en lo anteriormente mencionado, el incremento en la resistencia al flujo puede ser tratado como un incremento del esfuerzo cortante del fondo del río τ debido a la geometría del plano de la corriente, produciendo la siguiente relación:

$$\tau_0 = (\tau_0)_f + (\tau_0)_\Delta + (\tau_0)_M, \quad (20)$$

donde $(\tau)_M$, es el esfuerzo cortante del fondo debido a la condición meándrica de la corriente.

La Ec. (20) a su vez implica que

$$\frac{1}{c^2} = \frac{1}{c_f^2} + \frac{1}{c_\Delta^2} + \frac{1}{c_M^2}, \quad (21)$$

donde $1/c_M^2$, sería la componente de $1/c^2$ debido a la condición meándrica de la corriente.

Consecuentemente, una adecuada expresión para $1/c_M^2$ debería ser desarrollada con base en las consideraciones dimensionales y en todos los datos de laboratorio y campo disponibles.

Sin embargo, antes de proceder en el desarrollo de una nueva metodología debe ser observado lo siguiente:

(i) La forma meándrica de una corriente induce el crecimiento, en la dirección vertical z , a partir de la deposición lateralmente adyacente en forma de barras y pozos (ilustrado en la Figura 5). En el caso de las corrientes generadas sinusoidalmente, cada complejo de barra + pozo, forma una zona a gran escala de erosión-deposición teniendo una longitud $L/2$. Los elementos de la topografía del fondo, debido a razones distintas a la condición meándrica de la corriente, ya sean ondulaciones y/o dunas, pueden ser superpuestos a la deformación del fondo del río a gran escala debido a la condición meándrica. El término $1/c_A^2$ en la Ec. (21) debe ser considerado, en consecuencia, como una incorporación del efecto de las dunas y las ondulaciones, así como de la deformación del fondo meándrico. Su inclinación longitudinal y radial puede ser expresada como $\delta_l \approx \Delta / (L/2) < 2h_{av} / L$ y $\delta_r = \Delta / (B/2) < 2h_{av} / B$, respectivamente. Acá Δ ($= \Delta_b$ o Δ_p) implica la altura de las barras y la profundidad de los pozos, respectivamente. La contribución de los pozos y las barras sobre la resistencia general al fluir, es de esta forma solo de importancia secundaria. Considerando esto, se afirma que esta contribución será ignorada – esto significa que las únicas formas del fondo del río que serán consideradas son las ondulaciones y las dunas.

(ii) Como es bien conocido, el factor de fricción c_f de un flujo más allá de un fondo plano de un río puede ser determinado desde la siguiente expresión (consultar Yalin, 1977; da Silva y Yalin, 2017):

$$c_f = \frac{1}{\kappa} \ln \left(0,368 \frac{h_{av}}{k_s} \right) + B_s, \quad (22)$$

donde κ , es la constante de von Kármán ($\approx 0,4$), k_s es la rugosidad granular de la superficie del fondo y B_s es la función de rugosidad. Siguiendo a Kamphuis (1974) y a Yalin (1992), se identifica a k_s como $2D_{50}$ ($2D_{50}$ = tamaño promedio de los sedimentos del material del fondo del río); y B_s es determinado a partir de la siguiente ecuación, de acuerdo a da Silva y Bolisetti (2000) (también ver da Silva y Yalin, 2017)

$$B_s = (2,5 \ln Re_* + 5,5) e^{-0,0705(\ln Re_*)^{2,55}} + 8,5 [1 - e^{0,0594(\ln Re_*)^{2,55}}] \quad (23)$$

donde identifica Re_* como el número de Reynolds bajo condiciones de rugosidad ($= u_* k_s / \nu$, donde $u_* = (g S_c R_h)^{1/2}$ es la velocidad cortante, y ν es la viscosidad cinemática del fluido, la cual es identificada en este documento como $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

(iii) De acuerdo con Yalin (1964) y Engelund (1966), la siguiente expresión es adoptada para $1/c_A^2$:

$$\frac{1}{c_A^2} = \frac{1}{2h_{av}} (\delta_d^2 \Lambda_d + \delta_r^2 \Lambda_r) \quad (24)$$

donde δ_d , es la inclinación de las dunas, Λ_d es la longitud de las dunas, δ_r es la inclinación de las ondulaciones y Λ_r es la longitud de las ondulaciones.

En este trabajo, las ecuaciones adoptadas para δ_d , Λ_d , δ_r y Λ_r son provenientes de da Silva y Yalin (2017), las cuales son resumidas en el Anexo A.



Figura 5. Ejemplo de las características típicas de un río meándrico. Izquierda: en el círculo rojo es posible observar una barra en el banco interno del meandro; derecha: es un acercamiento a la misma barra puntual mostrada en la figura de la izquierda. Brazos River, West of Monaville, Texas, United States of America. Fuente: Google Earth, Landsat Copernicus, 2018.

3.7 IMPACTO ECONÓMICO

El estudio del impacto económico que tendrá una investigación científica, conforma una parte sumamente importante de la misma, puesto que figura de manera sistemática y ordenada la información de carácter monetario, en resultado de la investigación y análisis efectuado de la etapa técnica, que será de gran utilidad en la evaluación de la rentabilidad económica del desarrollo investigativo, y de los aportes económicos que éste podría ofrecer a futuro (Gómez, 2003).

3.8 *IMPACTO SOCIAL*

La evaluación del impacto de la ciencia constituye una necesidad estratégica, como vía para la constatación del desarrollo, así como de su gestión en función de la sociedad y de los seres humanos que conviven en ella. Sobre este aspecto, autores como Moñux, Escolar, Aleixandre y Gómez (2005); Saavedra et al. (2005); Villaveces, Orozco, Olaya, Chavarro y Suárez (2005); Rodríguez (2005) y Cohen et al. (2010), han investigado y publicado en cada uno de los casos, argumentando su pertinencia, viabilidad e importancia de que los resultados científicos cumplan con su función social, y no se limiten a su difusión en revistas y publicaciones especializadas, sino que se conozcan por otros profesionales a través de diferentes medios de difusión ,y que provoquen los cambios necesarios.

3.9 *IMPACTO AMBIENTAL*

Por su parte el estudio de impacto ambiental hace referencia a todos aquellos informes, estudios, investigaciones y pruebas, que se realicen en determinado ambiente, ante los resultados que una transformación en el medio puede generar. Por lo tanto, lo que se busca con los estudios de impacto ambiental, es controlar y analizar qué tipo de transformaciones alteran realmente el ambiente, ya sean generando perjuicios o beneficios en su medio próximo (UNDP, 2005).

4 METODOLOGÍA

4.1 VARIABLES QUE DETERMINAN $1/c_M^2$

En este caso específico fue utilizado el análisis dimensional para establecer las variables sobre las cuales $1/c_M^2$ podría depender.

El flujo en un canal generado sinusoidalmente que tiene un fondo deformado adquirido naturalmente, una pendiente de la línea central S_c , y una rugosidad granular k_s , es determinado por los siguientes $n = 8$ parámetros característicos: ρ , ν , θ_0 , Λ_M , B , k_s , gS_c , h_{av} , donde ρ es la densidad del fluido, ν es la viscosidad cinemática del fluido, θ_0 es el ángulo de deflexión en la sección transversal (en $l_c = 0$), Λ_M es la longitud de onda del meandro, B es el ancho de solera, g es la aceleración debida a la fuerza de gravedad, S_c es la pendiente de la línea central de la corriente y h_{av} es el tirante del flujo promedio en el canal. Por lo tanto, cualquier característica A de la corriente aluvial generada sinusoidalmente puede ser expresada como

$$A = f_A(\rho, \nu, \theta_0, \Lambda_M, B, k_s, gS_c, h_{av}). \quad (25)$$

Usando ρ , ν , y h_{av} como repetidores, fue entonces posible determinar la contraparte adimensional Π_A de A

$$\Pi_A = \rho^x \nu^y h_{av}^z A = \varphi_A(\theta_0, \Lambda_M / B, B / h_{av}, h_{av} / k_s, \nu_* k_s / \nu). \quad (26)$$

Ahora, tomando en cuenta lo anterior se pudo identificar A en la Ec. (25) con la velocidad promedio del flujo del canal u_{av} y, por consiguiente, Π_A en la Ec. (26) con $h_{av} u_{av} / \nu$. Tomando en cuenta que $u_{av} = c \cdot \nu_*$, y también que la longitud de onda característica Λ_M de las corrientes aluviales naturales y el ancho de solera del canal B no son independientes, sino que están relacionados como $\Lambda_M = const \cdot B$ (donde, de acuerdo a Yalin, 1992, $const \approx 2\pi$), se obtuvo

$$1/c^2 = \varphi(\theta_0, B / h_{av}, h_{av} / k_s, \nu_* k_s / \nu). \quad (27)$$

La Ec. (27) implica que $1/c_M^2$ en la Ec. (21) debe esperarse que sea al menos una función de las cuatro variables adimensionales del lado derecho de la Ec. (27), esto significa que

$$1/c_M^2 = \varphi(\theta_0, B / h_{av}, h_{av} / k_s, \nu_* k_s / \nu). \quad (28)$$

[El hecho de que $1/c_f^2$ sea determinado por h_{av}/k_s y $\nu_* k_s/\nu$ no excluye la posibilidad de que $1/c_M^2$ también pueda depender de algunas de estas dos variables].

Para el caso específico de flujos completamente rugosos, para los cuales las condiciones vienen a ser independientes de $v_* k_s / \nu$, fue posible reducir la Ec. (28) a

$$\frac{1}{c_M^2} = \varphi(\theta_0, B / h_{av}, h_{av} / k_s). \quad (29)$$

Es notorio que desde que $k_s \approx 2D_{50}$ (ver la Sección 3.6), h_{av}/k_s en la Ec. (29) es equivalente a h_{av}/D_{50} , esto significa que la Ec. (29) es equivalente a

$$\frac{1}{c_M^2} = \varphi(\theta_0, B / h_{av}, h_{av} / D_{50}). \quad (30)$$

4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

La base de datos utilizada en este trabajo consistió en un total de 40 experimentos de laboratorio y 285 observaciones de campo, las cuales fueron reportadas por varios autores (referirse al apartado de Referencias Bibliográficas B: Fuentes de Datos). Los datos son resumidos en el Cuadro 1, donde N es el número de experimentos u observaciones dadas por cada uno de los autores, Q es el caudal promedio, D_{50} es el tamaño representativo del sedimento, B es el ancho de solera, h_{av} es el tirante del flujo en el canal, S_c es la pendiente del fondo a lo largo de la línea central de un flujo meándrico, y θ_0 es el ángulo de deflexión de un flujo meándrico en la sección transversal O_i .

Cabe resaltar que algunos autores de las fuentes de datos, brindaron el valor de la sinuosidad de la corriente σ en lugar del valor de θ_0 . Por lo tanto, para el presente propósito, σ fue convertido a θ_0 con la ayuda de la Ec. (8); la función de Bessel $J_0(\theta_0)$, fue calculada a partir de la siguiente aproximación polinomial (ver da Silva y Yalin, 2017):

$$\begin{aligned} J_0(\theta_0) \approx & 1 - 2,2499997(\theta_0 / 3)^2 + 1,2656208(\theta_0 / 3)^4 - 0,3163866(\theta_0 / 3)^6 \\ & + 0,0444479(\theta_0 / 3)^8 - 0,0039444(\theta_0 / 3)^{10} + 0,0002100(\theta_0 / 3)^{12} \end{aligned} \quad (31)$$

aquí θ_0 está en radianes.

Cuadro 1. Resumen de la base de datos utilizada en este trabajo (consta de un total de 40 experimentos de laboratorio y 285 observaciones de campo).

