

Reduction of erosion in a catchment structure in gravelly sandy river beds with gabion protection, applying hydraulic modeling

Marcos Yonel Acuña García ¹, Ariana Fernanda Cabrera Bringas ¹, Luis Vásquez Ramírez, Dr. ¹

¹ Universidad Nacional de Cajamarca, Perú, macunag19_1@unc.edu.pe, acabrerab19_1@unc.edu.pe, lvasquez@unc.edu.pe

Abstract– Downstream erosion of catchment structures is a natural and very common process, most of it is due to the dragging of sediments, erosion, and foreign elements contained in its channel. Therefore, it is necessary to apply protection methods to mitigate the failure process during its useful life of the structure, therefore, the present work focuses on proposing protection methods to reduce the depth of erosion using a gabion with different gravel diameters in the erosion pool downstream of the hydraulic structure, built on burdensome arene beds. A brief comparison of this dimension was made by applying protection methods to the model and without them, in this way it was possible to evaluate the increase or decrease of the variable mentioned above. The research is based on physical modeling and based on the principles of hydraulic similarity (model – prototype). The results for the Remonta II diversion dam infer that increases in the depth, length and erosion time dimensions are related to gravel diameter and maximum flow rates.

Keywords– erosion, catchment structure, gravelly arene beds.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Disminución de la erosión en una estructura de captación en lechos de ríos areno gravosos con protección de gaviones, aplicando modelamiento hidráulico

Marcos Yonel Acuña García ¹, Ariana Fernanda Cabrera Bringas ¹, Luis Vásquez Ramírez, Dr. ¹

¹ Universidad Nacional de Cajamarca, Perú, macunag19_1@unc.edu.pe, acabrerab19_1@unc.edu.pe, lvasquez@unc.edu.pe

Resumen– La erosión aguas abajo de estructuras de captación es un proceso natural y muy común, la mayor parte se debe al arrastre de sedimentos, erosión, y elementos extraños contenidos en su cauce. Por lo que, es necesario la aplicación de métodos de protección para mitigar el proceso de falla durante su vida útil de la estructura, por ello, el presente trabajo se centra en plantear métodos de protección para reducir la profundidad de erosión utilizando un gavión con distintos diámetros de grava en la poza de erosión aguas abajo de la estructura hidráulica, construidas sobre lechos areno gravosos. Se realizó una breve comparación de esta dimensión aplicando métodos de protección al modelo y sin ellos, de esta forma se pudo evaluar el incremento o disminución de la variable mencionada anteriormente. La investigación se fundamenta en el modelamiento físico y sustentándola en los principios de similitud hidráulica (modelo – prototipo). Los resultados para la presa derivadora Remonta II, infieren que los incrementos en las dimensiones profundidad, longitud y tiempo de erosión están relacionados con el diámetro de grava y los caudales máximos.

Palabras clave– erosión, estructura de captación, lechos areno gravosos.

I. INTRODUCCIÓN

Los lechos con cauces naturales al pasar el tiempo y estar expuestos a los fenómenos naturales y antrópicos, experimentan cambios en su morfología; la socavación en estructuras de derivación es común, muchas veces al arrastre de sedimentos, erosión, y elementos extraños contenidos en su cauce.

Alvarado [1], en los ríos, el caudal, la topografía y la forma o geometría en planta están interrelacionadas, por lo tanto, afectadas por la erosión de las márgenes, que es un fenómeno complejo influenciado por muchos factores, como el caudal en el río, transporte de sedimentos, topografía del cauce, propiedades de las márgenes, etcétera., siendo así [2] menciona, uno de los principales problemas para los ingenieros es la predicción de las características de socavación que se producen en la salida y aguas abajo de las estructuras hidráulicas. en tal sentido [3], indica que, la socavación local causada por el transporte de sedimentos puede provocar daños catastróficos en las estructuras del río, y la socavación general también puede provocar problemas de derrumbe de diques y meandros excesivos del río. También [4], define a la socavación como la acción erosiva de los sedimentos debida a los remolinos generados en un río o corriente marina al encontrarse con obstáculos naturales (bancos cóncavos de meandros) o artificiales (pilares de puentes, estructuras de derivación).

Debido a los enormes riesgos involucrados, la socavación se ha estudiado durante mucho tiempo.

Maciej Serda [5], en su investigación analiza tres tipos de estructuras disipadoras de energía: gaviones, bolsacretos y espigos, combinando este último con gaviones y luego con bolsacretos. Posteriormente, con la información obtenida, se realizó la gráfica de energía específica sobre el eje, para cada una de las condiciones establecidas y se determinó cuál alternativa resulta ser la más apropiada para mitigar este fenómeno de socavación, teniendo en cuenta aspectos técnicos y económicos. [6], en su investigación discute la necesidad de colocar un enrocado de transición aguas abajo de la poza disipadora del barraje móvil para dispersar el flujo por todo el ancho del cauce del río y así evitar la incisión del cauce. Concluyendo que, es necesario colocar un enrocado de transición aguas abajo de la poza disipadora del barraje móvil, esto conlleva a que el flujo salga o se disperse por todo el ancho del río sin producir una incisión en el cauce. Estos enrocados deben ser diseñados teniendo en cuenta las altas velocidades y presiones fluctuantes que se generan en flujos macro turbulentos. En conclusión [7] encontró una relación entre la magnitud de la erosión y la longitud del alcance del río entre las estructuras de control de pendiente (GSC), así como el gradiente de la superficie del agua, donde se descubrieron agujeros de socavación en una variedad de lugares. Un descubrimiento de investigación sorprendente fueron los agujeros de socavación encontrados aguas arriba de las crestas de los GCS: se encontraron 16 de esos agujeros de socavación.

