

Estudio de las teorías de arrastre de fondo en ríos: modelación del tramo Río Negro, sector Tobia

Study of Bottom Trawling Theories in Rivers: Rio Negro Segment Modeling, Tobia Area

LUIS EFRÉN AYALA ROJAS*

DIANA CRISTINA ARIAS ALDANA**

ASTRID JULIETH PEÑALOSA OLARTE***

RESUMEN

Fenómenos hidráulicos como la sedimentación y la socavación representan grandes problemas para el diseño y construcción de estructuras hidráulicas sobre los cauces naturales, por lo que se considera relevante su estudio. En el tramo del Río Negro, 100 m aguas arriba del puente entre los municipios de Tobia y La Montaña, dichos fenómenos son relevantes, de este modo se propone el sitio como referencia para un estudio comparativo entre las teorías representativas del fenómeno de arrastre de sedimentos. Para esto se consideró la construcción de un modelo físico a escala en el cual se estudiará el arrastre de distintos tipos de grava. El estudio evaluó condiciones del caudal mínimo, medio y máximo, los cuales se determinaron bajo un estudio hidrológico de la cuenca. Como resultado se encontró que las ecuaciones de Einstein-Brown mostraron resultados más ajustados a los resultados de la modelación física.

Palabras clave: transporte de sedimentos, modelación física, caudales naturales.

ABSTRACT

Hydraulic phenomena such as sedimentation and scouring are major problems for the design and construction of hydraulic structures on natural basins, reason why its study is considered relevant. These phenomena are relevant in the segment of Rio Negro, 100 m upstream of the bridge between the towns of Tobia and La Montaña, and therefore the site is proposed as a reference for a comparative study of representative theories of the sediment trawling phenomenon. For this purpose, the construction of a physical scale model was considered, in which the trawling of different types of gravel will be studied. The study evaluated the minimum, medium and maximum flow conditions, which were determined under a hydrological study of the basin. As a result it was found that the Einstein-Brown equations showed more adjusted results than those of the physical modeling.

Keywords: Sediment transport, physical modeling, natural flows.

FECHA DE ENVÍO: 28 DE MAYO DE 2011 • FECHA DE ACEPTACIÓN: 28 DE DICIEMBRE DE 2011

* Ingeniero civil de la Universidad de La Salle, profesor de ingeniería civil de la Universidad de La Salle. Correo electrónico: layalar@unisalle.edu.co

** Ingeniera Civil de la Universidad de La Salle, Consorcio Estructuración de Cundinamarca. Correo electrónico: dianacristinaarias@hotmail.com

*** Candidata a Ingeniera Civil de la Universidad de La Salle. Correo electrónico: bluelips_@hotmail.com

Introducción

El estudio de los fenómenos hidráulicos presentados en los ríos es importante debido a su impacto en las estructuras: como muros de contención y puentes, al igual que en las poblaciones cercanas a estas corrientes naturales. El Río Negro es una corriente torrencial, meándrica aluvial, ubicada en una zona montañosa de pendientes altas, y un río de gravas; como tal, su lecho posee partículas cuyo diámetro varía de arenas a gravas, lo que representa una resistencia al arrastre de fondo. En la actualidad no hay muchas ecuaciones que estudien el arrastre de fondo en lechos de grava.

En el Departamento de Cundinamarca, la población de Tobia se localiza sobre la ladera del Río Negro (figura 1), pero hoy en día se ve afectada por el fenómeno de



Figura 1. Localización de Tobia y Nimaima en Cundinamarca

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Nimaima>

socavación, el cual está directamente relacionado con el transporte de sedimentos; esta situación ha afectado el puente que pasa sobre el Río Negro, el cual comunica a Tobia con Nimaima. En este sitio se observa socavación en las laderas rocosas del cauce en donde está cimentado el puente, hecho que representa un gran riesgo para la población y para la estabilidad de las estructuras de contención, construidas estas para evitar deslizamientos del terreno, sobre el cual están construidas algunas viviendas de la inspección municipal de Tobia. Los resultados del estudio pretenden contribuir al entendimiento de los fenómenos de arrastre y socavación en el sector y en la posterior búsqueda de soluciones para la mitigación de riesgo en esta zona.