Fuente de Datos		N	θ_0 (°)	$Q(m^3/s)$	D_{50} (mm)	B (m)	h_{av} (m)	S_c (‰)	Re ($\times 10^{-3}$)	Fr
Laboratorio	Binns and da Silva, 2009	5	70	0,007-0,014	0,65	0,800	0,041-0,046	2,5-8,0	7,9-15,5	0,284-0,577
	Binns and da Silva, Bh Runs*, 2012	6	70	0,003-0,033	0,65	0,800	0,014-0,156	1,8-8,0	4,0-29,5	0,212-0,873
	da Silva and El-Tahawy, 2008	6	70	0,007-0,013	0,65	0,800	0,035-0,075	2,2-4,0	7,5-14,2	0,214-0,396
	da Silva, El-Tahawy and Tape, 2006	3	30-110	0,002	2,2	0,400	0,030-0,032	0,001-1,0	4,0-4,5	0,269-0,309
	Hasegawa, 1983	4	20-30	0,001-0,002	0,43	0,22-0,30	0,009-0,026	3,3-14,1	2,3-5,3	0,475-0,935
	Holzwarth, 2006	2	70	0,002-0,006	0,65	0,8	0,012-0,024	8,0	2,5-7,2	0,638-0,655
	Hooke, 1974	4	55	0,01-0,05	0,3	1,0	0,052-0,128	2,1-2,2	9,1-39,8	0,269-0,382
	Termini, 1996	1	110	0,007	0,65	0,50	0,030	3,7	11,6	0,799
	Whiting and Dietrich, 1993a	6	10-20	0,001-0,002	0,67	0,25	0,014-0,020	4,2-6,4	3,5-5,7	0,603-0,764
Whiting and Dietrich, 1993b	3	100	0,001	0,62	0,25	0,015-0,017	4,0-6,0	3,4-4,2	0,653-0,759	
Campo	Annable, 1994	40	27-98	2,27-98,73	0,25-46,0	4,36-48,70	0,52-2,38	0,33-38,0	305,2-3493,7	0,095-0,800
	Chitale, 1970	23	38-93	141,58-42475,27	0,04-5,0	54,86-2143,96	1,52-20,12	0,047-1,25	2275,2-55741,8	0,092-0,426
	Davidson and Hey, 2011	32	35-97	2,43-424,00	17,0-130,0	6,55-97,00	0,298-3,90	1,0-14,0	340,1-6356,8	0,267-0,728
	Jan H van den Berg, 1994	57	57-97	1,87-28000,00	0,19-90,50	5,21-1975,00	0,30-10,60	0,045-11,0	279,4-16936,7	0,015-0,697
	Schumm, 1968	13	35-94	254,85-707,92	0,4-1,3	50,29-182,88	2,44-9,45	0,076-0,38	3420,8-7102,7	0,077-0,296
	Thorne, 1993	16	16-114	0,88-1796,40	0,3-9,7	4,0-231,5	0,40-5,55	0,117-2,14	183,3-7678,2	0,101-0,278
	Thorne, 2001	104	35-103	1,60-1451,50	0,12-1,63	9,5-225,0	0,45-8,22	0,07-0,88	153,8-11010,0	0,122-0,309

*Información obtenida a través de comunicación personal.

4.3 ANÁLISIS PRELIMINAR DE LOS DATOS

En vista de la Ec. (30), un análisis preliminar de los datos fue llevado a cabo para evaluar si $1/c_M^2$ está en función de todas las variables adimensionales en la ecuación, es decir θ_0 , B/h_{av} , y h_{av}/D_{50} .

En este apartado del análisis, se utilizaron solamente los datos de laboratorio debido que fueron obtenidos bajo condiciones controladas, además así se garantiza que se elimina el elemento aleatorio de las observaciones de campo. En todos los gráficos subsecuentes a esta sección, el valor de $1/c_M^2$ fue obtenido a partir de la siguiente relación (ver Ec. (21))

$$\frac{1}{c_M^2} = \frac{1}{c^2} - \frac{1}{c_f^2} - \frac{1}{c_A^2}, \quad (32)$$

en la cual $1/c^2$ fue definido con el valor medido de $(v_*/v)^2$, y con los valores de $1/c_f^2$ y $1/c_A^2$ calculados a través de las Ecs. (22) y (24), respectivamente. En ausencia de observaciones sobre las formas del fondo del canal, los métodos de da Silva y Yalin (2017) (ver Anexo A) fueron usados para establecer si las ondulaciones y/o dunas estuvieron presentes, y para determinar sus características geométricas (δ_d , A_d , δ_r , A_r) que aparecen en la Ec. (24).

Primeramente, el gráfico del valor medido de $(1/c_M^2)/(1/c^2)$ versus θ_0 fue desarrollado y sujeto a análisis, el cual se muestra en la Figura 6. Esta figura brinda una medida de la contribución de la condición meándrica de la corriente sobre la resistencia general al fluir. Nótese que, para los datos bajo consideración, $(1/c_M^2)/(1/c^2)$ varía desde $\approx 0,02$ hasta $\approx 0,86$, indicando esto que la contribución de la condición meándrica sobre la totalidad de la resistencia al flujo varía desde valores muy pequeños hasta valores substanciales, dependiendo de la morfología y dinámica de la corriente.

La Figura 6 fue parte fundamental para también determinar que las mayores contribuciones debidas a los meandros ocurren para valores intermedios de θ_0 ($55^\circ < \theta_0 < 85^\circ$), y que esta contribución rápidamente decrece para ya sea valores pequeños o grandes de θ_0 , según aumente la desviación de θ_0 a partir de $\approx 70^\circ$. Lo mismo también pudo ser inferido a partir de la Figura 7, la cual muestra los ploteos de $1/c_M^2$ versus θ_0 . Para los propósitos del presente documento, se debió considerar solo los datos de laboratorio en estos ploteos: las líneas sólidas

serán introducidas más adelante en la Sección 5.1, y por ahora deben solamente ser tomadas con el fin de brindar un realce de la tendencia que tienen los datos. Cada uno de los ploteos en la Figura 7, incluye los datos laboratorio dentro de los rangos de los valores de B/h_{av} especificados.

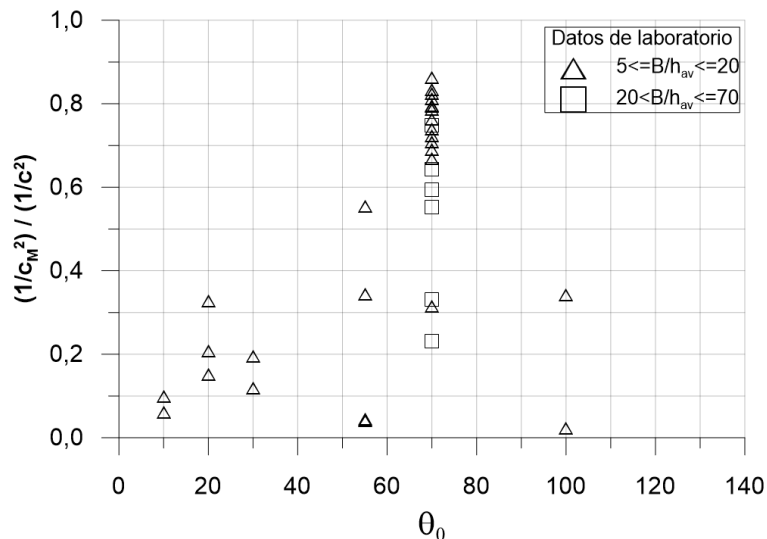


Figura 6. Contribución de la condición meándrica de la corriente sobre la resistencia general al fluir. Nótese que, para los datos bajo consideración, $(1/c_M^2)/(1/c^2)$ varía desde $\approx 0,02$ hasta $\approx 0,86$.

Adicionalmente, para mostrar el patrón anteriormente descrito de $1/c_M^2$ con respecto a θ_0 , la Figura 7 muestra que $1/c_M^2$ es también afectado por B/h_{av} . En efecto, nótese como en los ploteos de la Figura 7 el valor máximo de $1/c_M^2$ se vuelve más pequeño según el valor B/h_{av} incrementa. Por ejemplo, en el gráfico superior izquierdo en la Figura 7, que corresponde a valores de $5 < B/h_{av} \leq 15$, muestra que el promedio de los valores de $1/c_M^2$ de los datos analizados para $\theta_0 = 70^\circ$ es 0,022; mientras que, en el gráfico inferior derecho, correspondiente a valores de $40 < B/h_{av} \leq 70$, es de 0,008.

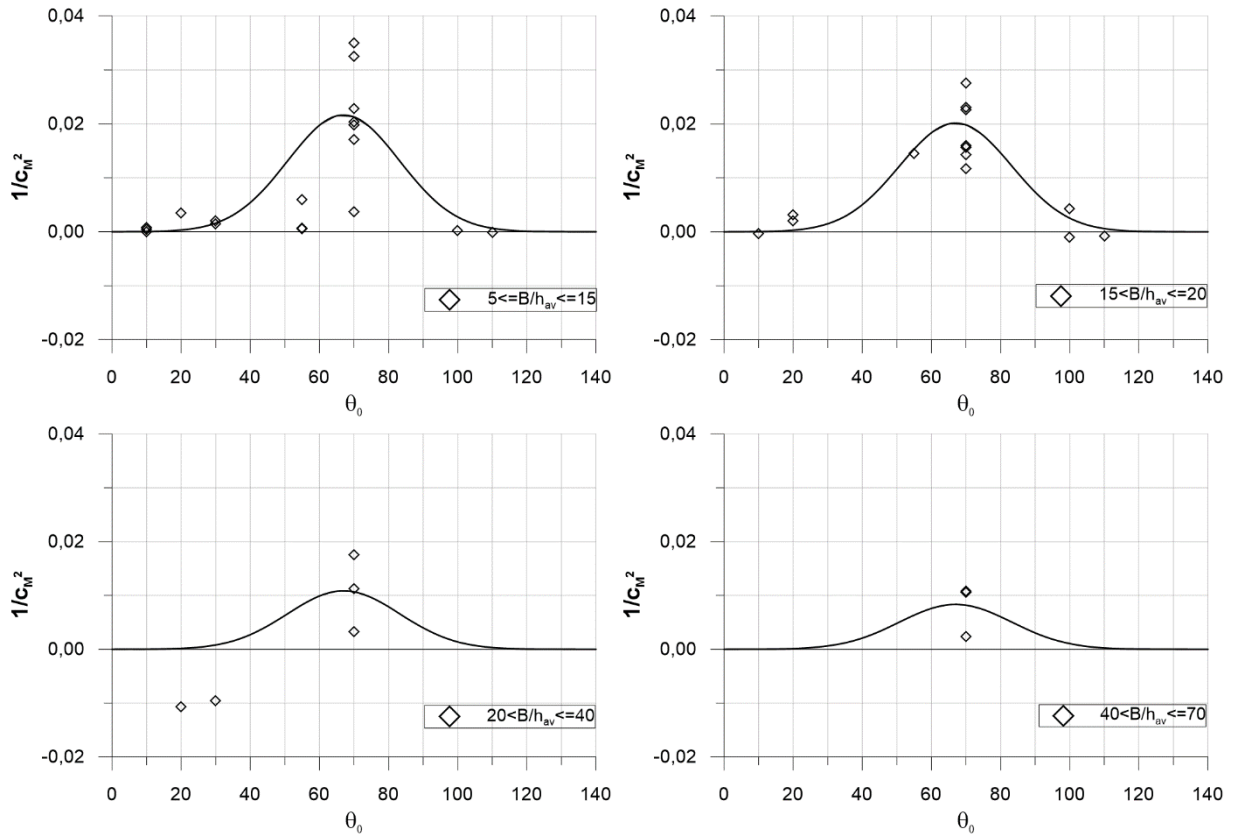


Figura 7. Variación de los valores de $1/c_M^2$ con respecto a los valores de θ_0 , para datos ordenados según B/h_{av} .

La dependencia de $1/c_M^2$ sobre B/h_{av} también fue evidente en la Figura 8, en la cual los valores medidos de $1/c_M^2$ fueron ploteados versus B/h_{av} y los datos fueron ordenados según los valores de θ_0 . Nótese que, las líneas sólidas y punteadas en esta figura fueron agregadas meramente con el fin de realzar los patrones que presentan los datos. La Figura 8 indica claramente que para cualquier valor dado de θ_0 , $1/c_M^2$ decrece con el incremento de B/h_{av} , eventualmente convirtiéndose independiente de B/h_{av} cuando los valores B/h_{av} se vuelven suficientemente grandes.

Como es bien conocido, la intensidad del movimiento circulatorio-transversal en una curva depende directamente de B/R (curvatura de la corriente) y decrece con el incremento de los valores de B/h_{av} . La forma de variación de $1/c_M^2$ con respecto a θ_0 descrita anteriormente y su disminución con B/h_{av} son consistentes con la forma conocida de la variación de la intensidad

del movimiento circulatorio-transversal con estas variables (retomar el contenido de la Sección 3.4, y en particular la Figura 4, donde se mostró el gráfico de B/R_a versus θ_0 para corrientes generadas sinusoidalmente).

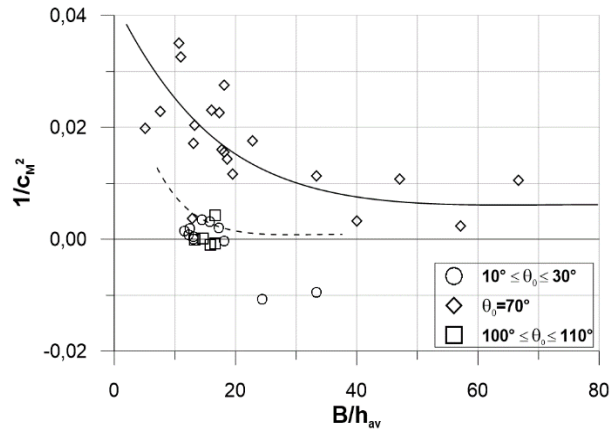


Figura 8. Dependencia de los valores de $1/c_M^2$ sobre los valores de B/h_{av} .

