

# Hydraulic modeling in the estimation of the increase in erosion in high Andean rivers with contraction of the river bed due to the presence of derived dams

Luis Vásquez, Dr.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Privada del Norte (UPN)-Cajamarca, Perú, [luis.vasquez@upn.pe](mailto:luis.vasquez@upn.pe)

*Summary- The downstream undermining of diversion dams is a natural process, which the engineer predicts in the design; which allows to size the protection elements for the correct functioning during its useful life, but there are many structures that fail due to the effect of unexpected undermining, which is why this work focuses on estimating the increase in the dimensions (depth, length and time) in the erosion pool downstream of derived dams, built on gravelly sandy beds, which by their location in the river contract their natural channel, generating a high increase in kinetic energy in the discharge of the dissipating structure, which acts directly on the zone of changes in rigidity between the material of the energy dissipator and the river bed, whose consequence in the structure, is the undermining and its imminent failure. The research is based on physical and numerical modeling, based on the principles of hydraulic similarity (model-prototype). The results for the Huayrapongo dam, infer that the increases in the dimensions depth, length and time of erosion are related to the contraction of the channel ( $\Delta\%$ ) by polynomial functions of fourth, second and third order, respectively.*

**Keywords:** *Erosion, scour, model, prototype.*

**Digital Object Identifier:** <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.168>  
**ISBN:** 978-958-52071-8-9 **ISSN:** 2414-6390  
**DO NOT REMOVE**

# Modelamiento hidráulico en la estimación del incremento de la erosión en ríos altoandinos con contracción del cauce por presencia de presas derivadoras

Luis Vásquez, Dr.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Privada del Norte (UPN)-Cajamarca, Perú, [luis.vasquez@upn.pe](mailto:luis.vasquez@upn.pe)

**Resumen-** *La socavación aguas abajo de presas derivadoras es un proceso natural, que el ingeniero predice en el diseño; lo que permite dimensionar los elementos de protección para el correcto funcionamiento durante su vida útil, pero existen muchas estructuras que fallan por efecto de socavación no esperada., razón por la cual el presente trabajo se centra en estimar el incremento de las dimensiones (profundidad, longitud y tiempo) en la poza de erosión aguas abajo de presas derivadoras, construidas sobre lechos areno gravosos, que por su emplazamiento en el río contraen su cauce natural, generando un elevado incremento de la energía cinética en la descarga de la estructura disipadora, que actúa en forma directa sobre la zona de cambios de rigidez entre el material del disipador de energía y el lecho del río, cuya consecuencia en la estructura, es la socavación y su inminente falla. La investigación se fundamenta en el modelamiento físico y numérico, sustentándola en los principios de similitud hidráulica (modelo – prototipo). Los resultados para la presa derivadora Huayrapongo, infieren que los incrementos en las dimensiones profundidad, longitud y tiempo de erosión están relacionados con la contracción del cauce ( $\Delta\%$ ) mediante funciones polinomiales de cuarto, segundo y tercer orden respectivamente.*

**Palabras claves:** *Erosión, socavación, modelo, prototipo.*

## I. INTRODUCCIÓN

Es lógico esperar que proceso de erosión del lecho de un río bajo la acción de chorros libres generados por la presencia de elementos extraños en un curso natural de un río es muy complejo, pues [4], refiere que la erosión resultante depende de la interacción de factores hidráulicos y factores hidrológico morfológicos; en tal sentido [5], concluye que la velocidad mínima de transporte para partículas de tamaño de arena o mayor parece ser aproximadamente 30 por ciento menor que la velocidad necesaria para eliminar las partículas de la parte inferior; pero para partículas progresivamente más pequeños, la velocidad mínima de transporte se vuelve cada vez menos en proporción a la velocidad requerida para hacer que las partículas entren en suspensión, lo que genera fenómenos complejos de concepción en el diseño del Ingeniero.