En la investigación se considera una comparación de las teorías de arrastre de sedimentos en el fondo del cauce, recopiladas en el trabajo de Martin (2007): Duboys (1879); Schoklitsch (1914); Shields (1936); Einstein-Brown, Kalisnske (1947); Levi (1948); Sato Kikkawa y Ashida (1658); Rottner (1959); Garde y Albertson (1961); Frijlink, Yalin (1963); Pernecker y Vollmers, Inglis y Lacey (1929); Bogadi, Garg, Agrawal y Shigh, Meyer-Peter y Müller (1948). Con este estudio comparativo se pretende identificar cuál teoría evalúa de manera más adecuada el transporte de fondo en el sitio de estudio sobre el Río Negro, para así aplicar esta teoría en el estudio de diferentes fenómenos que se relacionan con el transporte de sedimentos en ríos de similares características y ampliar el conocimiento en el campo de la hidráulica fluvial en ríos colombianos.

Marco teórico

El transporte de sedimentos puede clasificarse: de fondo o en suspensión, esto depende de las características hidráulicas de la corriente y físicas del material arrastrado; por tanto, si dos ríos tienen tramos semejantes, con idéntico material en el fondo, transportarán las mismas cantidades de material de fondo bajo condiciones hidráulicas semejantes. Lo anterior no ocurre con el material en suspensión. De manera general, un río puede transportar el material de suspensión que llegue a él, casi independientemente de las características hidráulicas de la corriente. Así, dos ríos semejantes con igual material en el fondo, pero uno con cuenca protegida o forestada y otro con una cuenca desprotegida con fuertes pendientes y material suelto sobre su superficie, arrastran cantidades diferentes de material de lavado, con lo que el primero llega al extremo de no transportar nada de ese material.

Del transporte de sedimentos se han realizando numerosas investigaciones sin que exista una ecuación que relacione adecuadamente las propiedades del fluido y del sedimento para cualquier caso. Incluso la mayoría de aproximaciones han relacionado los parámetros: intensidad de flujo (ψ) e intensidad del transporte (Φ) según las ecuaciones 1 y 2 (Martin, 2007).

$$\varphi = \frac{(S_s - 1)D}{R' S_e} \quad (1)$$

Donde:

S_s : es la gravedad específica de los sólidos.

R' : es la parte del radio hidráulico del lecho que corresponde al efecto friccional de los granos de sedimento.

S_e : es la pendiente de la línea de energía del flujo.

D : es el diámetro de sedimento en consideración.

$$\phi = \frac{i_B q_B}{i_b \rho_s g^{3/2} D^{3/2} \sqrt{S_s - 1}} \quad (2)$$

$i_B q_B$: es la tasa de transporte de cada fracción de tamaño.

D : representado en el lecho en una proporción.

$i_B \%$: de la granulometría: es la gravedad.

El arrastre de fondo se sustenta en el concepto de inicio de movimiento de las partículas de sedimento estudiado por Shields (1936). En el diagrama de Shields (figura 2) se relaciona Froude de corte (ecuación 3) y Reynolds de corte (ecuación 4), al inicio de movimiento, por lo que las variables que intervienen en estas son incluidas en muchas de las formulaciones (Martín, 2007).

$$Fr_* = \frac{dS}{\gamma' D} = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) D} \quad (3)$$

$$Re_* = \frac{(gdS)^{1/2} D}{\nu} \quad (4)$$

Donde es el esfuerzo cortante que el flujo ejerce sobre el fondo, en N/m^2 , y está dado por la ecuación 5 (Martín, 2007).