Finalmente, debió considerarse la Figura 9, donde se muestra el gráfico de los valores medidos de $1/c_M^2$ versus los valores de h_{av}/D_{50} . Como en la Figura 8, las líneas punteadas fueron agregadas meramente con el fin de realzar los patrones de los datos. A partir de la Figura 9, es claro que $1/c_M^2$ también es afectado por h_{av}/D_{50} , puesto que los datos exhiben una clara tendencia. Dado que la intensidad del movimiento circulatorio-transversal es también afectada por h_{av}/D_{50} , no debe ser sorprendente el hecho de que $1/c_M^2$ también sea afectado por él.

Partiendo de lo antes mencionado, todos los tres valores de θ_0 , B/h_{av} y h_{av}/D_{50} afectan a $1/c_M^2$. Por consiguiente, tomando como referencia la Ec. (30) en su forma actual, se desarrolló la nueva ecuación para el cálculo del factor de resistencia, la cual es detallada en la Sección 5.1.

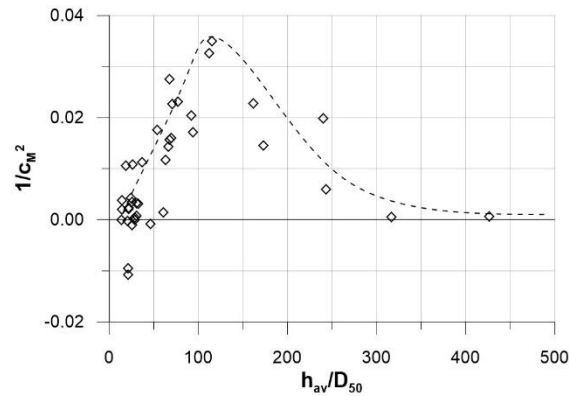


Figura 9. Dependencia de los valores de $1/c_M^2$ sobre los valores de h_{av}/D_{50} .

4.4 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE INGRESO

Como sigue a partir de la Sección 3.5, los métodos SCS y LSCS requieren de una selección del valor n de Manning; y el método por James y Wark (1992) requiere la adopción de un valor del coeficiente de fricción de Darcy Weisbach f . En ausencia de información detallada sobre las corrientes, para los presentes propósitos, el valor de $n = 0,03$ fue adoptado para todos los casos (datos de laboratorio y campo). Esto es justificado con base en Arcement y Schneider (1989) y Villón (2008), los cuales detallan que para corrientes naturales que presentan hierbas y piedras los valores rondan $n = 0,03$; no obstante, cabe mencionar que este valor de n de Manning es un aproximado y promedio de las listas de valores mostradas por los autores anteriores.

Para el caso del cálculo del coeficiente de Darcy Weisbach se utilizó la siguiente expresión, debida a Leopold et al. (1964) (también ver ej. Whipple, 2002) fue adoptada para el valor de f

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,0 \log \left(\frac{h_{av}}{D_{84}} \right) + 1,0, \quad (33)$$

donde D_{84} es el percentil octogésimo cuarto usado para representar la fracción gruesa de sedimentos. Los valores de D_{84} del material del fondo de los ríos de la base de datos son, en general, no conocidos. Por esta razón, f fue determinado a partir de la Ec. (33) usando D_{50} en lugar de D_{84} . Un análisis sensitivo fue llevado a cabo, para evaluar las diferencias en los

resultados adoptando valores de D_{50} y $k_s = 2D_{50}$ en lugar de los valores de D_{84} . Se encontró que los resultados obtenidos con los valores de $2D_{50}$, son sustancialmente peores que los valores obtenidos cuando se utiliza D_{50} (por lo tanto, así se respalda la razón de adoptar D_{50} en los cálculos).

4.5 EVALUACIÓN DE IMPACTO ECONÓMICO

En el caso de la evaluación del impacto económico que podría llegar a tener esta investigación, fue importante tomar en cuenta cuál es el medio directo que se puede ver afectado o beneficiado.

En la aplicación de esta nueva metodología, los parámetros considerados se fundamentan en la importancia de la predicción de las condiciones del flujo, como la velocidad promedio y el caudal promedio; con el fin de determinar el aprovechamiento hídrico que se le podría dar a los ríos y los cuidados necesarios de los mismos, lo cual, consecuentemente puede mejorar las inversiones económicas oportunas, y evitar pérdidas monetarias por omisión o desconocimiento de las capacidades hídricas de la corriente de interés (Gómez, 2003).

4.6 EVALUACIÓN DE IMPACTO SOCIAL

Para la evaluación del impacto social que genera el desarrollo de investigaciones científicas, fue determinante la consideración de los siguientes criterios (Morales-Morejón y Báez, 1999):

- **Producción científica:** resultado sistemático de la propia investigación que contribuye al progreso de la ciencia en función del desarrollo social, a través del aporte de nuevos conocimientos y teorías, nuevos métodos y procedimientos de investigación. Entre los criterios para evaluarla están el número de ideas que aportan al desarrollo científico, la repercusión social de los aportes, número de premios recibidos y la pertenencia a sociedades científicas de prestigio, entre otras.
- **Producción documentaria:** cantidad de trabajos publicados por los autores, que contribuyen al registro de los nuevos conocimientos, que se convierten en información al comunicarse, actualización a los demás miembros de la comunidad científica, y determinación de quiénes son los autores de los aportes y dónde han sido obtenidos.

- ***Producción de citas:*** obtención de citas que genera impacto informacional en la comunidad científica, básicamente por el carácter cualitativo del aporte científico.

Esta triada sinérgica permite operacionalizar de manera más objetiva los criterios para evaluar el impacto científico de las investigaciones, previa determinación de indicadores.

Todo lo anterior, está relacionado con el hecho que, una mayor cantidad de criterios y aportes científicos, se fomentará la toma de decisiones más apropiadas, y por ende se derivaran beneficios sobre las poblaciones involucradas en eventuales proyectos, donde el manejo hídrico sea un componente importante.

4.7 EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

Según UNDP (2005) ara la evaluación del impacto ambiental que podría tener la aplicación de la nueva metodología, se supuso un escenario en el que se utiliza el nuevo desarrollo matemático para la predicción de las condiciones naturales de los ríos. Bajo dicha suposición sería necesario definir los siguientes apartados:

- Descripción del proyecto y sus acciones, así como las alternativas técnicamente viables.
- Inventario ambiental e interacciones ecológicas existentes.
- Identificación y valoración de impactos.
- Establecimiento de medidas protectoras y correctoras.
- Programa de Vigilancia Ambiental.

A partir de lo anterior, sería posible describir la importancia de la aplicación de metodologías que sean eficientes, puesto que el desarrollo técnico de los proyectos de esta índole, se basan en formulaciones matemáticas para predecir posibles fenómenos en los ríos, y conjuntamente el desempeño de posibles obras en las que haya corrientes naturales involucradas.

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 ECUACIÓN PARA $1/c_M^2$

A partir del análisis de los patrones originados por los datos (datos de laboratorio y campo) y en vista de la Ec. (30) (ver Anexo B), es posible inferir que $1/c_M^2$ puede ser adecuadamente representado por la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{c_M^2} = a_1 \cdot \varphi\left(\frac{h_{av}}{D_{50}}\right) \cdot \left(\frac{B}{h_{av}}\right)^{-0,625} e^{-(2,5\theta_0 - 2,924)^2} \quad (34)$$

donde:

$$a_1 = 0,1 \quad \text{si } 5 \leq B/h_{av} \leq 20, \quad (35)$$

$$a_1 = 0,062 \quad \text{si } B/h_{av} > 20, \quad (36)$$

y:

$$\varphi\left(\frac{h_{av}}{D_{50}}\right) = -1,03 \cdot \log\left(\frac{h_{av}}{D_{50}}\right) + 3,03 \quad \text{si } \frac{h_{av}}{D_{50}} \leq 500, \quad (37)$$

$$\varphi\left(\frac{h_{av}}{D_{50}}\right) = 0,25 \quad \text{si } \frac{h_{av}}{D_{50}} > 500. \quad (38)$$

Los gráficos de la Ec. (34) para $h_{av}/D_{50} = 10$ y para $h_{av}/D_{50} = 5000$ (y valores de $B/h_{av} = 10, 17,5, 30$ y 55) son mostrados en la Figura 10.

Debe considerarse que las líneas sólidas en los gráficos de la Figura 7 son los ploteos de la Ec. (34). En cada uno de estos gráficos, la línea sólida fue determinada a partir de la Ec. (34) usando como valor de B/h_{av} y h_{av}/D_{50} los valores promedio de los datos considerados para uno de los gráficos.

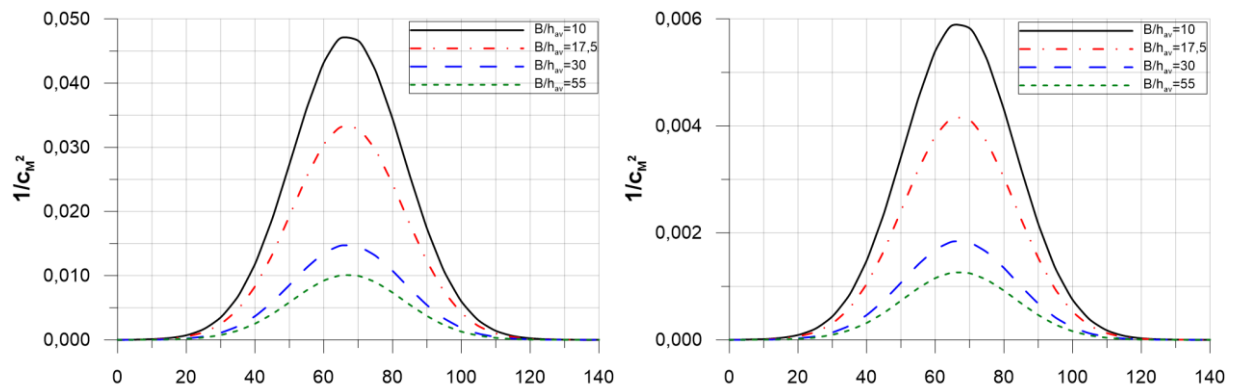


Figura 10. Patrón de la nueva ecuación para $1/c_M^2$ (Ec. (28)) para valores de $h_{av}/D_{50} = 10$ (izquierda) y $h_{av}/D_{50} = 5000$ (derecha), y valores seleccionados de B/h_{av} .

5.2 RESULTADOS DEL NUEVO MÉTODO

Los resultados de la aplicación de la nueva metodología propuesta que fue evaluada con los datos experimentales antes mencionados son mostrados en las Figuras 11 y 12.

La Figura 11 (superior izquierda) muestra el ploteo de $(u_{av})_{Calculado}$ versus $(u_{av})_{Medido}$, en la cual u_{av} es la velocidad promedio del flujo; la Figura 11 (superior derecha) representa el ploteo del residuo, en el cual la abscisa es $(u_{av})_{Medido}$ y la ordenada es $[(u_{av})_{Medido} - (u_{av})_{Calculado}]/(u_{av})_{Calculado}$, y la Figura 11 (inferior), muestra la función de densidad de probabilidad de los residuos que se encuentran en la figura superior derecha. Para los datos de laboratorio, la ecuación produce que un 80 y 98% de los datos ingresen en los rangos de error de 20 y 40%, respectivamente; para los datos de campo, la ecuación produce que un 54 y 78% de los datos ingresen en los mismos rangos de error (ver Cuadro 2). Si se considera la totalidad de los datos, la ecuación produce que un 57 y 80% de los datos ingrese en los rangos de error del 20 y 40%, respectivamente (Cuadro 2).

Los datos son razonablemente bien distribuidos alrededor de la línea de ajuste perfecto (en la Figura 11 superior izquierda); los residuos por su parte no exhiben tendencia alguna (Figura 11 superior derecha) y siguen cercanamente un patrón de distribución normal (Figura 11 inferior). Estas características del gráfico del residuo y de los residuos de la función de densidad de probabilidad, indican que la nueva ecuación está formulada apropiadamente.

La Figura 12 muestra los ploteos del caudal Q calculado versus medido. Dos gráficos son presentados, uno de ellos corresponde a $0,0001 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ y el otro corresponde a $0,1 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 100\,000 \text{ m}^3/\text{s}$, esto con el fin de hacer que los datos sean claramente visibles en cada uno de los ploteos. Debe notarse que desde que $Q = u_{av} h_{av} B$, los porcentajes de los datos que ingresan en los rangos de error de 20 y 40% son los mismos que para u_{av} (esto es mostrado en el Cuadro 2).