En su investigación R. García [8], indica que, se han venido incrementando y principalmente el riesgo de la estabilidad de las estructuras de derivación ante un proceso de erosión activo que afecte las cimentaciones del Barraje, así como también [9], nos indica que la ocurrencia de fregado en los lechos de ríos o canales abiertos sin revestimiento se considera como el principal factor que causa la falla de las estructuras hidráulicas porque reduce la cobertura de cimentación de las estructuras y, por lo tanto, amenaza su estabilidad. Ante la inestabilidad de estructuras de derivación Kosič [10], presenta enfoques novedosos para la detección de socavación utilizando sensores de socavación instalados, como dispositivos flotantes. Más recientemente el enfoque se ha desplazado hacia enfoques de detección de daños basados en vibraciones para identificar la socavación utilizando la respuesta de las estructuras afectadas, mediante el control de las frecuencias naturales [11], formas de

modo (y curvatura) [12], [13], [14], así como varios otros parámetros dinámicos [13]. Se puede decir que esto es más informativo, ya que evalúa directamente el impacto que tiene un agujero de socavación en la estructura afectada, en lugar de simplemente medir la profundidad de la socavación. En general [10], no será posible instalar sistemas de sensores en todos los puentes de una red dada debido a los presupuestos a menudo limitados de las agencias de gestión de activos. También se requieren enfoques alternativos para facilitar la evaluación del riesgo que plantean las acciones hidráulicas y de socavación en los puentes.

Recientemente Yang DY [15], propusieron un enfoque de optimización de recursos basado en el riesgo para las contramedidas de socavación al considerar las incertidumbres de un futuro climático. Investigaciones recientes se han centrado particularmente en el impacto de la acumulación de escombros durante las condiciones de flujo máximo [16] con recomendaciones que sugieren un aumento de hasta un 50% para las estimaciones de profundidad de socavación para acomodarlo [17]. Sin embargo [18], los estudios no exploran la progresión del riesgo de socavación durante las condiciones de flujo máximo, cuando la tasa de socavación es más alta y tampoco consideran los factores del suelo que contribuyen a su erosionabilidad, lo que a su vez afecta la formación/progresión de la socavación. [19] manifiestan que, los estudios existentes brindan información importante sobre el impacto potencial del cambio climático en el riesgo de socavación, la falta de modelos climáticos e hidrológicos confiables significa que las predicciones del riesgo de socavación pueden no ser precisas. Las consideraciones adecuadas de modelado hidrológico e hidráulico (es decir, la relación entre el caudal del río, la profundidad del caudal y la descarga) pueden ayudar a los administradores de activos a estimar la probabilidad de que la profundidad de socavación real exceda la profundidad máxima de socavación (o socavación de diseño).

En los ríos de alta montaña, debido a las pendientes fuertes, erosión y cauces encañonados, resulta importante estudiar los efectos de máximas avenidas en distintos tipos de estructuras, como captaciones derivadoras, evaluando la colmatación y erosión que produce las fuerzas cortantes del agua, asimismo evaluar mecanismos de mitigación o protección para este fenómeno.

Dada la falta de evaluación y mantenimiento de estructuras de derivación, se plantea como objeto en la presente investigación evaluar y estimar la profundidad de erosión generada en la descarga de una estructura de captación para un método de protección, utilizando gaviones con cuatro diámetros de grava diferente y distintos caudales del río, en el cual se cree que para mayor diámetro de grava, la erosión es menor, para ello se ha planteado el modelamiento físico, con el fin de determinar la mayor eficiencia de los gaviones, partiendo de los caudales máximos y así sustentar el uso de dicho método para la mitigación del fenómeno de erosión. Con la presente investigación experimental se pretende mitigar los efectos de erosión mediante gaviones con distintos espesores de grava conseguida en campo y laboratorio.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación

La cuenca del Río Chonta punto emisor captación “Remonta II” pertenece a la vertiente del Atlántico, forma parte de la cabecera de la cuenca del “Amazonas”, ubicada al norte del Perú, en la Región, Departamento, Provincia y Distrito de Cajamarca (Figura 1). Sus aguas descargan en los ríos “Cajamarquino”, “Marañón” y al caudaloso río “Amazonas”.

La cuenca “chonta” punto emisor captación “Remonta II”, se encuentra ubicada en la Zona 17 S y coordenadas UTM, Este (779825.772) Norte (9210103.88) Altitud 2693 m.s.n.m.