$$\tau_0 = \gamma R S = \rho g R S \quad (5)$$

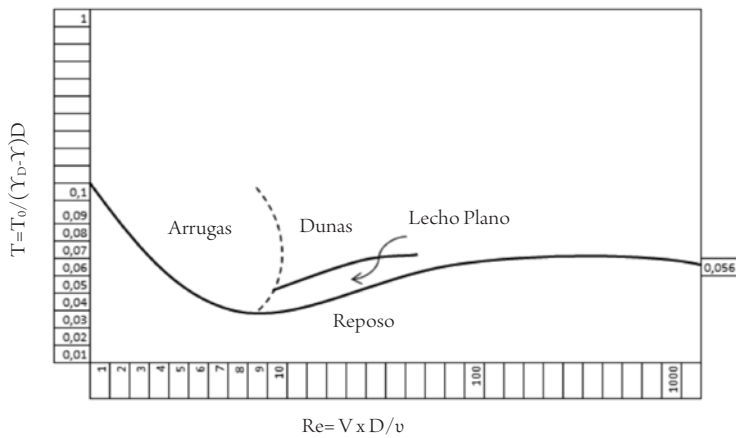


Figura 2. Diagrama de Shields

Fuente: <http://dc233.4shared.com/doc/N00XGaVc/preview.html>

S = pendiente hidráulica del escurrimiento.

R = radio hidráulico del escurrimiento en m.

d = tirante o profundidad de la corriente en m.

γ_s, γ = peso específico de las partículas y del agua respectivamente.

D = diámetro de la partícula en m. Para obtener el tamaño de las partículas se efectúa un análisis granulométrico, por lo que generalmente D se refiere a un diámetro de cribado.

ν = viscosidad cinemática del agua, en m/s. Depende de la temperatura.

La información básica necesaria para el análisis del arrastre es de dos tipos, una de tipo granulométrico del material del lecho del cauce (diámetros característicos) y otra de tipo hidráulico, a través de las características de flujo.

Desarrollo experimental

Inicialmente se realizó una recopilación de información sobre la zona de estudio como: temperatura promedio, caudales máximos medios y mínimos del cauce, batimetría (ver figura 1), temperatura promedio, fenómenos hidráulicos que se presentan, tipo de sedimento, cartografía de la zona, fotografías y estudios previos realizados.

Con la información del Río Negro de acuerdo con sus características morfológicas, hidrológicas e hidráulicas, y por medio de una granulometría se escaló el agregado global (tabla 1) donde se pudo confirmar el arrastre de sedimentos desde finos hasta gruesos en diferentes porcentajes; por último, utilizando el sistema unificado de clasificación de suelos se obtuvo que el sedimento representativo es una grava bien gradada (ver figura 2). Analizadas todas las variables y el comportamiento del tramo se definieron los datos base para así llevarlo al modelo.

Tabla 1. Cálculo de las escalas teóricas usando un material de diferente densidad al del cauce

ESCALA DIÁMETRO SEDIMENTO	ESCALA LONGITUDINAL	ESCALA DE PRESIÓN	ESCALA PROFUNDIDAD	ESCALA PENDIENTE	ESCALA VISCOSIDAD
E_D	E_x	$E_{\Delta p}$	E_y	E_s	E_U
0.41	100	10.8125	21.05498	0.2105498	4.588571

Al tenerse en cuenta la información recopilada se hace la selección de la escala y materiales para la construcción del modelo (tabla 2); además se consideran otros parámetros como el espacio con el que se cuenta en el laboratorio y tamaño de las partículas que estarán dentro del modelo; para la escala cinemática se debe garantizar que la velocidad en el prototipo (ver figura 3); y en el modelo sean similares, así, para que esto se cumpla también debe haber similitud geométrica.