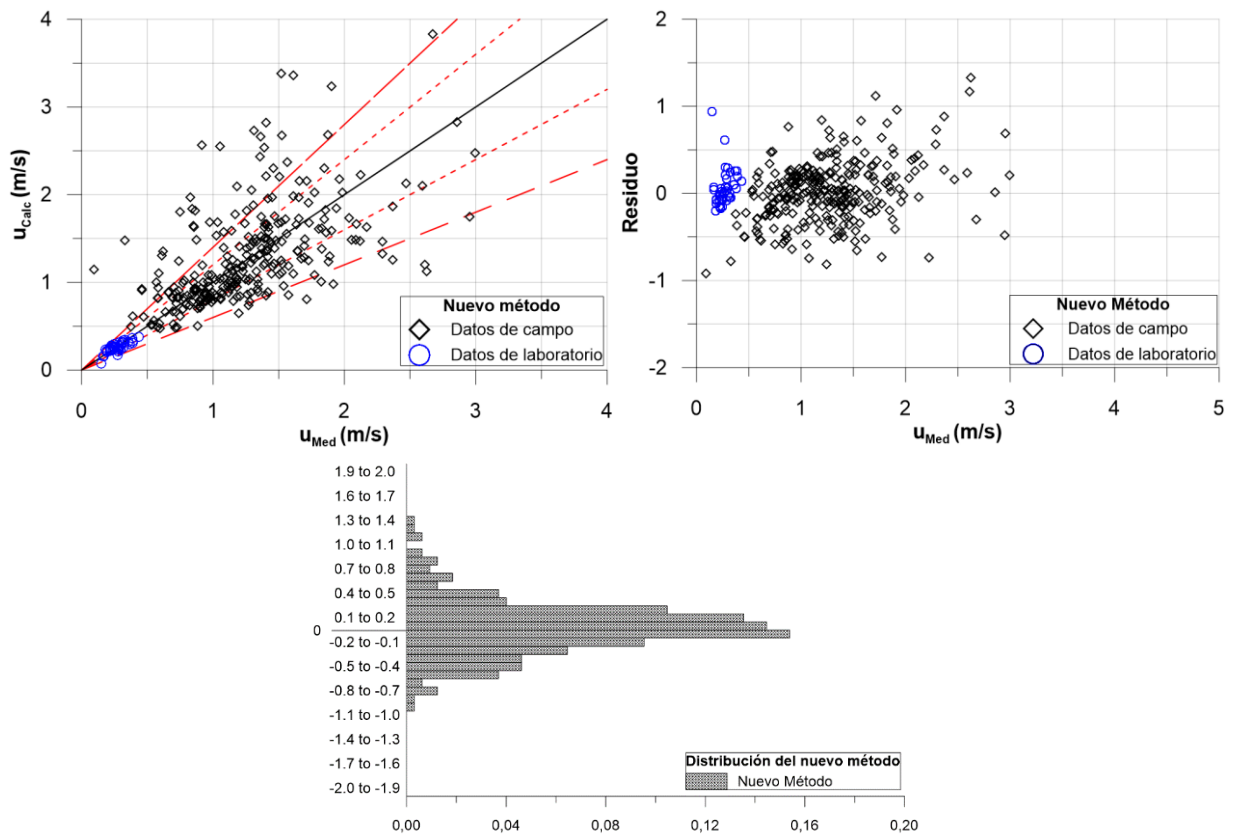


Figura 11. Comparación de los valores de velocidad promedio calculados versus medidos para el nuevo método. Superior izquierda: ploteo de los valores de u_{av} calculados versus medidos; superior derecha: ploteo de los residuos; inferior: función de densidad de probabilidad de los residuos.

Cuadro 2. Porcentajes de los valores de calculados dentro de los diferentes rangos de error para el nuevo método.

Rango de Error	(%) Campo	(%) Laboratorio	(%) Total
0 - 20 %	54	80	57
0 - 40 %	78	98	80
0 - 60 %	87	100	89

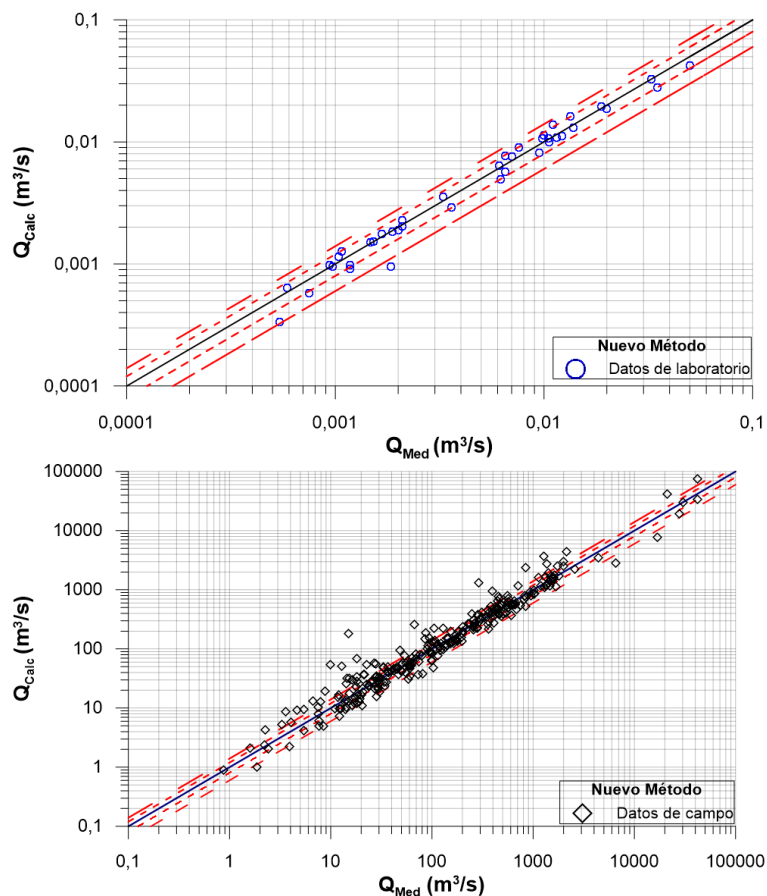


Figura 12. Caudales calculados versus medidos obtenidos por medio del nuevo método.

5.3 COMPARACIÓN CON LOS MÉTODOS ANTERIORES

Inicialmente, se compara la nueva ecuación propuesta, en la cual $1/c^2$ es obtenido mediante la Ec. (21) con el valor de $1/c_M^2$ definido por la Ec. (34), contra el método anterior de da Silva y Yalin (2017) el cual es basado en la Ec. (19) (ver Sección 3.6). Para este propósito, se ploteó $(u_{av})_{Calculado}$ versus $(u_{av})_{Medido}$ y $Q_{Calculado}$ versus Q_{Medido} , y fueron producidas las Figuras 13 y 14, respectivamente, las cuales muestran información similar a las Figuras 11 y 12 mostradas anteriormente. El ploteo del residuo y la función de densidad de probabilidad de los residuos relacionados son mostrados en el Anexo C (ver Figura C1).

Como puede inferirse a partir de las Figuras 13 y 14, no incluir un término que tome en cuenta la forma meándrica de la corriente, cuando se calcula el factor de resistencia c conduce a una sobre estimación sistemática de la velocidad del flujo y, consecuentemente, el caudal.

Nótese en la Figura 13 que el ploteo de datos se encuentra alrededor de la línea superior del rango de error del 20%, en lugar de estar alineada con la línea de ajuste perfecto. Esto significa que la exclusión del término $1/c_M^2$, hace que la velocidad promedio del flujo y el caudal promedio sean sobre estimados en aproximadamente un 20%.

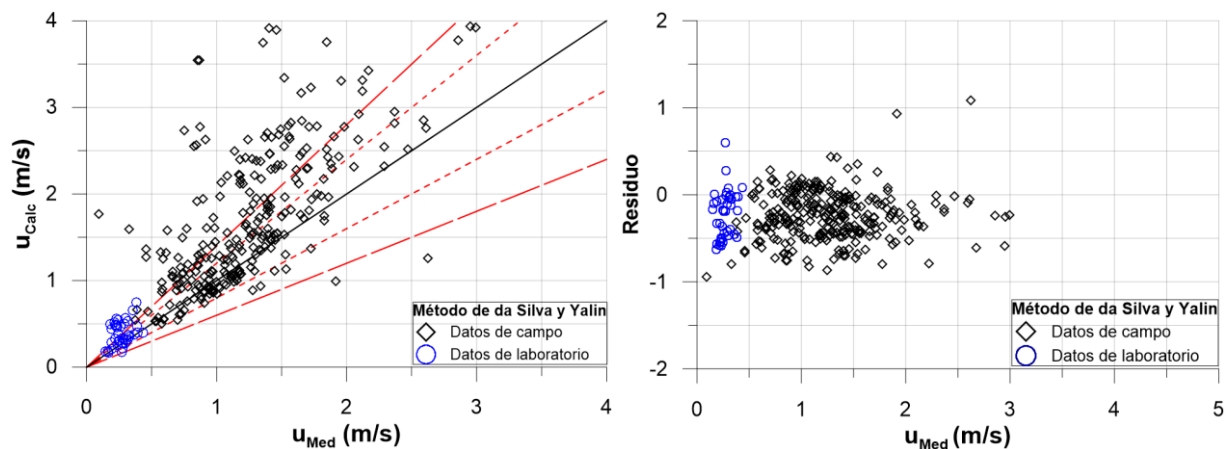


Figura 13. Comparación de los valores de velocidad promedio calculados versus medidos para el método de da Silva y Yalin (2017). Izquierda: ploteo de los valores de u_{av} calculados versus medidos; derecha: ploteo de los residuos.

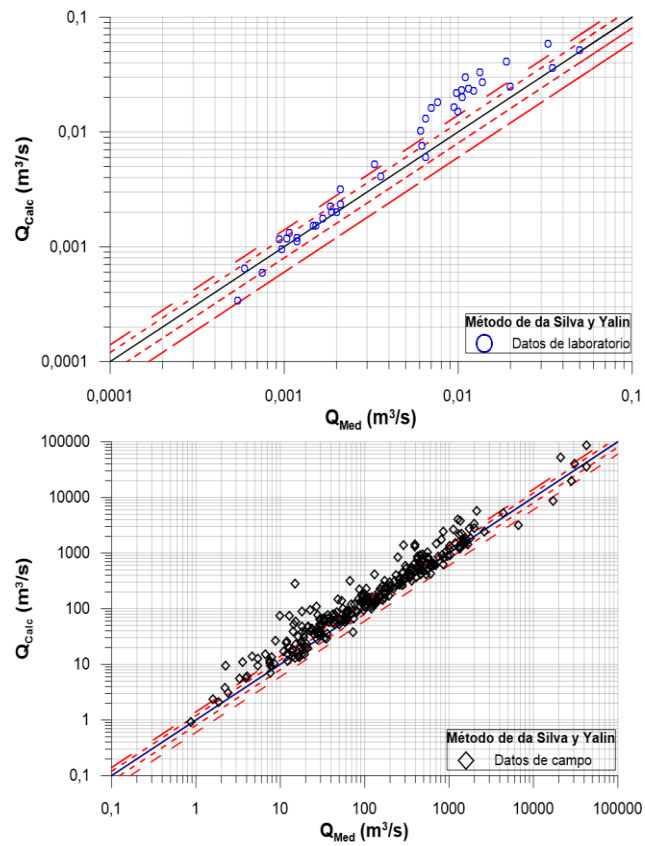


Figura 14. Caudales calculados versus medidos obtenidos por medio del método de da Silva y Yalin (2017).

Seguidamente, se mostrarán y discutirán los resultados procedentes de la evaluación de la nueva metodología contra los métodos anteriores (SCS 1963, LSCS 1963, y James and Wark 1992; ver Sección 3.5 y tomar en cuenta la Sección 4.4).

A partir de las Figuras 11 y 15-17, así como de los gráficos en el Anexo C (Secciones C1 y C2) se puede derivar que:

- (i) El nuevo método puede generar resultados que son sustancialmente mejorados para los datos de laboratorio, incluso llegando a alcanzar valores de 100% en los rangos error, lo cual indica que las cifras de velocidad promedio flujo calculadas se ajustan bastante bien con respecto a las cifras medidas de velocidad promedio del flujo. Cabe mencionar, que este análisis también es válido para los valores de caudales promedio de los ríos, puesto que como se dijo antes, el caudal promedio es proporcional a la velocidad promedio del flujo.
- (ii) El nuevo método también elimina las tendencias que los métodos anteriores generan. Estas tendencias lo que hacen es subestimar la velocidad promedio del flujo y los caudales.