Maza y Springall [6], afirman que para encontrar la respuesta aproximada a los problemas de erosión en ríos, se requiere en la mayoría de los casos de la ayuda de un modelo hidráulico de fondo móvil; igualmente [7] indica que los fenómenos hidráulicos como expresión del mundo natural son tan complejos que no es posible analizarlos y describirlos totalmente, por lo que sólo podemos hacerlo parcialmente, y menciona que uno de los instrumentos más poderosos de que se

dispone para tratar de conocer y comprender el comportamiento del agua en la naturaleza y su interacción con las estructuras se encuentra en la investigación mediante los modelos matemáticos y los modelos físicos ya que ambos se complementan. También se han desarrollado estudios que proponen medidas eficaces para reducir y controlar la evolución de la erosión. Es así como en [13], propusieron una metodología para reducir la profundidad de socavación que implica el uso de pantallas de protección horizontales ubicadas en el cuenco amortiguador. En [14], investigaron el uso de bloques verticales que se caracterizan por diferentes permeabilidades con el fin de controlar tanto la profundidad máxima de erosión y la longitud del foso de erosión, llegando a la conclusión de que, si se las coloca oportunamente, las paredes verticales pueden reducir significativamente la profundidad máxima erosión (hasta 40%).

Pagliara [14], propuso relaciones empíricas útiles con el fin de predecir las principales características geométricas del foso de erosión en sus estudios en tres dimensiones (3D) identificando la morfología y el equilibrio tridimensional. También estableció un criterio para clasificar y distinguir la erosión en dos dimensiones (2D) desde un modelamiento en (3D). Como se mencionó anteriormente, se encontró que las características geométricas de la erosión y posterior socavación en la estructura dependen principalmente de la descarga del chorro, el nivel de agua en el cuerpo aguas abajo, el ángulo de inclinación de chorro, y la condición de inmersión del chorro. Estos resultados han sido confirmados por [15], que llevó a cabo una investigación teórica y, mediante la aplicación de la ecuación de momento, deriva una relación predictiva general válida para un modelo (2D) de socavación morfológica.

[16], presenta ecuaciones empíricas que permiten determinar los niveles de socavación aguas abajo de estrechamiento del cauce en ríos, generados por la construcción de puentes y las contracciones de cauces generadas por condiciones naturales, mientras que, para estrechamientos por efectos de la construcción de estructuras hidráulicas, muy poco se ha investigado por lo que el marco teórico para el diseño de dichas estructuras es muy limitado. Es por ello que nuestros resultados deben convertirse en antecedentes, y punto de partida para ampliar el marco teórico y la concepción de diseño de presas derivadoras que por razones justificadas técnicamente tienen que ser construidas en lechos de ríos generando contracción del cauce natural, para conseguir un dimensionamiento de los elementos de protección de la estructura con mayor precisión y reducir su riesgo de falla por socavación. Se ha tomado como caso particular de estudio la

presa derivadora Huayrapongo, emplazada en el río Cajamarquino, perteneciente a la cuenca alta de uno de los afluentes del río Amazonas.

La experimentación en Hidráulica es una herramienta muy potente y es fundamental para explicar y predecir fenómenos singulares como el que se presenta en este caso, donde la energía cinética del agua genera cambios sustanciales en ríos con lechos granulares. Investigadores como Borman [8], verificaron experimentalmente resultados teóricos de la socavación local aguas abajo de las estructuras de control de pendiente basada en la difusión por chorro bidimensional y la estabilidad de las partículas; también [11] y [12], trabajaron experimentalmente con modelos físicos análogos simulando la descarga con chorros de agua, para relacionar la profundidad y longitud de la poza de erosión luego de la estructura; además Azamathulla [9] y Guben [10], utilizan los datos experimentales para el entrenamiento y la validación de modelos basados en redes neuronales, determinando funciones de transferencia y pesos óptimos, para utilizarlos luego en la predicción de la erosión. Por lo que para el desarrollo de la investigación se consideró aplicar el modelamiento hidráulico. [17] indica que este tipo de modelamiento se emplea para estudiar los problemas relacionados con la estabilización de cauces de ríos o canales y playas. Por este motivo, es importante reproducir las variables del flujo combinadas con las del sedimento y la mecánica de transporte. Para el caso del presente estudio donde la estructura de derivación está emplazada sobre un lecho de río móvil, [7], nos indica que el modelo de lecho móvil debe reproducir correctamente la configuración general del fondo y las cantidades de material sólido arrastrado por la corriente fluvial, dado que el gasto sólido depende de una elevada potencia de la velocidad se debe establecer una escala de gastos sólidos que sea independiente de la velocidad en el modelo y que tenga por lo tanto un valor constante.