Tabla 2. Cálculo de las escalas de caudal sólido, líquido y tiempo sedimentológico

ESCALA CAUDAL QR	ESCALA TIEMPO SEDIMENTOLÓGICO TS	ESCALA CAUDAL SÓLIDO QS
9661,23137	2439,02439	86,32544

Fuente: elaboración propia.

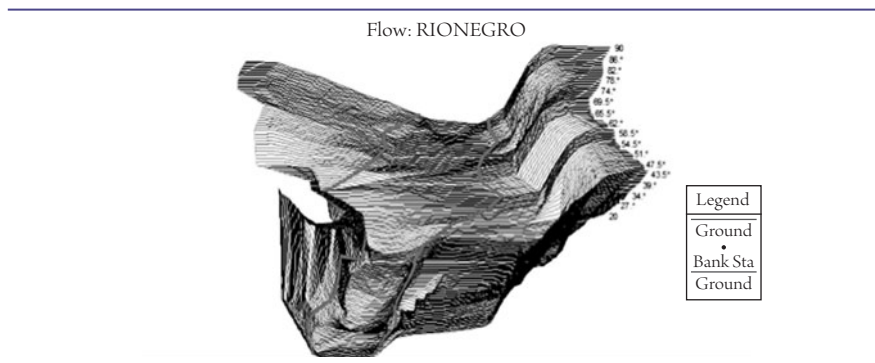


Figura 3. Batimetría del tramo de estudio

Fuente: elaboración propia.

De igual manera, en la tabla 3 se presentan los cálculos para las escalas para el caudal líquido (Q), tiempo sedimentológico (ts) y caudal sólido (Qs).

Tabla 3. Cálculo de los caudales del modelo

Q (M ³ /s) RÍO	Q (M ³ /s) MODELO	Q (L/s) MODELO
69,62	0,00720595	7,20594825
34,15	0,00353466	3,53465985
44,35	0,00459051	4,59051215
11,42	0,00118165	1,18164717

Fuente: elaboración propia.

Seleccionados los caudales en el campo a modelar, se procede a calcular los caudales equivalentes que deben ser entregados por el sistema hidráulico del laboratorio. En la tabla 3 se presentaron los caudales a escala utilizados. Para la calibración del modelo se ajustó la válvula para obtener los caudales escalados, después se midió la altura de la lámina de agua y se comparó con la obtenida en campo; la temperatura del agua en el momento de los aforos era 20 °C y la altura de la lámina de agua fue de 1,18 m, lo que le corresponde a un área mojada de 13,19 m², por medio de la que se obtuvo el caudal $Q = 1,1936 \text{ m/s} (13,19 \text{ m}^2) = 15,74 \text{ m}^3/\text{s}$. Posteriormente, por medio del programa HEC RAS4.1.0 se calibró un modelo numérico al tenerse en cuenta los parámetros descritos junto a los caudales medios, mínimos y máximos. El modelo fue calibrado bajo la condición de flujo uniforme para un caudal de 15,74 m³/s, (figura 4), en el cual varía la rugosidad y las condiciones de frontera

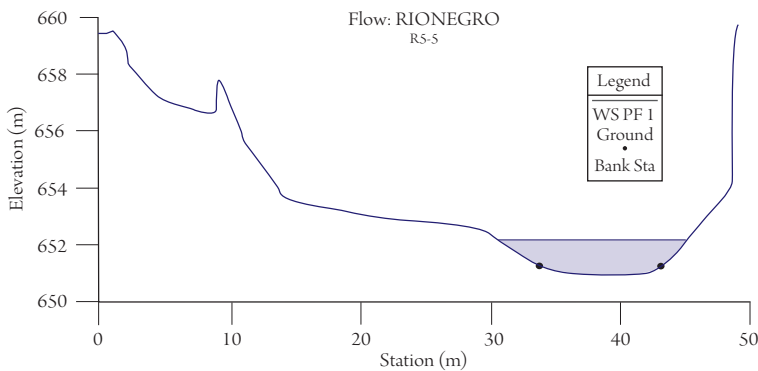


Figura 4. Sección transversal de la sección de aforo, altura de lámina de agua para el caudal de calibración 15,74 m³/s

Fuente: elaboración propia.

con el fin de obtener un nivel de la lámina de agua igual 1,18 m, en la sección donde se realizaron los aforos y modelación hidráulica.