Por otra parte, cabe resaltar que los porcentajes de error próximamente mostrados en el Cuadro 3, fueron desarrollados meramente para valores de n de Manning de 0,03, mientras que, si se varía el n de Manning, aunque sea levemente (valores superiores o inferiores a 0,03), los porcentajes decaen considerablemente y estropean el ajuste de los datos predichos.

Para el caso del método de James y Wark (1992), fue usada la ecuación de Whipple (2002), respaldando dicha decisión con el fin de abolir las iteraciones, para determinar el coeficiente de fricción de Darcy Weisbach, puesto que el objetivo último de las metodologías aplicables es que sean prácticas y eficientes.

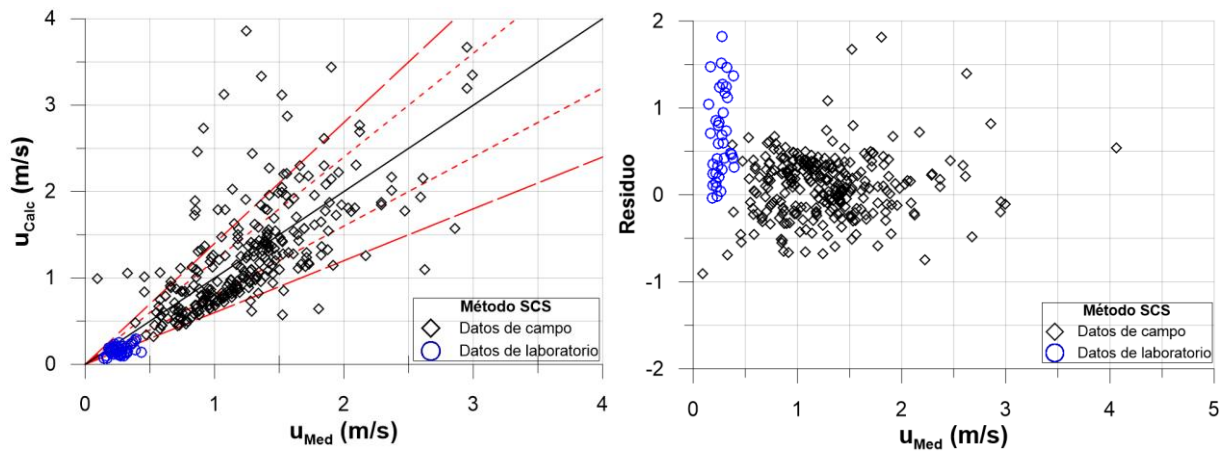


Figura 15. Comparación de los valores de velocidad promedio calculados versus medidos para el método SCS (1963). Izquierda: ploteo de los valores de u_{av} calculados versus medidos; derecha: ploteo de los residuos.

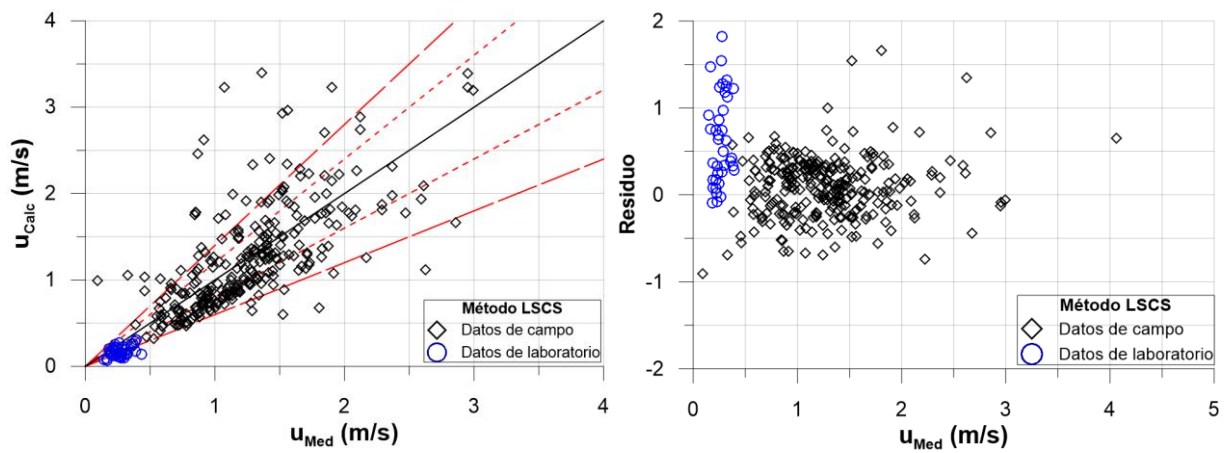


Figura 16. Comparación de los valores de velocidad promedio calculados versus medidos para el método LSCS (1963). Izquierda: ploteo de los valores de u_{av} calculados versus medidos; derecha: ploteo de los residuos.

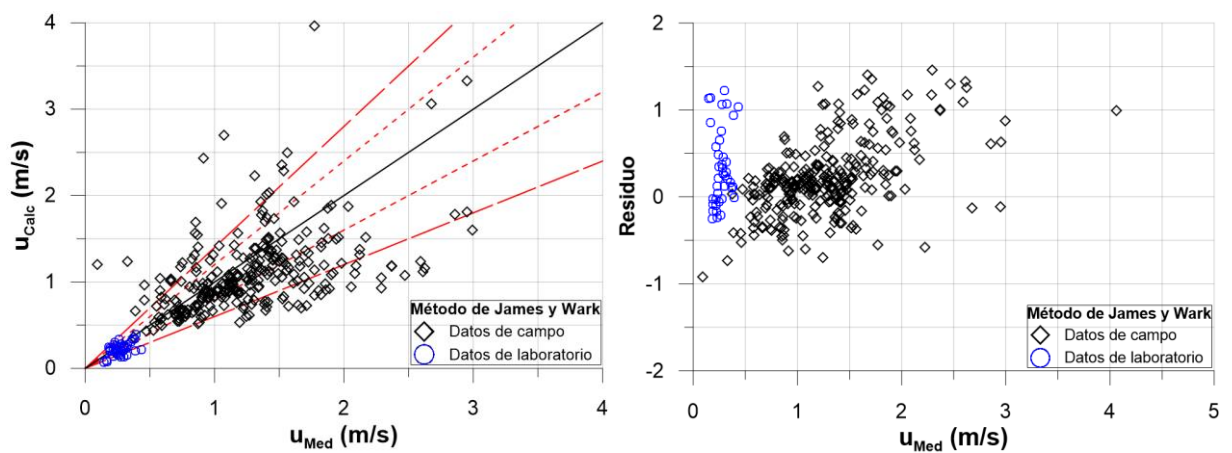


Figura 17. Comparación de los valores de velocidad promedio calculados versus medidos para el método de James y Wark (1992). Izquierda: ploteo de los valores de u_{av} calculados versus medidos; derecha: ploteo de los residuos.

Cuadro 3. Porcentajes de los valores de velocidad promedio del flujo u_{av} , dentro de los diferentes rangos de error para el método nuevo método, el método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América (SCS), el método Linealizado del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América (LSCS) y el método de James y Wark.

Nuevo Método			
Rango de Error	(%) Campo	(%) Laboratorio	(%) Total
0 – 20 %	54	80	57
0 – 40 %	78	98	80
0 – 60 %	87	100	89
Método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América (SCS) 1963			
Rango de Error	(%) Campo	(%) Laboratorio	(%) Total
0 – 20 %	42	23	40
0 – 40 %	84	50	80
0 – 60 %	91	90	91
Método Linealizado del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América (LSCS) 1963			
Rango de Error	(%) Campo	(%) Laboratorio	(%) Total
0 – 20 %	43	23	40
0 – 40 %	85	53	81
0 – 60 %	91	90	91
Método de James y Wark 1992			
Rango de Error	(%) Campo	(%) Laboratorio	(%) Total
0 – 20 %	48	43	47
0 – 40 %	75	78	75
0 – 60 %	94	100	94

5.4 IMPACTO ECONÓMICO

Contemplando los aportes que podría generar la nueva metodología propuesta, es claro que, en su aplicación, se podrían obtener valores más precisos y exactos de las velocidades promedio del flujo, y por ende predecir sus condiciones de caudal, siendo de esta manera, una herramienta útil para el estudio de las capacidades hídricas de un río.

Por lo tanto, si se cuenta con mecanismos más eficientes para la predicción de las condiciones en los ríos, de podrían realizar inversiones económicas oportunas, y evitar pérdidas monetarias por omisión o desconocimiento de las capacidades hídricas de la corriente de interés.

5.5 IMPACTO SOCIAL

Socialmente se encuentra importante el hecho de que se realicen diferentes tipos de investigaciones científicas, que tengan como objetivo reforzar y/o mejorar las herramientas científico-ingenieriles existentes, puesto que promueve el análisis bajo diferentes criterios.

Además, se determina que el impacto científico está fundamentado por la novedad y el aporte teórico-práctico de los nuevos conocimientos como resultado del proceso investigativo, los cuales son aceptados y divulgados a través de diferentes publicaciones oficiales, reconocidos y citados por la comunidad nacional e internacional. Dicho impacto no debe ser concebido solamente como un resultado final, sino también como un proceso de crecimiento individual y social (Hernández y otros, 2005). Y debe ser comprendido en un sentido amplio como las potencialidades de las investigaciones para promover el cambio y buscar el beneficio social derivado de su aplicación (Cohen et al, 2010).

5.6 IMPACTO AMBIENTAL

A partir del escenario propuesto, en el que la nueva metodología es utilizada como una herramienta para la predicción de algunas variables en los ríos (velocidad promedio del flujo y caudal promedio), se puede afirmar que en un eventual caso donde se requiera llevar a cabo intervenciones en el río, ya sea para mantenimiento, mejora, o incluso aprovechamiento del recurso hídrico, será importante considerar la situación ambiental desde la perspectiva de sustentabilidad.

Por lo tanto, desde el enfoque de sustentabilidad, para solucionar o al menos remediar los efectos negativos en el ambiente producidos por la intervención humana, muchas veces es requerida la aplicación de diversas acciones estructurales (construcción de infraestructura urbana y de servicios básicos) y no estructurales (políticas, acciones culturales, educativas, etc.). Pero antes de actuar es necesario conocer los factores de la presión antropogénica y de la situación ambiental en general en un territorio y tiempo determinados; lo que permite evaluar la magnitud de los cambios sucedidos, detectar sus dinámicas evolutivas y proponer las medidas adecuadas de respuesta al respecto (UNDP, 2005), lo cual viene a ser justamente reforzado con la propuesta de la nueva metodología, que busca ser una herramienta más, para promover el análisis crítico de las condiciones existentes.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo al análisis y discusión realizada previamente, es posible concluir lo siguiente:

- Existe una importante contribución por parte de la forma meándrica de las corrientes, sobre la resistencia general al fluir, que varía desde insignificante hasta muy importante, dependiendo de la geometría de la corriente y de las condiciones del flujo. La afectación es insignificante en corrientes que presentan una sinuosidad pequeña o grande y que presentan grandes valores en la relación ancho de solera-tirante; la afectación es muy importante en corrientes que presentan valores intermedios de sinuosidad y que a la vez tienen relaciones de ancho de solera-tirante menores a aproximadamente 20.
- La resistencia adicional al fluir debida a la condición meándrica de la corriente está directamente relacionada con la intensidad de la circulación-transversal y, por lo tanto, exhibe una forma similar de variación con θ_0 y una disminución similar con B/h_{av} . El comportamiento convectivo del flujo, debido a la variación de la curvatura l_c tiene un efecto comparativamente pequeño sobre la resistencia general al fluir.
- El presente trabajo demuestra que el término de resistencia al flujo debido a la condición meándrica de la corriente, depende solamente de la relación existente entre el ancho de solera-tirante (B/h_{av}), la relación entre tirante-tamaño de partícula (h_{av}/D_{50}), y los valores del ángulo de deflexión del flujo meándrico en la sección transversal O_i .
- De acuerdo a los gráficos y los rangos de error que fueron mostrados y discutidos anteriormente, es posible concluir que el enfoque hecho para la nueva metodología tiene una mayor precisión y exactitud, las cuales proporcionan mejores valores en comparación con los otros métodos que conjuntamente fueron analizados.
- En el ámbito del beneficio económico, se vuelve importante el desarrollo de nuevas metodologías, puesto que entre más preciso y exacto sea el método que se utiliza, mejores van a ser los resultados cuando se busca desarrollar proyectos en los que el aporte económico es parte fundamental. Por otra parte, si se logran predecir las condiciones de las corrientes naturales de una manera eficiente y acertada, se puede sacar un provecho económico de lo mismo, en proyectos relacionados (aprovechamientos hídricos, entre otros) a raíz de buenas inversiones respaldadas por cálculos matemáticos efectivos.