Dada la falla recurrente de estructuras de derivación por efecto de la erosión local estimada con bajos niveles de certeza debido a la existencia de vacíos de conocimiento en lo referente al incremento de la erosión local y la socavación que se genera en la estructura, se plantea como objetivo en la presente investigación evaluar y cuantificar a partir de un modelamiento hidráulico el incremento de la erosión en ríos altoandinos con contracción del cauce por presencia de presas derivadoras, para ello se ha planteado el modelamiento físico y numérico, orientado a determinar el incremento de dicha erosión en la descarga de éstas estructuras que han modificado el cauce natural del río contrayéndolo. Con la presente investigación experimental se pretende fundamentar y reducir la incertidumbre en el diseño de estructuras de derivación emplazadas en ríos de lechos con predominancia de arenas y gravas, mejorando la precisión que nos puede aportar la tridimensionalidad conseguida con la experimentación en campo y laboratorio.

## II. MATERIALES Y MÉTODO

La presa de derivación seleccionada para la presente investigación fue “Huayrapongo” considerada como prototipo en la investigación, la cuál es utilizada al igual que muchas similares para proveer de agua a los sistemas de riego agrícola de la región, se encuentra emplazada en el lecho areno gravoso del río Cajamarquino, 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 dos modelos a escala reducida, uno de concreto simple con una escala de 1:20, para ser utilizado en campo y otro de granito a escala 1:40 para ser utilizado en laboratorio, sistemas de recirculación de agua, canal de pendiente variable de sección rectangular, correntómetro digital y vertederos de pared delgada.

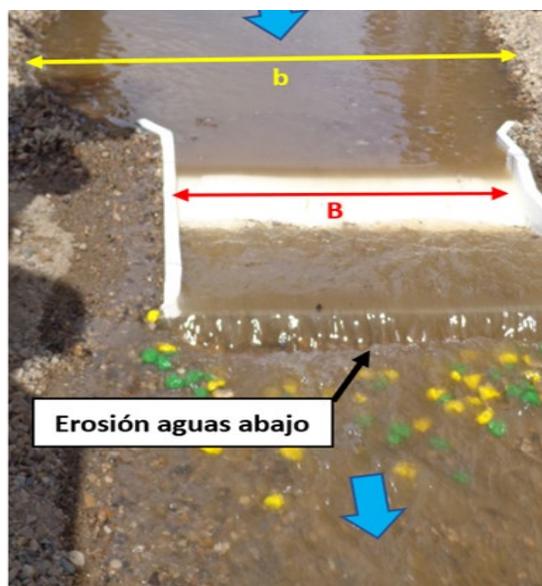


Fig. 1 Modelo físico presa derivadora, escala 1:20.

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

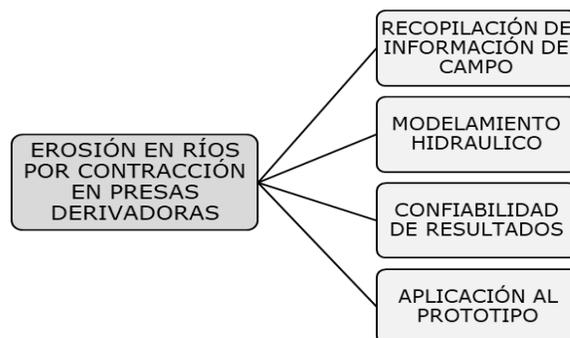


Fig. 2 Etapas del proceso de investigación.

La primera etapa de la investigación, indicada en la Fig. 2, se orientó a la recopilación de la información disponible tanto en campo como en archivos sobre la concepción, diseño, construcción y falla de la estructura de derivación.

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 planteó el modelamiento físico de campo y laboratorio y el modelamiento matemático en gabinete, los cuales se complementan.

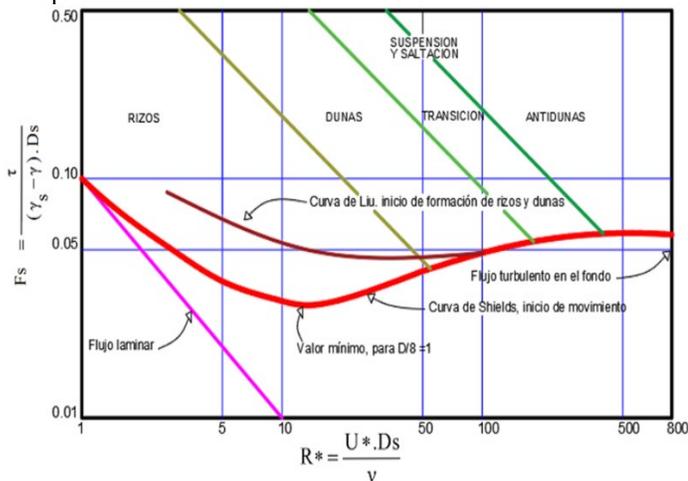


Fig. 3 Diagrama de Shields [18], adaptado en [6].