Una vez calibrado el modelo se procedió a modelar los tres caudales en HEC RAS: medio ($34,15 \text{ m}^3/\text{s}$), máximo ($69,62 \text{ m}^3/\text{s}$) y mínimo ($11,42 \text{ m}^3/\text{s}$); adicionalmente se modeló el caudal máximo que se puede simular en el laboratorio ($44,35 \text{ m}^3/\text{s}$) con el fin de obtener los parámetros hidráulicos, tales como: radio hidráulico, nivel de la lámina de agua, perímetro mojado y velocidad media en la sección de estudio.

Construcción del modelo y calibración

La topografía del tramo de estudio se simuló por medio de láminas de icopor, empleando las escalas calculadas; se aplicó impermeabilizante acrílico y se fijó con silicona en el canal con el fin de evitar fugas (figura 5).



Figura 5. Modelación de la topografía

Fuente: elaboración propia.

Para el material del lecho se empleó porcelanicrón reproduciendo la granulometría del río a escala; además se midió el tamaño de las partículas por medio de un calibrador y se modelaron las partículas de manera semejante a las formas de los granos en el lecho del río. El porcelanicrón fue impermeabilizado con resina y pintura laca para minimizar el efecto del agua. Para la simulación del caudal se instaló una bomba de 4,5 HP (figura 6) con capacidad para suministrar caudales hasta de 65 l/s al modelo, provisto con tubería de succión y de descarga de $2 \frac{1}{2}$.

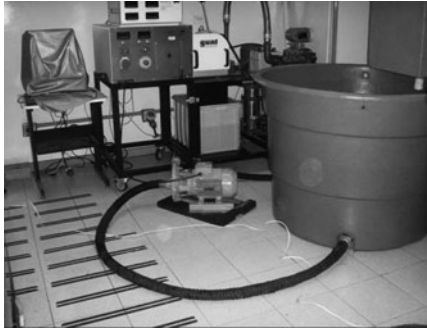


Figura 6. Sistema de carga hidráulica del modelo

Fuente: elaboración propia.

El caudal es calibrado por medio de una válvula de cierre para variar el caudal suministrado, que se determina mediante diversos ensayos y un aforo volumétrico; de igual manera se revisa que la altura de la lámina de agua corresponda con lo observado y calculado para el río. Debido a que el caudal de 1,18 l/s no se pudo calibrar por medio de la válvula, se utilizó una bomba de menor potencia: 1,5 HP.

Se realizaron ensayos con fondo móvil, con los caudales definidos junto con tres pendientes diferentes (S_1, S_2, S_3) (tabla 4). El material del lecho es colocado sobre la topografía simulada. Se suministra el caudal correspondiente, se realizó el aforo de caudal sólido en la sección de interés: se tomó el tiempo que una determinada cantidad de material es arrastrado por la sección; este material es recogido, pesado y devuelto al modelo. Se realizaron diez aforos por cada caudal, y variando la pendiente del canal se realizan diez aforos por cada combinación. Con un total de tres caudales y tres pendientes se tiene un total de noventa datos.