- En el ámbito del beneficio social, se convierte en un aporte importante para la comunidad científica relacionada al estudio de la mecánica de las corrientes naturales, además de que se vuelve una herramienta útil de determinación de parámetros y comparación de resultados, pudiendo generar beneficios en la predicción de fenómenos naturales que a futuro pueden afectar o beneficiar a personas.
- En el ámbito del beneficio ambiental, la importancia radica en el hecho de que el contar con metodologías y/o mecanismos que sean más eficientes en la predicción de condiciones naturales, aumenta la calidad en el control y capacidad de respuesta en posibles eventos naturales. Además, en el caso de que se requiera realizar algún tipo de obra, en la cual la determinación de velocidades y/o caudales de corrientes sea fundamental, se vuelve sumamente importante contar con instrumentos (métodos), que ayuden a simplificar la obtención de dichos valores y generen resultados confiables para evitar subestimar o sobreestimar condiciones y capacidades.
- Finalmente, es importante hacer mención que el hecho de utilizar la nueva metodología propuesta no requiere hacer suposiciones de ninguna índole, lo cual no ocurre con los otros métodos conjuntamente puestos a prueba; en el caso de los métodos provenientes del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América es necesario seleccionar un valor n de Manning a partir de las diferentes tablas, el cual es escogido de forma aleatoria y bajo un criterio personal. Además, en el método propuesto por James y Wark se requiere el valor del coeficiente de Darcy Weisbach, el cual depende del número de Reynolds, haciendo que los cálculos se vuelvan más complejos, debido a la necesidad de iteraciones para encontrar la solución final.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Arcement, G. J., and Schneider, V. R. (1989). Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. United States of America: United States Government Printing Office.
- Chang, H. H. (1988). Fluvial processes in river engineering, *John Wiley and Sons Inc.*, New York.
- Chow, V. (1976). Open channels and their properties. *Open-Channel Hydraulics* (19-32). United States of America: McGraw-Hill Company.
- Cohen. M. et al. (2010) Scientific impact: Opportunity and necessity. *Western Journal of Nursing Research*, 32(5), 578-590. Recuperado de <http://wjn.sagepub.com/content/32/5/578>
- da Silva, A.M.F. (2015). “Recent advances from research on meandering and directions for future work”. Chapter 14, In “Rivers – Physical, Fluvial and Environmental Processes”, P. Rowiński and A. Radecki-Pawlik (eds.), *GeoPlanet: Earth and Planetary Book Series*, Springer International Publishing, Switzerland, 373-401.
- da Silva, A. M. F., and Bolisetti, T. (2000). A method for the formulation of Reynolds number functions. *Canadian journal of Civil Engineering*, 27 (4), 829-833.
- da Silva, A. M. F., and Yalin, M.S. (2017). *Fluvial Processes: 2nd edition*. IAHR Monograph Series, CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, Leiden, The Netherlands, 266 pages.
- Einstein, H. A., and Barbarossa, N. (1952). River channel roughness. *Trans., ASCE*, 117.
- Engelund, F. (1966). Hydraulic resistance of alluvial streams. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 92 (2), 315-326.
- Engelund, F. (1974) Flow and bed topography in channel bends, *J. Hydraul. Div.*, 100(11), 1631-1648.
- Gómez, A. M. (2003). Proyecto de Inversión para el Municipio de Tultitlán, Estado de México. Estudio Económico-Financiero. Facultad de Economía, UNAM.
- Hernández, H. et al. (2005). Estrategia para la proyección del impacto. *Revista Cubana de Educación Superior*, 1. Trabajo presentado en la Junta Consultiva de Posgrado 2004. La Habana.

- Inglis, C.C. (1947). Meanders and their bearing on river training, *Maritime and Waterways Engrg. Div., Inst. Civ. Eng.*, London.
- James, C. S., and Wark, J. B. (1992). "Conveyance estimation for meandering channels." *Report SR 329*, HR Wallingford.
- James, C. S. (1994). Evaluation of methods for predicting bend loss in meandering channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, Volume 120, Issue 2, February 1994, American Society of Civil Engineers.
- Kamphuis, J. W. (1974). Determination of sand roughness for fixed beds. *Journal of Hydraulic Research*, 13 (2), 193-203.
- Langbein, W. B., and Leopold, L. B. (1966). Theory of Minimum Variance. Physiographic and Hydraulic Studies of Rivers. Geological Survey Professional Paper 422-H, United States Government Printing Office, Washington, D.C.
- Leopold, L.B. and Wolman, M.G. (1957). River channel patterns: braided, meandering and straight, *U.S. Geol. Survey Professional Paper 282-B*, 39-73.
- Leopold, L. B., Bagnold, R. A., Wolman, M. G., and Brush, L. M. (1960). "Flow resistance in sinuous or irregular channels." *USGS Professional Paper 282-D*, U.S. Geological Survey, Washington, D.C., 111-134.
- Leopold, L. B., Wolman, M. G., and Miller, J. P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. Freeman, San Francisco, 522 p.
- Moñux, D., Escolar, B. M., Aleixandre, G. y Gómez, F. J. (2005). Condicionantes políticos y problemas metodológicos en la evaluación de impacto social de las políticas de I+D e innovación. *Revista CTS*, 2(4), 173-200.
- Morales-Morejón, M. y Báez Cárdenas, L. (1999) Criterios para evaluar el desempeño de los científicos: Tema para un debate. *Revista Ciencias de la Información*, 30(3).
- Nelson, J. M. and Smith, J. D. (1989). Evolution and stability of erodible channel beds, In *River Meandering*, S. Ikeda and G. Parker eds., *Water Resour. Monograph*, Am. Geophys. Union, 12, 321-378.
- Rodríguez, A. (2005). Impacto social de la ciencia y la tecnología en Cuba: una experiencia de medición a nivel macro. *Revista CTS*, 4(2), 147-171.

- Saavedra, O. et al. (2005) El uso de los indicadores cualitativos y cuantitativos en la evaluación de las publicaciones periódicas: el caso del Centro de investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional de México. *Revista Española de Documentación Científica*, 28(4), 500-518. doi: doi:10.3989/redc. 2005.v28. i4.177
- Smith, J.D. and McLean, S.R. (1984). A model for flow in meandering streams, *Water Resour. Res.*, 20(9), 1301-1315.
- Soil Conservation Service. (1963). *Guide for selecting roughness coefficient "n" values for channels*. Soil Conservation Service (SCS), U.S. Dept. of Agric., Washington, D.C.
- UNDP (2005), *Integrated Water Resources Management Plans: Training Manual and Operational Guide*, Cap-Nat, Global Water Partnership.
- Villaveces, J. L., Orozco, L. A., Olaya, D. L., Chavarro, D. y Suárez, E. (2005). ¿Cómo medir el impacto de las políticas de ciencia y tecnología? *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad*, 2(4), 125-146.
- Villón, M. (2008). *Hidráulica de Canales*. Cartago, Costa Rica: Ediciones Centro de Desarrollo de Material Bibliográfico (CDMB).
- Von Schelling, H. (1951), Most frequent particle path in a plane, *Trans. Amer. Geophys. Union*, 32, 222-226.
- Whipple, K. (2002). *Surface Processes and Landforms*. Earth, Atmosphere, and Planetary Sciences. Office of Digital Learning, Massachusetts Institute of Technology, United States of America.
- Yalin, M. S. (1964). On the average velocity of flow over a mobile bed. *La Houille Blanche*, No. 1, 45-51.
- Yalin, M. S. (1977). *Mechanics of sediment transport*. 2nd edition, Pergamon Press, Oxford.
- Yalin, M. S. (1992). *River mechanics*. Pergamon Press, Oxford.
- Zeller, J. (1967). Meandering channels in Switzerland, *Int. Symp. on River Morphology*, Bern, IASH.

FUENTES DE DATOS

- Annable, W. K. (1994). "Morphological characteristics of rivers in southwestern Ontario." Report prepared for Credit Valley Conservation Authority, 188 pages.
- Binns, A. D., and da Silva, A. M. F. (2012). *Nature and time-scale of bed morphological adjustments of equilibrium in meandering streams: an experimental study*. Ph.D. Thesis, Queen's University, Kingston, Canada.
- Binns, A. D., and da Silva, A. M. F. (2009). "On the quantification of the bed development time of alluvial meandering streams." *J. Hydraul. En.*, 132(10), 1003-1014.
- Chitale, S. V. (1970). "River channel patterns." *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 96, No. HY1, 201-221.
- da Silva, A. M. F and Binns, A. D. 2009. *On the Resistance to Flow of Alluvial Meandering Streams.* " In proceedings of 33rd Congress of IAHR, 9-14 August 2009, Vancouver, Canada, 8 pages.
- da Silva, A. M. F., Holzwarth, S., Pasche, E., and El-Tahawy, T. (2008). "Bed topography of alluvial meandering streams under varying width-to-depth ratios." *Proc. Int. Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2008*, 3-5 Sept. 2008, Cesme-Izmir, Turkey.
- da Silva, A. M. F., and El-Tahawy, T. (2008). "On the location in flow plan of erosion-deposition zones in sine-generated meandering streams." *J. Hydraul. Res.*, 46(1), Extra Issue, Feb., 49-60.
- Hasegawa, K. (1983). *Hydraulic research on planimetric forms, bed topographies and flow in alluvial rivers*. Ph.D. Thesis, Hokkaido University, Sapporo, Japan (In Japanese).
- Hooke, R. L. (1974). *Distribution of sediment transport and shear stress in a meander bend*. Rept. 30, Uppsala Univ. Naturgeografiska Inst., 58.
- Termini, D. (1996). *Evolution of a meandering channel with an initial flat bed: Theoretical and experimental study of the channel bed and the initial kinematic characteristics of flow*. Ph.D. Thesis, Dept. Hydraulics Engineering and Environmental Applications, University of Palermo, Italy (In Italian).
- Whiting, P. J., and Dietrich, W. E. (1993a). "Experimental constraints on bar migration through bends: implications for meander wavelength selection." *Water Resour. Res.*, 29(4), 1091-1102.

- Whiting, P. J., and Dietrich, W. E. (1993b). "Experimental studies of bed topography and flow patterns in large-amplitude meanders. 1. Observations." *Water Resour. Res.*, 29(11), 3605-3614.
- Yalin, M. S and da Silva, A. M. F. 2001. *Fluvial Processes*. IAHR Monograph, IAHR, Delft, The Netherlands.

ANEXOS

ANEXO A – ECUACIONES PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LAS DUNAS Y ONDULACIONES (DA SILVA Y YALIN, 2017)

Notación

η_*	intensidad del flujo ($\eta_* = Y / Y_{cr}$)
γ_s	peso específico de las partículas en el fluido
ρ	densidad del fluido
X	tamaño de partícula número de Reynolds ($X = v_* D_{50} / \nu$)
Y	número de movilidad ($Y = \rho v_*^2 / (\gamma_s / D_{50})$)
Z	profundidad relativa ($Z = h_{av} / D_{50}$)
Ξ^3	número de material ($\Xi^3 = \gamma_s D_{50}^3 / \rho \nu^2$)

(i) La ecuación para la inclinación de las dunas (δ_d) es la siguiente:

$$\delta_d = \psi_d(X)(\delta_d)_{\max} (\zeta_d e^{1-\zeta_d})^{m_\delta}, \quad (A1)$$

donde:

$$\psi_d(X) = 1 - e^{-(X/10)^2} \quad (A2)$$

$$(\delta_d)_{\max} = 0,00047Z^{1,2} e^{-0,17Z^{0,47}} + 0,04(1 - e^{-0,002Z}) \quad (A3)$$

$$\zeta_d = \frac{\eta_* - 1}{\eta_{*d} - 1} \quad (A4)$$

$$\eta_{*d} = 35(1 - e^{-0,074Z^{0,4}}) - 5 \quad (A5)$$

$$m_\delta = 1 + 0,6e^{-0,1(5 - \log Z)^{3,6}} \quad (A6)$$

(ii) La ecuación para la longitud de las dunas (λ_d) es la siguiente:

$$\lambda_d = 6h_{av} \left[1 + 0,01 \frac{(Z - 40)(Z - 400)}{Z} e^{-m_\lambda} \right], \quad (A7)$$

donde:

$$m_\lambda = 0,055\sqrt{Z} + 0,04X \quad (A8)$$

(iii) La ecuación para la inclinación de las ondulaciones (δ_r) es la siguiente:

$$\delta_r = \psi(X)0,014r(\eta_* - 1)e^{(1,1-0,1\eta_*)}, \quad (\text{A9})$$

donde:

$$\psi_r(X) = e^{-[(X-2,5)/14]^2} \quad \text{si } X > 2,5 \quad (\text{A10})$$

$$\psi_r(X) = 1 \quad \text{si } X < 2,5 \quad (\text{A11})$$

Entiéndase $\zeta_r = 0,1(\eta_* - 1)$. Seguidamente, se tiene:

$$r = 1 \quad \text{si } \zeta_r \leq 1 \quad (\text{A12})$$

$$r = \zeta_r(2 - \zeta_r) \quad \text{si } 1 < \zeta_r \leq 2 \quad (\text{A13})$$

$$r = 0 \quad \text{si } \zeta_r > 2 \quad (\text{A14})$$

(iv) La ecuación para la longitud de las ondulaciones (Λ_r) es la siguiente:

$$\Lambda_r = \frac{3000D_{50}}{\varepsilon^{0,88} \sqrt{\eta_*} (1 - 0,22\sqrt{\eta_*})} \quad (\text{A15})$$