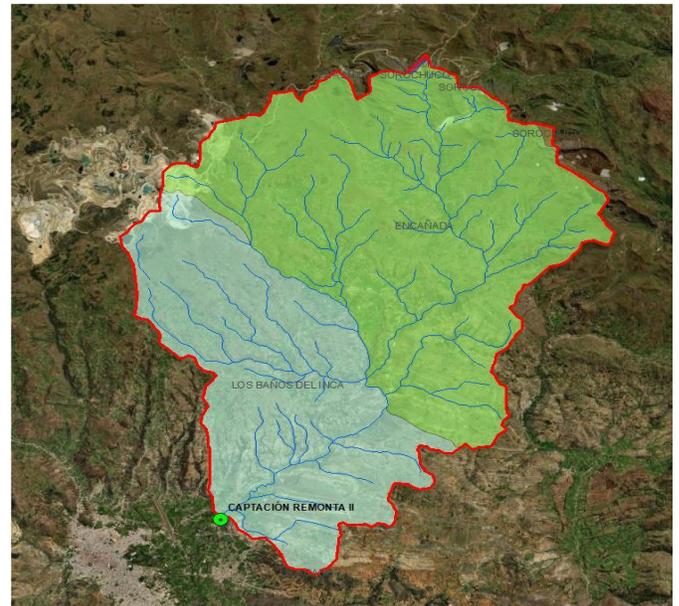


Fig. 1 Cuenca Chonta, Cajamarca.

La cuenca presenta un área de 343.86 km². Su elevación está entre los 2700 m.s.n.m y 4050 m.s.n.m, y su perímetro es de 92.6210 km. El principal río de la cuenca, es el río “Chonta”, presenta característica de alta montaña, presenta una escorrentía de tipo perenne el cual varía en los meses de mayo a septiembre. El principal uso de sus aguas está destinado para uso poblacional, y son captadas en la captación Remonta II por la junta de regantes de dicha captación. En la Fig. 1 se observan los límites distritales y la red hídrica de la cuenca “Chonta”.

La captación de derivación seleccionada fue “Remonta II” considerada como prototipo en la investigación, se encuentra emplazada en el lecho arenoso gravoso del río Chonta, enclavada en la sierra de los Andes de la región norte del Perú.

Este estudio fue de diseño experimental, cuantitativo de campo y laboratorio de nivel correlacional.

Se utilizaron sedimentos no cohesivos de río de consistencia dura, con un modelo a escala reducida de granito con una escala de 1:60 mostrada en la Fig.3, para ser utilizado en laboratorio, sistemas de recirculación de agua, canal de pendiente variable

de sección rectangular, correntómetro digital, gaviones con diámetros de grava distintos y vertedero de pared gruesa.

mm (N°3/8), 6.35 mm (N° 1/4), 4.75 mm (N°4), 2.00 mm (N°10)].

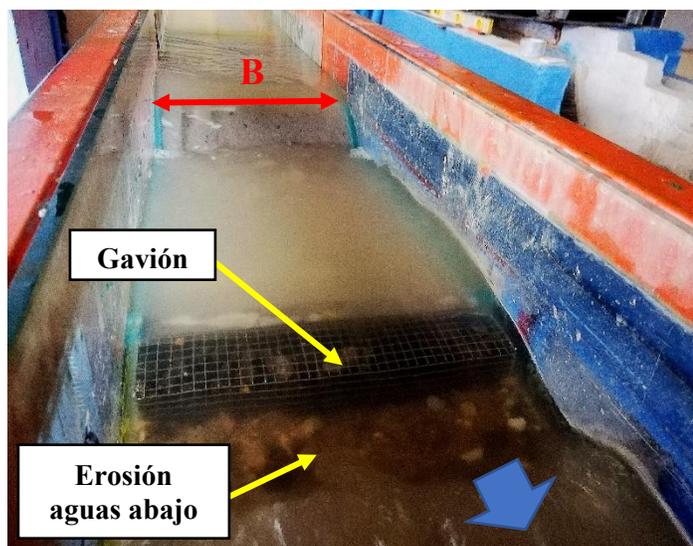


Fig. 2 Modelo físico presa derivadora, escala 1:60

La investigación fue planteada en cuatro etapas, fundamentada en el análisis dimensional y teoría de similitud hidráulica entre modelo y prototipo.

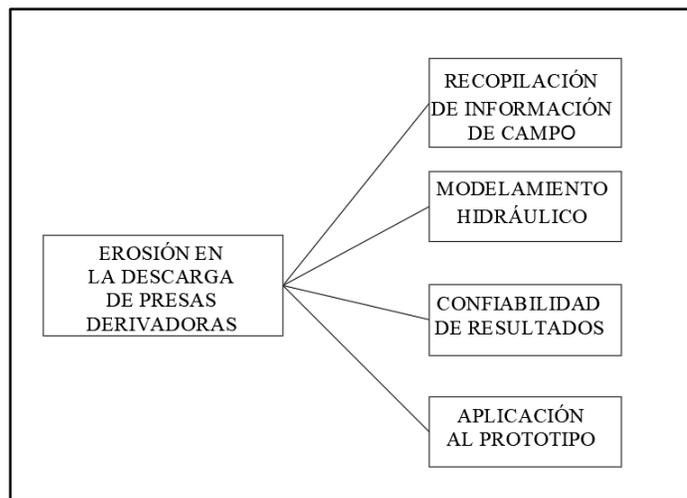


Fig. 3 Etapas del proceso de investigación

En la Fig. 3, se muestra las cuatro etapas de la investigación. La primera etapa se orientó a la recopilación de la información disponible en campo como realizar un levantamiento topográfico del río aguas arriba y aguas abajo de la captación.