Tabla 4. Parámetros hidráulicos del cauce en la sección transversal

HIDRÁULICOS Y GEOMÉTRICOS					
Q	Caudal	L/s	11,42	34,15	44,35
A	Área	m ²	10,61	23,16	28,87
P	Perímetro	m	13,89	20,91	26,22
R	Radio	m	0,763858891	1.107604.017	1.101.067.887
d	Diámetro	mm	1	1,78	2,03

Continúa

HIDRÁULICOS Y GEOMÉTRICOS					
B	Base	m	10,61	1.301.123.596	1.422.167.488
q	Caudal unitario	m ³ /s/m	1.076.343.073	2.624.654.577	311.847.939
S	Pendiente	m/m	0,003200358	0,003200358	0,003200358
PROPIEDADES DEL AGUA					
T	Temperatura	C ^o	20 C ^o	20 C ^o	20 C ^o
ρ	Densidad	Kg/m ³	1000	1000	1000
μ	Viscosidad	m ² /s	0,000001	1,00E-06	1,00E-06
PROPIEDAD DE LAS PARTÍCULAS					
ρ _s		2730	2730	2730	2730
γ _s		2730	2730	2730	2730
σ _s		2.860.387.768	2.860.387.768	2.860.387.768	2.860.387.768
D _m (mm)		18,29	18,29	18,29	18,29
PROPIEDAD DE LAS PARTÍCULAS					
D15 (mm)		5,5	5,5	5,5	5,5
D35 (mm)		17	17	17	17
D50 (mm)		23	23	23	23
D65 (mm)		32	32	32	32
D84 (mm)		45	45	45	45
D90 (mm)		50	50	50	50
PENDIENTES					
		51	52	53	
Modelo		0,00298507	0,0115	0,0152	
Río		0,00062851	0,00242132	0,00320036	

Fuente: elaboración propia.

Se calcula el transporte de sedimentos para las diferentes pendientes establecidas en el laboratorio. Los resultados obtenidos en el laboratorio son comparados luego con el caudal sólido deducido por las diferentes ecuaciones de transporte de sedimentos; se estudian los rangos de aplicación de cada ecuación con el fin de determinar la validez del resultado (figuras 7 y 8).

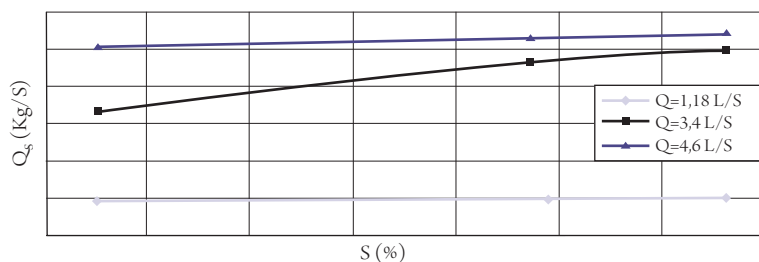


Figura 7. Q_s vs. S (%)

Fuente: elaboración propia.

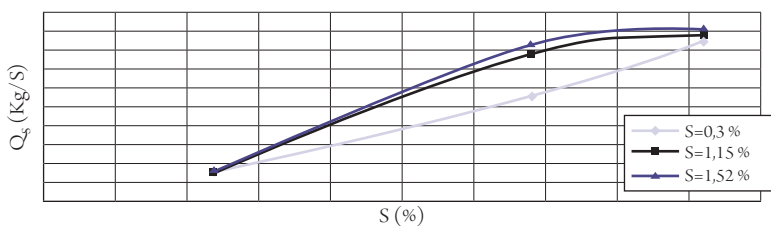


Figura 8. Q_s vs. Q

Fuente: elaboración propia.

Cálculos y resultados

El caudal sólido obtenido en los ensayos en el canal son multiplicados por la escala del caudal sólido obtenido ($EQ_s = 86,3254$), para obtener el caudal sólido que equivaldría al estimado en el río. Los resultados se presentan en la tabla 4 y figura 9.