(v) También debe ser tomado en cuenta que para determinar el tipo de forma que se presenta en el fondo de una corriente, fue adoptado el modelo del diagrama de regiones existentes de dunas y ondulaciones desarrollado por da Silva y Yalin (2017). Esto es reproducido en la Figura A1:

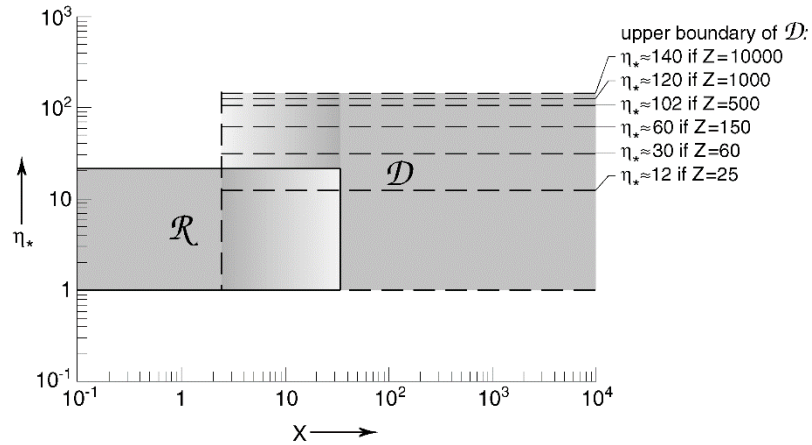


Figura A1. Diagrama de regiones existentes de dunas y ondulaciones (da Silva y Yalin, 2017).

ANEXO B – DETALLES DEL DESARROLLO DE LA NUEVA ECUACIÓN

Tomando en cuenta los patrones de los datos en la Figura 7, se adoptó la siguiente función para describir los mismos:

$$\frac{1}{c_M^2} = a_1 \left(\frac{B}{h_{av}} \right)^{a_2} e^{-(a_3 \theta_0 - a_4)^2}, \quad (B1)$$

el primer paso para desarrollar la nueva ecuación fue utilizar la técnica de mejor ajuste para determinar los valores de los coeficientes a_1 , a_2 , a_3 y a_4 . El mejor ajuste fue obtenido mediante la adopción de una función de B/h_{av} para a_1 , y valores constantes para a_2 , a_3 y a_4 como se muestra a continuación:

$$a_1 = 0,1 \quad \text{si } 5 \leq B/h_{av} \leq 20, \quad (B2)$$

$$a_1 = 0,062 \quad \text{si } B/h_{av} > 20, \quad (B3)$$

y

$$a_2 = -0,625, \quad a_3 = 2,5, \quad a_4 = 2,924. \quad (B4)$$

La ecuación resultante puede ser entonces escrita como

$$\frac{1}{c_M^2} = a_1 \left(\frac{B}{h_{av}} \right)^{-0,625} e^{-(2,5\theta_0 - 2,924)^2}, \quad (B5)$$

en la cual a_1 es dado a partir de las Ecs. (B2) y (B3).

Se observa que, al igual que en el análisis preliminar de datos y por las mismas razones, solo se tuvieron en cuenta los datos de laboratorio al desarrollar la Ec. (B5). Sin embargo, la totalidad de los datos de laboratorio y de campo fueron usados en los pasos posteriores del desarrollo de la nueva ecuación, como se describe posteriormente.

Con el fin de evaluar si la dependencia de $1/c_M^2$ sobre B/h_{av} es totalmente tomada en consideración por la Ec. (B5), la relación $(1/c_M^2)_{Meas}/(1/c_M^2)_{Calc}$, en la cual los subíndices *Meas* y *Calc* representan lo medido y lo calculado, respectivamente, se graficó versus B/h_{av} como es mostrado en la Figura B1. En este caso $(1/c_M^2)_{Calc}$ fue determinado a partir de la Ec. (B5). Como puede ser inferido a partir de la Figura B1, el gráfico de la relación recién mencionada no exhibe alguna tendencia de variación respecto a B/h_{av} : los datos están meramente dispersos alrededor

de $(1/c_M^2)_{Meas}/(1/c_M^2)_{Calc} = 1$. Esto es una indicación de que la Ec. (B5) describe adecuadamente la dependencia de $1/c_M^2$ sobre B/h_{av} .

Finalmente, para incorporar la dependencia sobre h_{av}/D_{50} , fue graficada la relación de $(1/c_M^2)_{Meas}/(1/c_M^2)_{Calc}$ versus h_{av}/D_{50} como es mostrado en la Figura B2.

Este gráfico muestra una ligera tendencia de $(1/c_M^2)_{Meas}/(1/c_M^2)_{Calc}$ a decrecer con el incremento de los valores de h_{av}/D_{50} , tan grande como $h_{av}/D_{50} \leq 500$. Para los valores de $h_{av}/D_{50} \geq 500$, los valores se distribuyen de manera bastante uniforme alrededor de un valor constante. Sin embargo, este valor constante se desvía de 1 (el valor es $\approx 0,25$). El patrón de los datos en la Figura B2 es representado razonablemente bien por la siguiente función de h_{av}/D_{50} .

$$\varphi\left(\frac{h_{av}}{D_{50}}\right) = -1,03 \cdot \log\left(\frac{h_{av}}{D_{50}}\right) + 3,03 \quad \text{si } \frac{h_{av}}{D_{50}} \leq 500 \quad (\text{B6})$$

$$\varphi\left(\frac{h_{av}}{D_{50}}\right) = 0,25 \quad \text{si } \frac{h_{av}}{D_{50}} > 500 \quad (\text{B7})$$

Esta función es añadida como un multiplicador de la Ec. (B5) (la Ec. (28) muestra la forma final de la nueva ecuación propuesta).

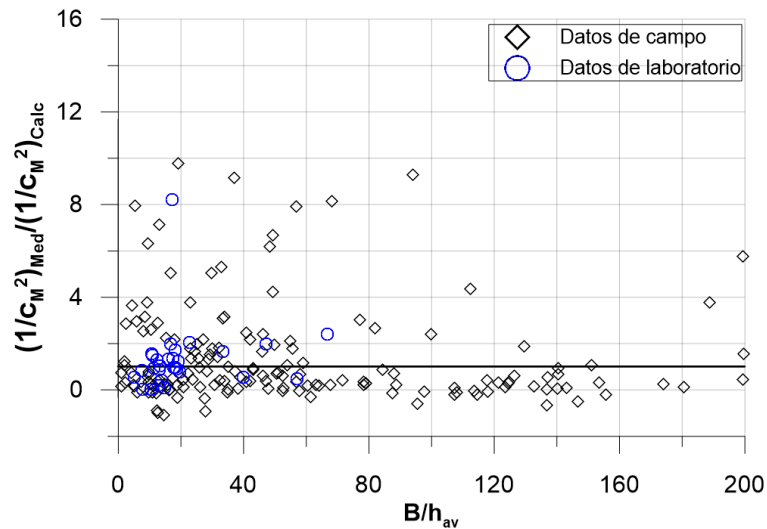


Figura B1. Dependencia de los valores de $1/c_M^2$ sobre B/h_{av} . La línea sólida horizontal en color negro indica que $(1/c_M^2)_{Med} / (1/c_M^2)_{Calc} = 1$.

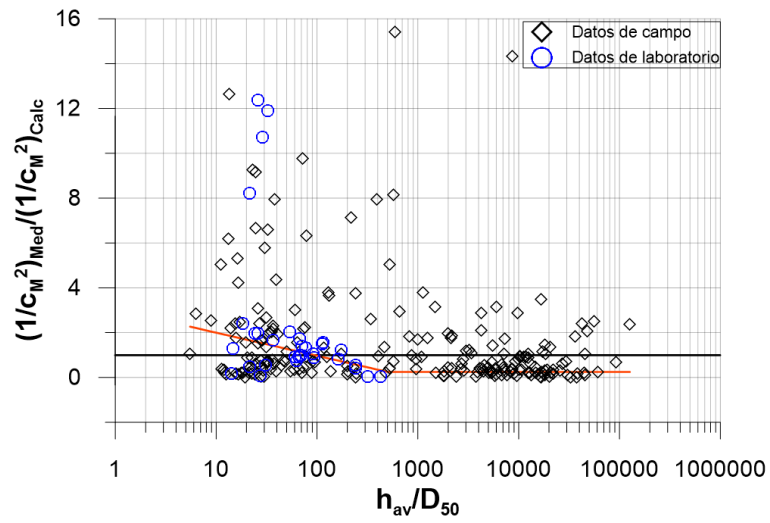


Figura B2. Tendencia de los valores $(1/c_M^2)_{Med}/(1/c_M^2)_{Calc}$ respecto a los valores de h_{av}/D_{50} . La línea sólida horizontal en color negro indica que $(1/c_M^2)_{Med}/(1/c_M^2)_{Calc} = 1$; las líneas en color naranja son provenientes de las Ecs. (32) y (33).

ANEXO C – PLOTEOS ADICIONALES

C.1. Funciones de densidad de probabilidad de los residuos obtenidos para los métodos anteriores.

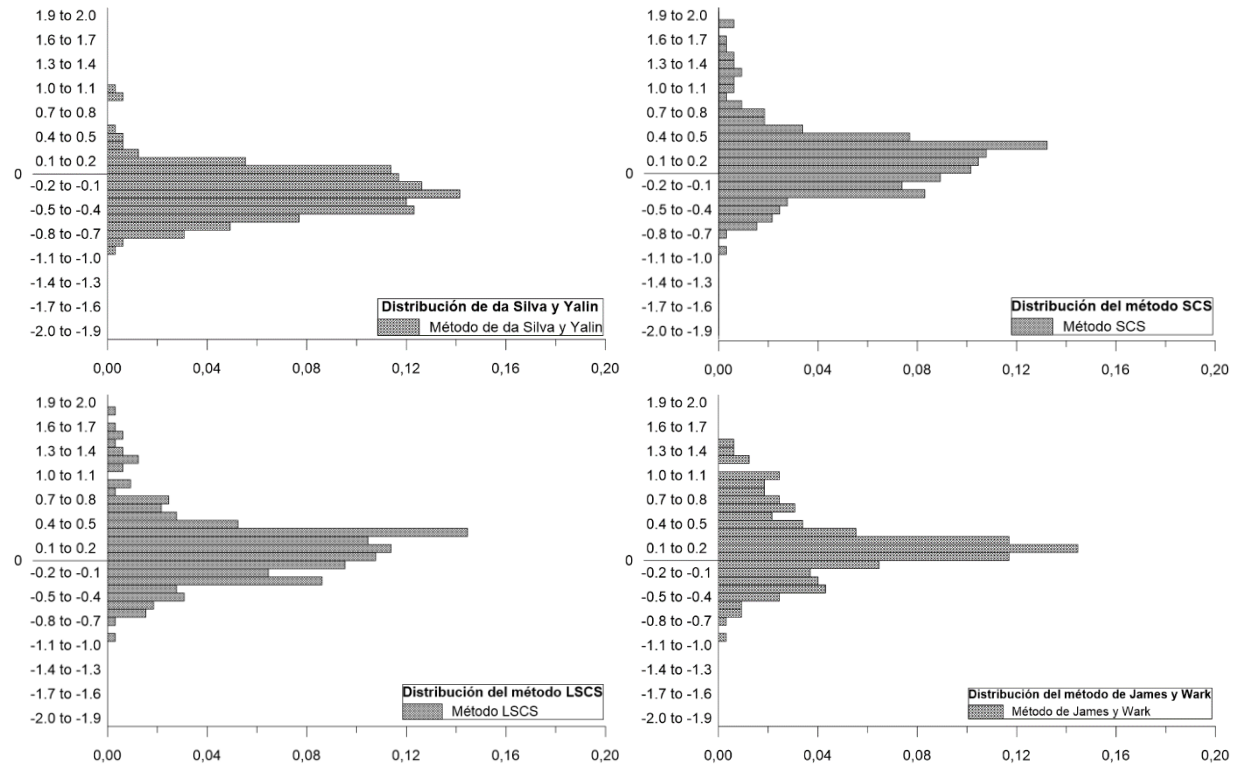


Figura C1.1. Función de densidad de probabilidad de los residuos para los siguientes métodos: da Silva y Yalin (2017) (superior izquierda); SCS (1963) (superior derecha); LSCS (1963) (inferior izquierda); James y Wark (1992) (inferior derecha).