Además, según la experimentación se ha demostrado que el número de Reynolds pierde su influencia si sus valores son muy grandes. En este caso, esto ocurre para un valor  $R^* \approx 70$  [18], Por lo que se obviaría la similitud de Reynolds; ya que se estará experimentando con modelos Eulerianos a gran número de Reynolds.

En la calibración del modelo físico para definir la pendiente, se simuló con dos grados de libertad (tirante normal aguas abajo y el lecho con muros fijos); para la calibración del tercer grado de libertad (material de lecho) se utilizó un modelo en campo a escala de 1:20. Una vez verificada la similitud entre modelo 1:40 (en laboratorio) y prototipo (captación Huayrapongo) se procedió a aplicar diferentes gastos aleatoriamente para generar las diferentes cargas de agua con lo que se generan los anchos diferentes para un mismo caudal de prueba. El modelamiento matemático, nos permitió reproducir el escenario generado por el escurrimiento en el cauce en condiciones naturales durante el evento máximo registrado en la primera etapa. Debido al tipo de flujo tridimensional el modelamiento matemático se lo desarrolló con el software de modelamiento hidráulico Open Foam, el resultado de la simulación se presenta en la Fig. 4.

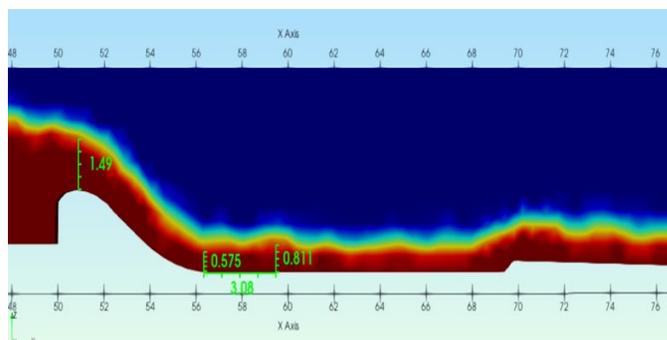


Fig. 4 Modelamiento matemático

La tercera etapa se orientó a determinar la confiabilidad y el grado de precisión o exactitud de las medidas tomadas en laboratorio, lo cual se verificó aplicando el método de las mitades partidas (Split-halves), 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 Huayrapongo), aplicando las relaciones de escala planteadas en la similitud, geométrica, cinemática, dinámica y sedimentológica.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Imágenes satelitales, permitieron determinar las características geomorfológicas, emplazamiento y entorno de la estructura de captación Huayrapongo.



Fig. 5 Emplazamiento de presa derivadora

Como es posible visualizar en la Fig. 5, el emplazamiento de la estructura de ancho (B) está generando una contracción  $\Delta(\%)$  del ancho natural del cauce del río (b), lo que genera un cambio en las condiciones de flujo del agua en el entorno de la estructura.

$$\Delta(\%) = \left(1 - \frac{B}{b}\right) * 100 \quad (1)$$

**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

Estruct.	T (°C)	Y (gr/m³)	Yn (m)	DS (m)	τ (kg/m²)	S (m/m)	YS (kg/cm³)	Fs*
Prototipo	18	998,7	1,99	0,013	31,799	0,02	2650	1,4813
Modelo	18	998,7	0,05	6E-04	1,468	0,03	2650	1,4818

TABLA II  
NÚMERO DE REYNOLDS DE LA PARTÍCULA DEL SEDIMENTO (R\*) PARA PROTOTIPO Y MODELO

Estruct.	T (°C)	v (cm²/s)	Yn (m)	DS (m)	S (m/m)	U* (m/s)	R*
Prototipo	18	0,01007	1,99	0,013	0,016	0,56	7214,98
Modelo	18	0,01007	0,05	6E-04	0,03	0,12	71,55

En las tablas I y II, se muestran los resultados del cortante adimensional de Froude y el número de Reynolds del sedimento, para el modelo y prototipo. Pues se puede visualizar que los cortantes adimensionales de Froude tienen valores de 1.4813 y 1.4818 y los números de Reynolds tienen valores superiores a 70, valores que al representarlos en el diagrama de Shield generan el mismo tipo de fondo (antidunas); lo que implica que existe similitud entre modelo y prototipo para las condiciones ensayadas. Donde:

$$F_S^* = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma) D_S} \tag{2}$$

$$R^* = \frac{U^* \cdot D_S}{\nu} \tag{3}$$

Siendo: τ: el esfuerzo cortante, γs: el peso específico del sedimento, γ: el peso específico del agua, DS: Diámetro medio del sedimento, U\*: velocidad crítica de corte y ν: viscosidad cinemática del agua.