Tabla 4. Caudal sólido promedio obtenido en el laboratorio

Q (m^3/s)	S	Q_s RÍO (GR/s)	Q_s RÍO (KG/s)
11,42	0,00063	1325,50022	1,32550
	0,00242	1363,34850	1,36335
	0,00320	1413,28628	1,41329
34,15	0,00063	4749,07965	4,74908
	0,00242	6736,83784	6,73684
	0,00320	7157,41851	7,15742

Continúa

Q (M ³ /s)	S	Q _s RÍO (GR/s)	Q _s RÍO (KG/s)
44,35	0,00063	7325,69398	7,32569
	0,00242	7614,81274	7,61481
	0,00320	7838,95639	7,83896

Fuente: elaboración propia.

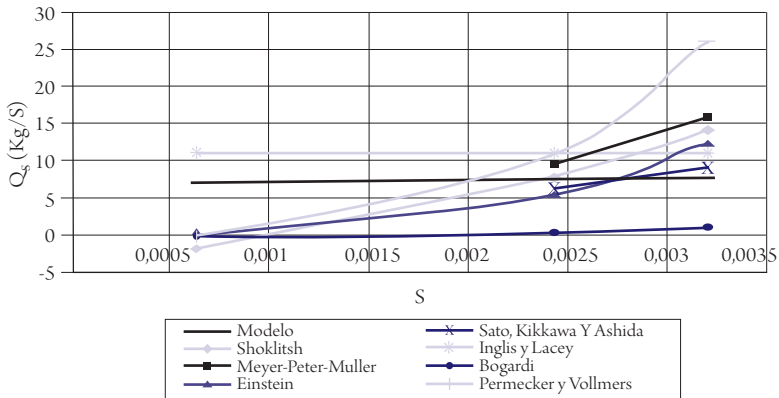


Figura 9. Q_s vs. S para un caudal de 34,15 m³/s

Fuente: elaboración propia.

Se observa que para las curvas de caudal en función de la pendiente, la ecuación más precisa es la ecuación de *Einstein-Brown* (figura 10).

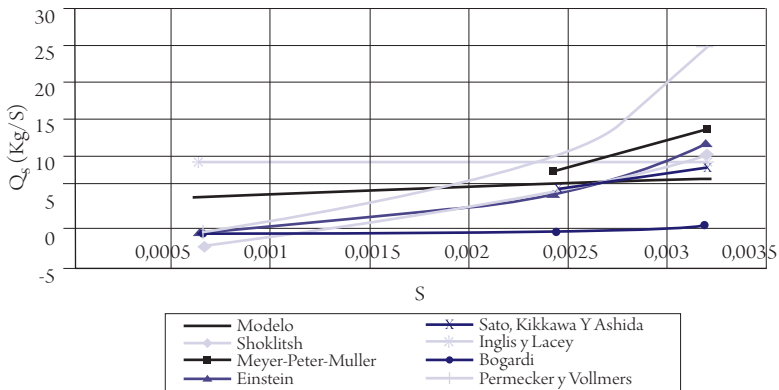


Figura 10. Q_s vs. S para un caudal de 44,35 m³/s

Fuente: elaboración propia.

Para una pendiente alta se recomienda usar *Sato-kikawa* y *Ashida* esta ecuación relaciona la rugosidad, tensión y velocidad de corte (figura 11).

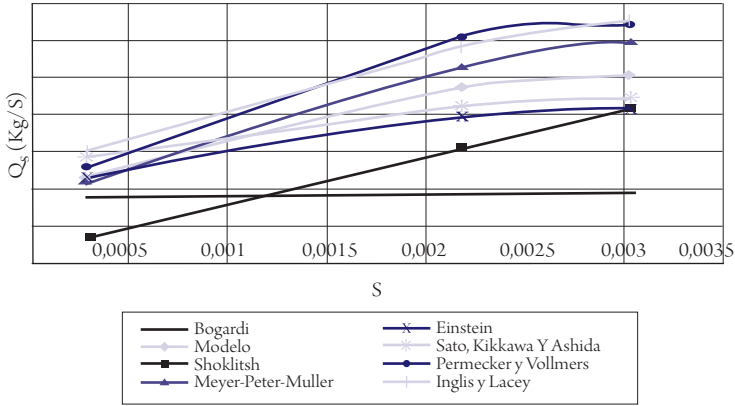


Figura 11. Q_s vs. S para una pendiente de 0,24213 %

Fuente: elaboración propia.