La segunda etapa consistió en modelar hidráulicamente dicha estructura para representar en laboratorio los eventos que en la realidad no pueden ser medidos o visualizados. Se planteo el modelamiento físico de laboratorio.

Además, para modelar hidráulicamente se ha conseguido la escala de caudales, escala sedimentológica y la construcción de los gaviones, considerando 4 diámetros de grava distinta [9.5

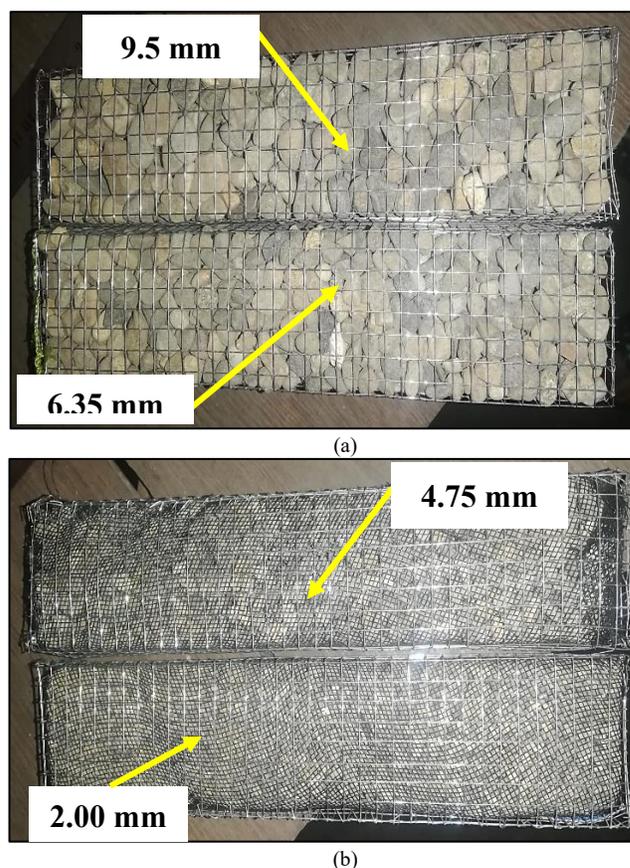


Fig. 4 Diámetros de los gaviones: (a) grava de 9.5 mm y 6.35 mm; (b) grava de 4.75 mm y 2.00 mm

En la calibración del modelo físico para definir la pendiente, se simuló en el canal de pendiente variable con ayuda de un nivel. Una vez verificada la similitud entre modelo 1:60 (en laboratorio) y prototipo (captación Remonta II), es decir, aplicando la similitud geométrica, cinemática y dinámica, se procedió a aplicar 4 gastos escalados al modelo (7.2 l/s, 6.99 l/s, 6.53 l/s, 6.08 l/s, 5.54 l/s) teniendo en consideración el tiempo de retorno 300, 200, 100, 50 y 20 años respectivamente, para generar las diferentes cargas de agua con lo que se generan las distintas profundidades de erosión. El modelamiento físico nos permite estimar la eficiencia de los distintos gaviones con la finalidad de mitigar la erosión y socavación en la estructura.

La tercera etapa se orientó a determinar la confiabilidad y el grado de precisión de las medidas tomadas en laboratorio, lo cual se verificó aplicando la prueba de Test de “Students”, por la naturaleza de la investigación, ya que solamente se tiene una aplicación experimental para cada evento simulado.

La cuarta etapa se aplicó una vez compatibilizados los datos obtenidos en campo con los de laboratorio y analizada su confiabilidad, procediéndose a pasar los resultados de laboratorio (modelo físico reducido) al prototipo (presa derivadora de agua

Remonta II), aplicando las relaciones de escala planteados en la similitud, geométrica, cinemática, dinámica y sedimentológica.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelamiento Hidráulico:

Fundamentado en la teoría de similitud modelo – prototipo, para las condiciones de semejanza geométrica, cinemática, dinámica y sedimentológica.

TABLA I
CORTANTE ADIMENSIONAL DE FROUDE (Fs) PARA PROTOTIPO Y MODELO

Estructura	T (°C)	γ (kg/m ³)	γ_n (m)	D_s (m)	τ (kg/m ²)	S (m/m)	γ_s (kg/m ³)	F_s
Prototipo	18	998,7	2,99	0,1198	666,03	0,026	2439,0	3,8599
Modelo	18	998,7	0,05	0,001996	11,10	0,03	2439,0	3,8602

En la tabla I, se muestran los resultados del cortante adimensional de Froude (Fs), para el modelo y prototipo. Pues se puede visualizar que los cortantes adimensionales de Froude tienen valores de 3.8599 y 3.8602; lo que implica que existe similitud entre modelo y prototipo para las condiciones ensayadas. Donde:

$$F_s = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma) * D_s} \quad (1)$$

Siendo: τ : el esfuerzo cortante, γ_s : el peso específico del sedimento, γ : el peso específico del agua y D_s : Diámetro medio del sedimento.