C.2. Gráficos de las tasas de flujo (caudales) calculados versus medidos obtenidos para los métodos anteriores.

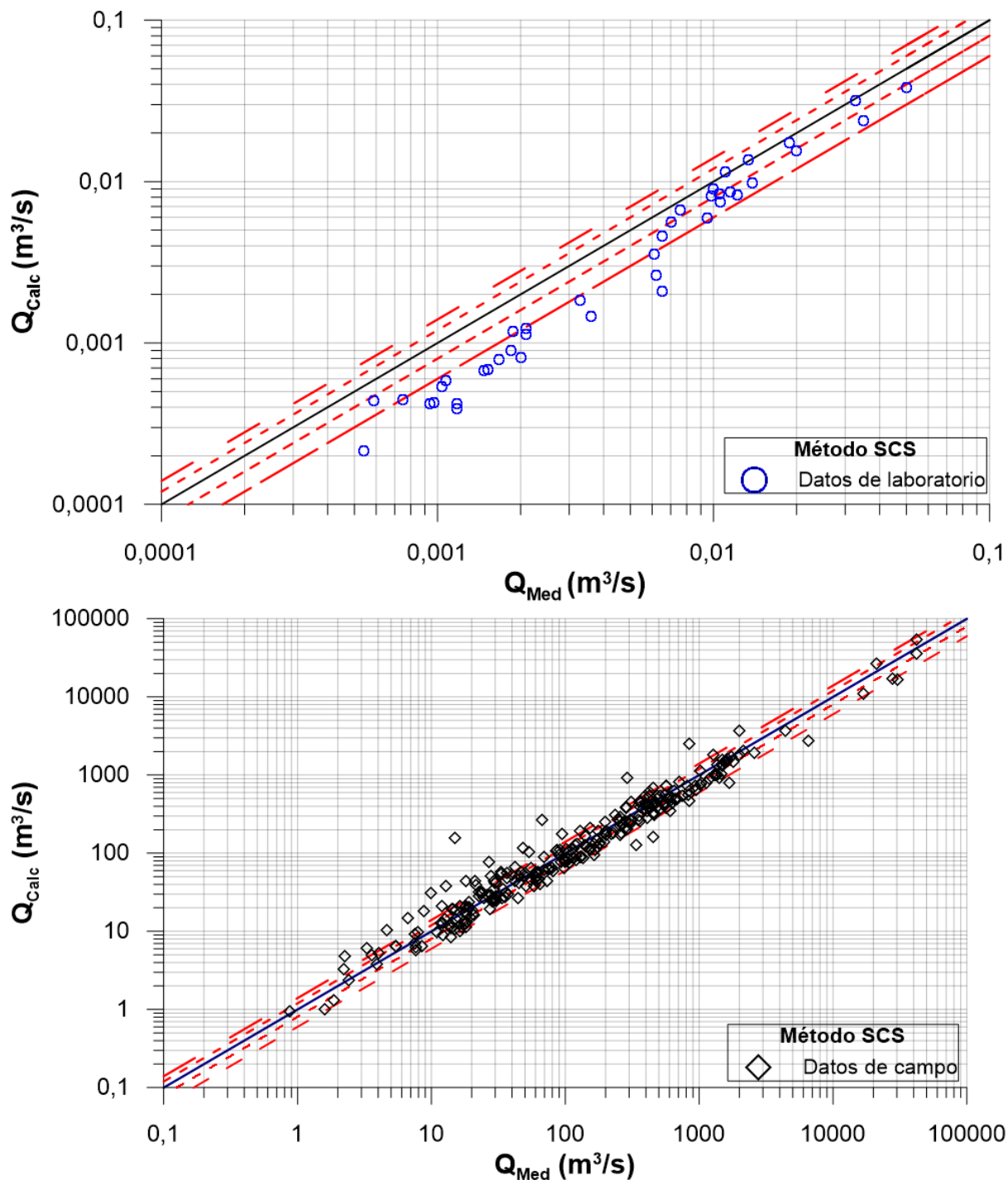


Figura C2.1. Tasas de flujo (caudales) calculados versus medidos obtenidos a partir del método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América (SCS) (1963).

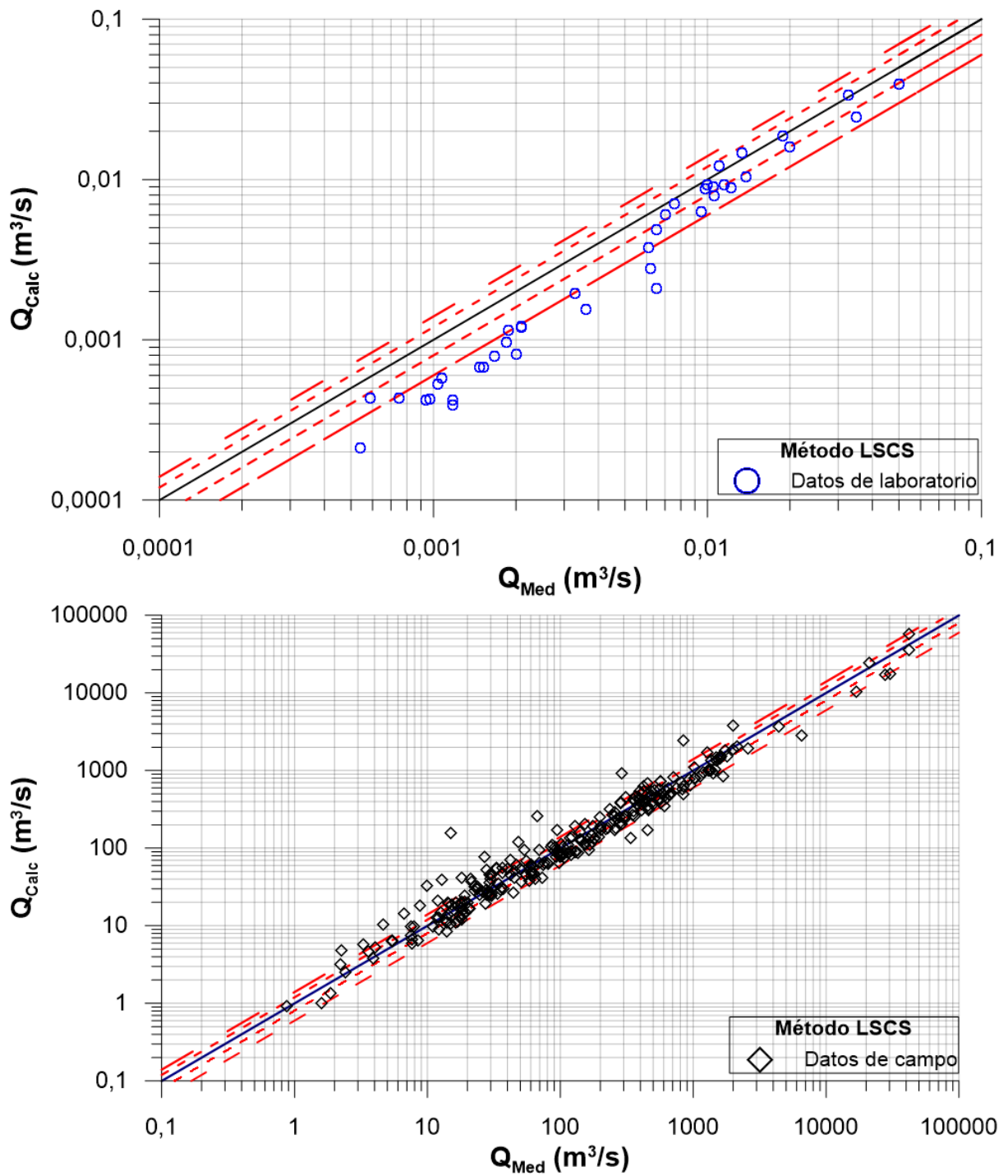


Figura C2.2. Tasas de flujo (caudales) calculados versus medidos obtenidos a partir del método Linealizado del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América (LSCS) (1963).

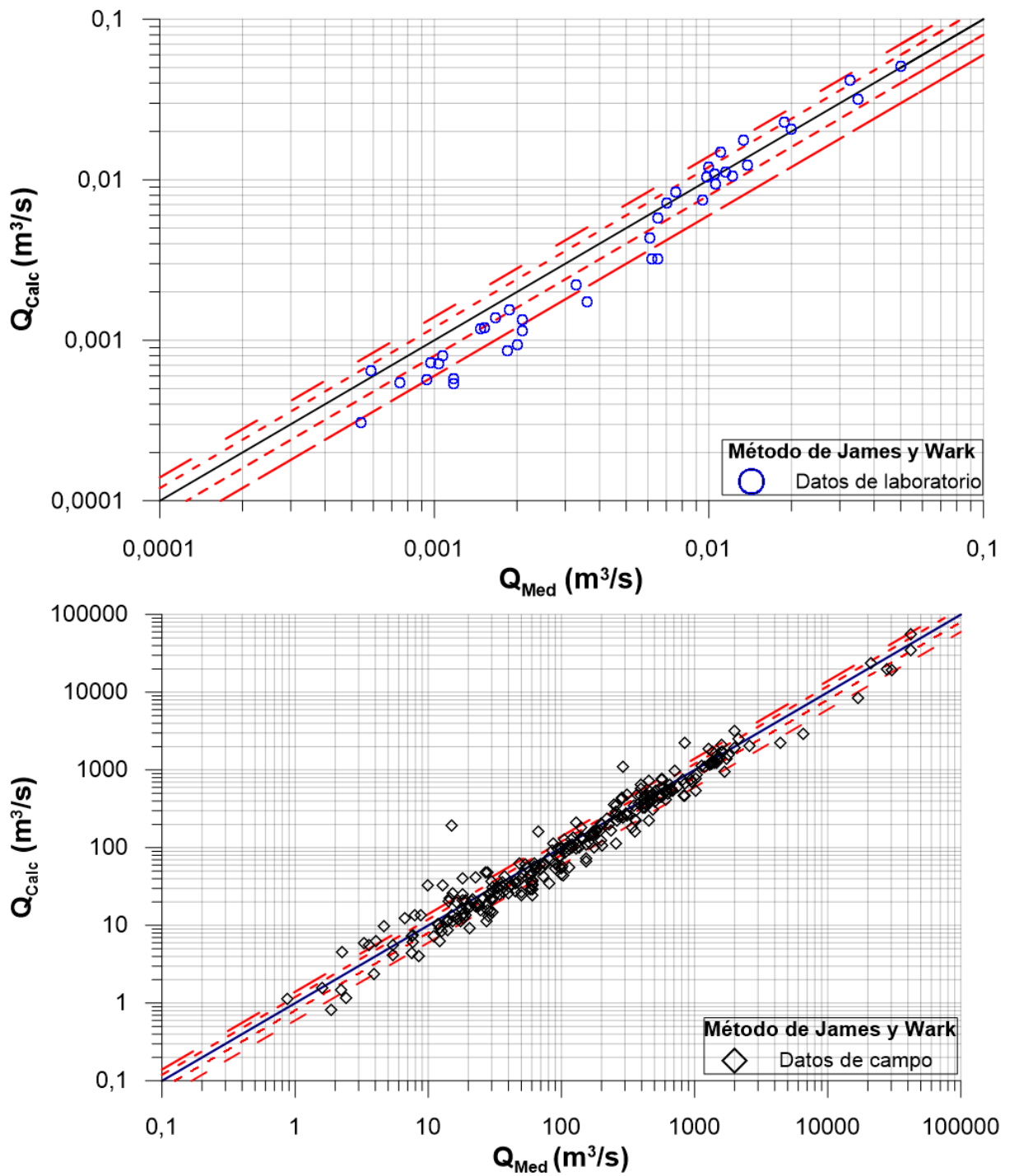


Figura C2.3. Tasas de flujo (caudales) calculados versus medidos obtenidos a partir del método de James y Wark (1992).