Shoklitsch relaciona el caudal de sedimentos con el caudal líquido, al considerarlo necesario para iniciar en el movimiento un caudal en exceso por encima de un caudal crítico, y esto para mantener la misma tendencia que la curva en el modelo.

Conclusiones y recomendaciones

Cuando se quiera modelar un río de gravas en un futuro, se recomienda estudiar detenidamente la distribución de material en las capas superficiales y subsuperficiales, con el fin de reproducir las mismas condiciones de acorazamiento en el modelo.

Se encontraron las siguientes ecuaciones de arrastre de fondo aplicables al Río Negro: Shoklitsh, Meyer-Peter-Muller, Einstein-Brown, Inglis y Lacey, Sato-kikawa y Ashida, Pernecker y Vollmers, Bogardi, de las cuales se encontró que Inglis y Lacey no brindan resultados confiables puesto que ignoraban algunas variables que son fundamentales.

Bogardi subestima el cálculo de caudal sólido ya que presenta gran diferencia al comparar con las otras ecuaciones, e incluso con el caudal máximo, el caudal só-

lido no supera 1 kg/s, junto con Inglis y Lacey esta ecuación no tiene en cuenta la condición crítica de arrastre, es decir, no importa cuán reducido sea el caudal líquido, y la velocidad de corte. Así, esta ecuación no se considera adecuada para el cálculo de arrastre de fondo en este proyecto.

Shoklitsch relaciona el caudal de sedimentos con el caudal líquido, considerando necesario para iniciar el movimiento un caudal en exceso por encima de un caudal crítico, por lo que esto afecta los resultados para caudales bajos y pendientes bajas, donde el caudal crítico no se logra.

Para caudales líquidos de medios a altos se recomienda utilizar Meyer-Peter-Muller, esta ecuación relaciona no solo la rugosidad del grano, sino que también la rugosidad total (granos y formas de fondo), incluso para lechos acorazados, al igual que la pendiente y el diámetro de las partículas, y aunque no es la más cercana al comportamiento del modelo para las pendientes altas, describe un comportamiento similar.

En general las ecuaciones recomendadas para el caso de estudio en el Río Negro son Einstein-Brown, Meyer-Peter-Muller, Sato-kikawa y Ashida que comparten el uso de Φ = parámetro de caudal sólido adimensional, y de Ψ = intensidad de flujo, lo que explica la similitud en su comportamiento; es la ecuación Einstein-Brown, la que en general se ajusta de manera más adecuada a la mayoría de las combinaciones.

Referencias

- Armitage, N. y Rooseboom, A. (2010). The link between Movability Number and Incipient Motion in river sediments. *Water SA*, 36.
- Berezowsky, M. y Jiménez, C. (1993). Cálculo de perfiles en ríos de fondo arenoso con métodos de resistencia al flujo de hidráulica fluvial. *Series del Instituto de Ingeniería*, núm. 557.
- Jiménez, P. (2007). *Estudio sobre estabilidad de traviesas y lechos de escollera con transporte sólido* [tesis de grado]. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Martín, J. (2007). *Ingeniería de ríos* (2ª. ed.). Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Maza, J. y García, F. (1996). Transporte de Sedimentos. En *Manual de Ingeniería de Ríos*.

- Molso, O. (2004). *Estudio numérico-experimental de la dinámica de la zona cercana a la costa* [tesis doctoral]. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Rodríguez, A. (2004). Especialización en recursos hidráulicos y medio ambiente, hidráulica fluvial. En *Memorias*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Vergara, M. (1993). *Técnicas de modelación en hidráulica*. S. D.