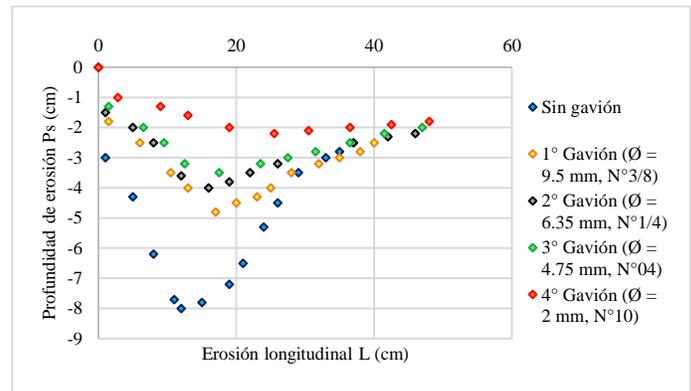
Perfiles de erosión experimentales en modelo físico de laboratorio:

Al cumplirse la similitud geométrica, cinemática y dinámica entre el modelo y prototipo se procedió a desarrollar el trabajo experimental en laboratorio en el canal de pendiente variable para diferentes condiciones, como son la variación de caudales y los métodos de protección (gaviones) con distintos diámetros de grava.

Los ensayos en el modelo físico desarrollados para un método de protección (gavión) con diámetros de grava diferente, generaron perfiles de erosión representados en los resultados de 25 ensayos experimentales, obtenidos del modelo físico de laboratorio mostrados en la Fig. 5, 6, 7, 8 y 9. Estos resultados confirman la relación directa entre el tipo de gavión y las dimensiones (Ps: profundidad y L: longitud) de la poza de erosión, es decir, a mayor diámetro de grava del gavión, mayor es las dimensiones de profundidad y longitud de erosión. Los diámetros de grava son de 9.5, 6.55, 4.75 y 2 mm. Las profundidades máximas de erosión abarcan desde 1.40 cm hasta 4.8 cm, y longitudes máximas de 25 cm hasta 48 cm respectivamente.

La confiabilidad de la información de laboratorio obtenida en el modelo físico fue verificada con la prueba de Test de “Students”, donde se obtiene un coeficiente de correlación

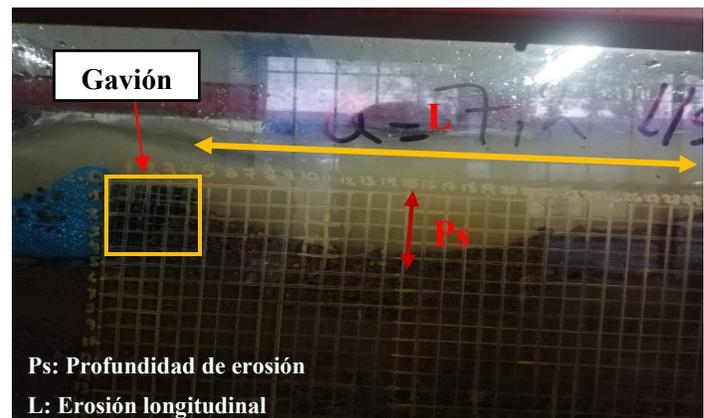
múltiple $R^2=0,9784$, $R^2=0,9078$, $R^2=0,9844$, $R^2=0,8929$ y $R^2=0,981$ que nos indica una confiabilidad alta.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Perfiles longitudinales de erosión: (a) perfil de erosión con el caudal máximo para las condiciones dadas; (b) y (c) profundidad de erosión y longitud de erosión máxima en la estructura de disipación

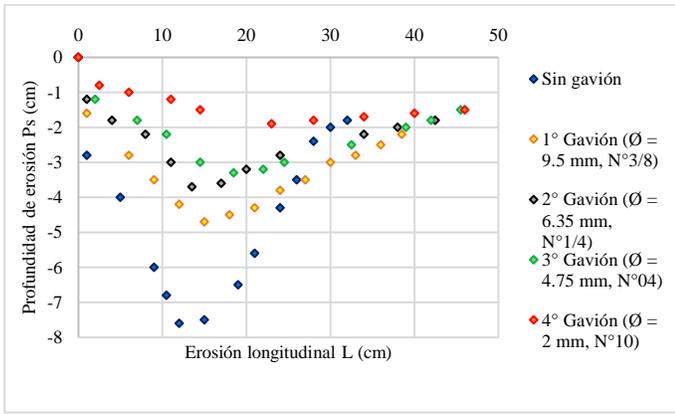


Fig. 6 Perfiles longitudinal de erosión, para un caudal de 6.99 l/s con y sin protección en la descarga de la estructura de disipación

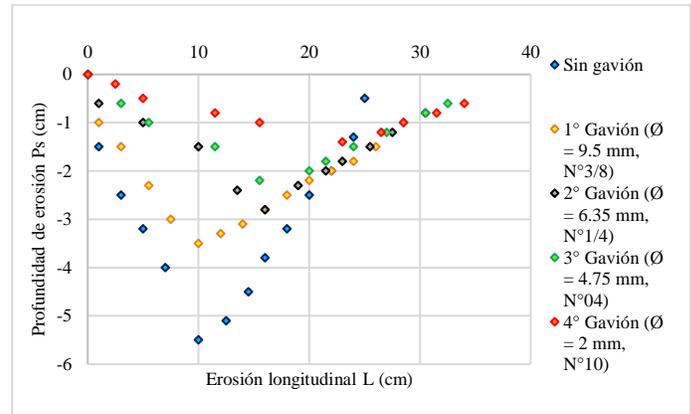


Fig. 9 Perfiles longitudinal de erosión, para un caudal de 5.54 l/s con y sin protección en la descarga de la estructura de disipación

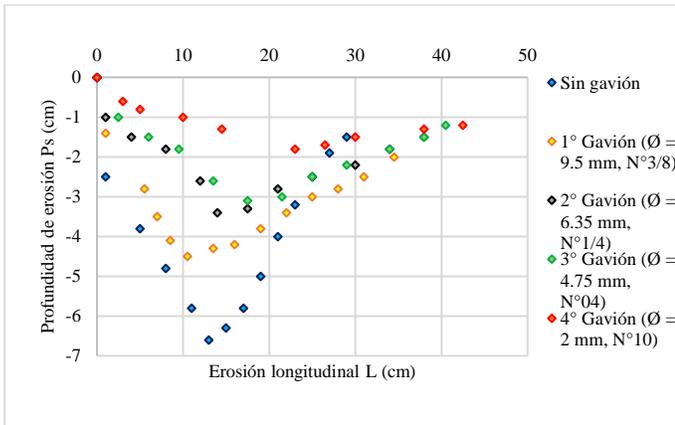


Fig. 7 Perfiles longitudinal de erosión, para un caudal de 6.53 l/s con y sin protección en la descarga de la estructura de disipación

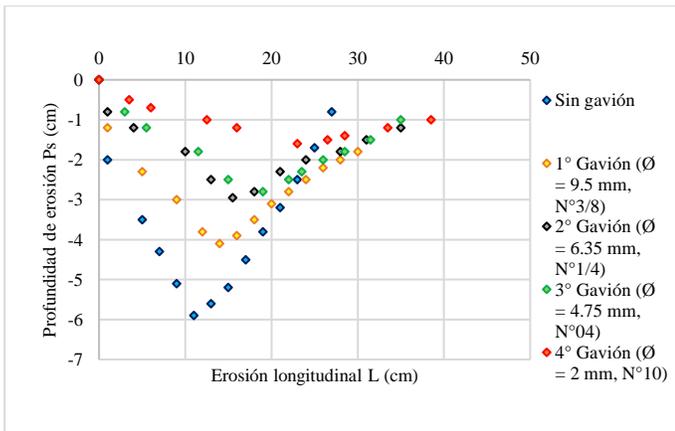


Fig. 8 Perfiles longitudinal de erosión, para un caudal de 6.08 l/s con y sin protección en la descarga de la estructura de disipación

Descenso de las dimensiones de la poza de erosión según los diámetros de grava de gavión

Dado que los resultados del modelo son confiables, se aplica al prototipo con las relaciones de escala correspondiente. Pues los incrementos tanto en la profundidad (P_s) y Longitud (L), ensayos para diferentes diámetros de grava del gavión y caudales en el modelo físico, fueron traspasados al prototipo, y así se analizó su correlación lineal múltiple.

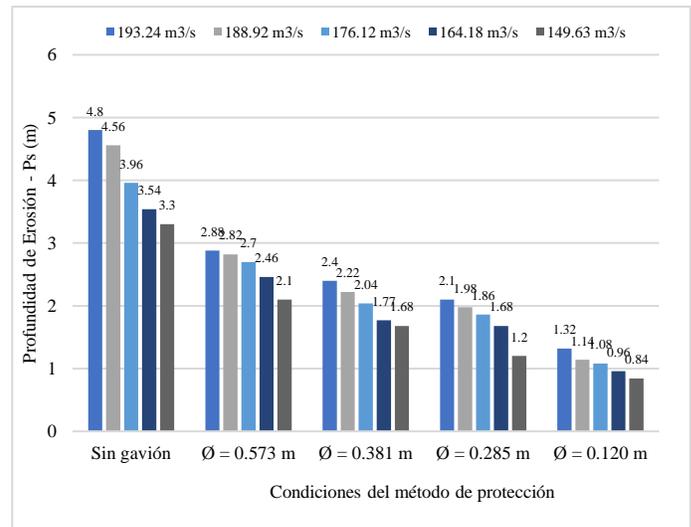


Fig. 10 Variación de la profundidad de erosión para diferentes diámetros de piedra del gavión y caudales máximos.

En la Fig. 10, se visualiza que la profundidad de erosión para condiciones de prueba sin gavión tiene un valor superior a 3.3 m., la cual se reduce utilizando gaviones de menor diámetro, es decir, a menor diámetro de piedra del gavión, la profundidad de erosión disminuye, alcanzando profundidades inferiores a 1.32 m.

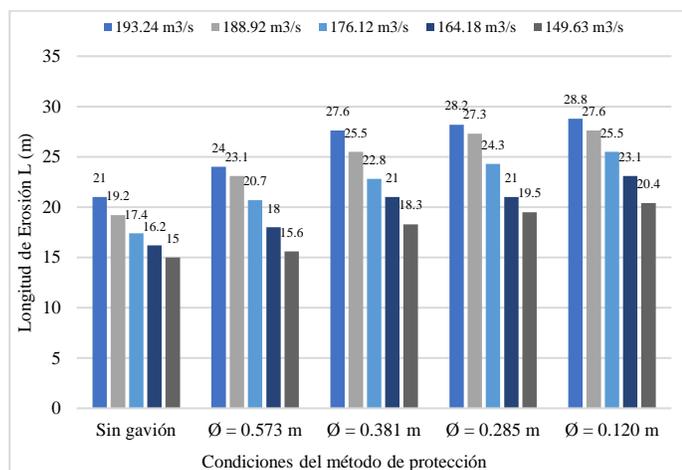


Fig. 11 Variación de la longitud máxima de erosión para diferentes diámetros de piedra del gavión y caudales máximos.

En la Fig. 11, se visualiza el incremento longitudinal en dicha poza de erosión para condiciones de prueba sin gavión tiene un valor inferior a 21 m., la cual es inversamente proporcional a la profundidad de erosión de la poza, es decir, a menor diámetro de piedra del gavión, la longitud máxima de erosión aumenta, alcanzando profundidades superiores a 20.4 m.

Los resultados del modelamiento hidráulico a partir de la figura 10 nos permite visualizar una relación directa entre el diámetro de la piedra del gavión, caudales y las profundidades en la poza de erosión, Korpak [7] en su investigación menciona El mayor impacto sobre la erosión en el lecho del río Mszanka es generado por dos cantidades: pendiente promedio (correlacionada positivamente con la tasa promedio de erosión) y longitud de alcance (correlacionada positivamente con la erosión máxima). En todas las partes estudiadas también existe una relación entre la geometría de la sección transversal del río y la erosión: cuanto más fuerte es la erosión, menor es el valor del parámetro W/d. Por otro lado, no se identificó una relación estadísticamente significativa entre la magnitud de la erosión y la altura del GCS, como en el caso del río Mohelnice en los Cárpatos checos. También [20] dice el cajón con faldón puede reducir efectivamente la profundidad de socavación y la escala del agujero de socavación. En segundo lugar, aunque la profundidad de la socavación disminuye con el aumento del ancho de la falda en algún rango específico, el aumento del ancho de la falda aumenta el volumen de bloqueo de agua, lo que puede agravar la socavación local, por el contrario. En la figura 11 nos permite visualizar una relación inversa entre el diámetro de la piedra del gavión, caudales y el incremento de la longitud en la poza de erosión, así, [21] propone una nueva contramedida de socavación llamada GCRP, que se compone de piedras de armadura sueltas y muchos grandes grupos de piedras cementadas.

Aplicación al prototipo:

La comparación del descenso de las dimensiones como profundidad (Ps) e incremento de la longitud (L) en la poza de

erosión por efecto de los gaviones que se pueden generar en la estructura de captación Remonta II, constituye el insumo final para concluir la investigación. En la tabla II se presentan los datos reales máximos aplicados a la captación Remonta II.

TABLA II
DESCENSO E INCREMENTO DE LA PROFUNDIDAD Y LONGITUD DE EROSIÓN – CAPTACIÓN REMONTA II

N° ensayos	1°	2°	3°	4°	5°	
Caudales (m³/s)	193.94	188.92	176.12	164.18	149.63	
Sin gavión	Ps (m)	4,80	4,56	3,96	3,54	3,30
	L (m)	21,00	19,20	17,40	16,20	15,00
1° Gavión (Ø = 0.573 m)	Ps (m)	2,88	2,82	2,70	2,46	2,10
	L (m)	24,00	23,10	20,70	18,00	15,60
2° Gavión (Ø = 0.381 m)	Ps (m)	2,40	2,22	2,04	1,77	1,68
	L (m)	27,60	25,50	22,80	21,00	18,30
3° Gavión (Ø = 0.285 m)	Ps (m)	2,10	1,98	1,86	1,68	1,20
	L (m)	28,20	27,30	24,30	21,00	19,50
4° Gavión (Ø = 0.120 m)	Ps (m)	1,32	1,14	1,08	0,96	0,84
	L (m)	28,80	27,60	25,50	23,10	20,40

IV. CONCLUSIONES

El modelamiento hidráulico desarrollado como metodología principal para analizar la erosión en la zona de descarga de una estructura de captación, fundamenta que el incremento de la profundidad de erosión se debe al usarse métodos de protección de mayor diámetro de grava; mientras que la longitud en la poza de erosión aumenta cuando el gavión tiene un diámetro de piedra menor.

Por otro lado, se realizó una comparación de los diámetros usados en cada método de protección en base a caudales máximos y teniendo en cuenta la profundidad de erosión; obteniéndose el máximo sin usar gavión, un valor de 4.8 m y un mínimo de 3.3 m. Así mismo, considerando el gavión de menor diámetro (0.120 m) se obtienen valores de 1.32 y 0.84 m. En resumen, los diámetros de grava más efectivos para reducir la profundidad de erosión son de 0.285 m y 0.120 m.

En estructuras de captación en ríos de alta montaña, es necesario implementar gaviones, como medida de mitigación ante el fenómeno de erosión aguas abajo de la estructura. Sin embargo, no es recomendable usar esta metodología en ríos de baja pendiente o ríos de arena. Los gaviones principalmente cumplen la función de reducir la erosión, pero básicamente también es para proteger la estructura ante el fenómeno de socavación.

REFERENCIAS

- [1] Alvarado-Ancieta CA. Protección de la erosión en curvas abruptas usando enrocado rip-rap. Tecnología y ciencias del agua [Internet]. 2013 [cited 2023 Jan 28];4(1):51–82. Available from: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es

- [2] Pagliara S, Palermo M. Scour process caused by multiple subvertical non-crossing jets. *Water Science and Engineering*. 2017 Jan 1;10(1):17–24.
- [3] Lo WC, Su H, Shih DS. Integrating multiple downscaling simulations with continuous In-situ monitoring to assess riverbed scouring. *J Hydrol (Amst)*. 2022 Jul 1;610.
- [4] Larrarte F, Chevalier C, Battist L, Chollet H. Hydraulics and bridges: A French case study of monitoring of a bridge affected by scour. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2020 Aug 1;74.
- [5] Maciej Serda, Becker FG, Cleary M, Team RM, Holtermann H, The D, et al. Synteza i aktywność biologiczna nowych analogów tiosemikarbazonowych chelatorów żelaza. G. Balint, Antala B, Carty C, Mabieme JMA, Amar IB, Kaplanova A, editors. *Uniwersytet śląski [Internet]*. 2013 [cited 2023 Jan 28];7(1):343–54. Available from: <https://desytamara.blogspot.com/2017/11/sistem-pelayanan-perpustakaan-dan-jenis.html>
- [6] Yang Y, Xiong X, Melville BW, Sturm TW. Dynamic morphology in a bridge-contracted compound channel during extreme floods: Effects of abutments, bed-forms and scour countermeasures. *J Hydrol (Amst)*. 2021 Mar 1;594.
- [7] Korpak J, Lenar-Matyas A, Radecki-Pawlik A, Plesiński K. Erosion irregularities resulting from series of grade control structures: The Mszanka River, Western Carpathians. *Science of the Total Environment*. 2021 Dec 10;799.
- [8] Garcia R, Victor I, Chinezca PE. IAHR AIJH XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA LIMA, PERÚ, 28 AL 30 DE SETIEMBRE DE 2016. *IAHR*. 2016;l(1):1–8.
- [9] Alomari NK, Yusuf B, Mohammad TA, Ghazali AH. Experimental investigation of scour at a channel junctions of different diversion angles and bed width ratios. *Catena (Amst)*. 2018 Jul 1;166:10–20.
- [10] Kosič M, Prendergast LJ, Anžlin A. Analysis of the response of a roadway bridge under extreme flooding-related events: Scour and debris-loading. *Eng Struct*. 2023 Mar 15;279.
- [11] Prendergast LJ, Hester D, Gavin K. Research Article. 2016 [cited 2023 Feb 19]; Available from: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7871089>
- [12] Malekjafarian A, Kim CW, OBrien EJ, Prendergast LJ, Fitzgerald PC, Nakajima S. Experimental Demonstration of a Mode Shape-Based Scour-Monitoring Method for Multispan Bridges with Shallow Foundations. *Journal of Bridge Engineering [Internet]*. 2020 Aug 1 [cited 2023 Feb 19];25(8):04020050. Available from: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0001586>
- [13] Xiong W, Kong B, Tang P, Ye J. Vibration-Based Identification for the Presence of Scouring of Cable-Stayed Bridges. *J Aerosp Eng [Internet]*. 2018 Jan 11 [cited 2023 Feb 19];31(2):04018007. Available from: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29AS.1943-5525.0000826>
- [14] Elsaid A, Seracino R. Rapid assessment of foundation scour using the dynamic features of bridge superstructure. *Constr Build Mater*. 2014;50:42–9.
- [15] Yang DY, Frangopol DM. Physics-Based Assessment of Climate Change Impact on Long-Term Regional Bridge Scour Risk Using Hydrologic Modeling: Application to Lehigh River Watershed. *Journal of Bridge Engineering [Internet]*. 2019 Aug 22 [cited 2023 Feb 19];24(11):04019099. Available from: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0001462>
- [16] Panici D, Kripakaran P, Djordjević S, Dentith K. A practical method to assess risks from large wood debris accumulations at bridge piers. *Science of The Total Environment*. 2020 Aug 1;728:138575.
- [17] Roca M, Kitchen A, Kirby A, Escarameia M. Briefing: Scour guidance supporting bridge resilience. <https://doi.org/10.1680/jbren2100053> [Internet]. 2021 Nov 3 [cited 2023 Feb 19]; Available from: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/jbren.21.00053>
- [18] Vardanega PJ, Gavriel G, Pregnolato M. Assessing the suitability of bridge-scour-monitoring devices. <https://doi.org/10.1680/jfoen2000022> [Internet]. 2021 Apr 14 [cited 2023 Feb 19];174(4):105–17. Available from: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/jfoen.20.00022>
- [19] Sasidharan M, Kumar Parlikad A, Schooling J, Hadjidemetriou GM, Hamer M, Kirwan A, et al. A bridge scour risk management approach to deal with uncertain climate future. *Transp Res D Transp Environ*. 2023 Jan 1;114:103567.
- [20] Wei K, Qiu F, Qin S. Experimental and numerical investigation into effect of skirted caisson on local scour around the large-scale bridge foundation. *Ocean Engineering*. 2022 Apr 15;250:111052.
- [21] Wang W, Yan J, Chen S, Liu J, Jin F, Wang B. Gridded cemented riprap for scour protection around monopile in the marine environment. *Ocean Engineering*. 2023 Mar 15;272:113876.