**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 de contracción del cauce tomados en forma aleatoria.

Los ensayos en el modelo físico desarrollados para diferentes porcentajes de contracción del cauce natural “Δ%” de la estructura de captación, generaron perfiles de erosión representados en los resultados de 20 ensayos experimentales obtenidos del modelo físico de laboratorio, presentados en la

Fig. 6. Estos resultados confirman la relación directa entre contracción del cauce (Δ%) y las dimensiones (Ps: profundidad y L: longitud) de la poza de erosión, pues para condiciones de contracción de cauce de 0% a 90%, se generaron profundidades máximas desde 1.84 cm hasta 12.33 cm, y longitudes máximas de 12 cm hasta 70 cm. respectivamente.

La confiabilidad de la información de laboratorio obtenida en el modelo físico fue verificada con el método de Split-halves, donde el coeficiente de Spearman Brow es: rti=0,94, que nos indica una confiabilidad alta.

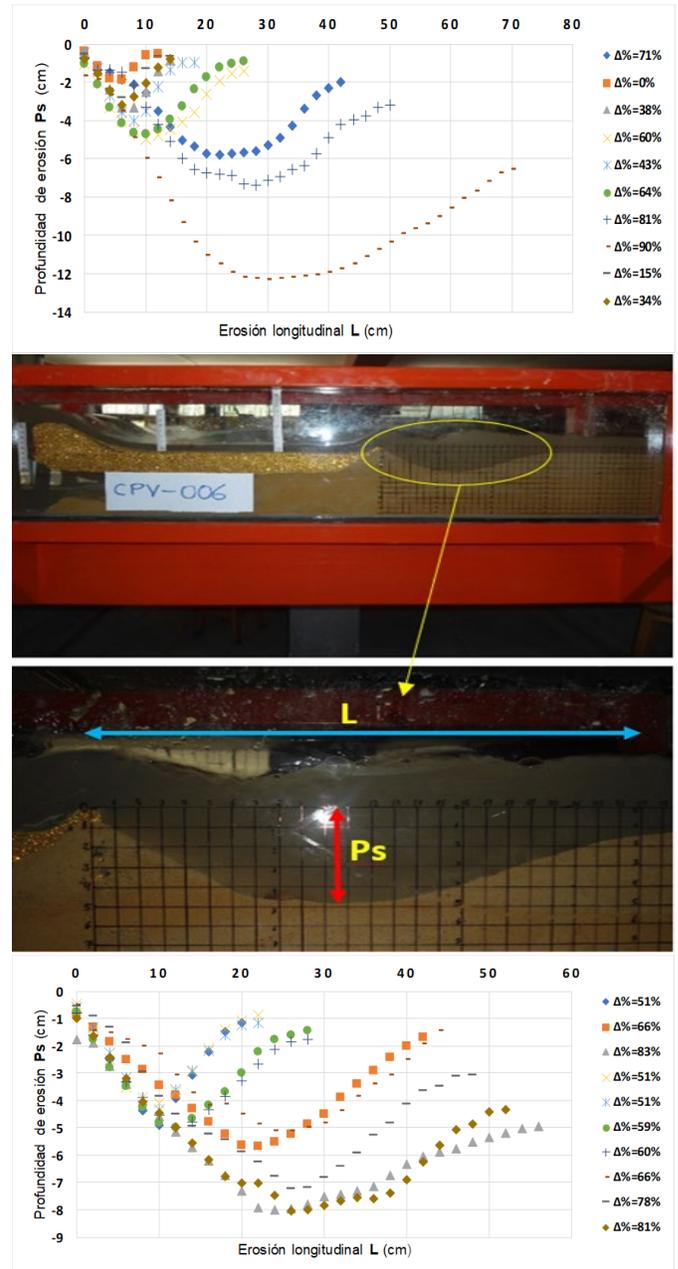


Fig. 6 Perfiles longitudinales de erosión en la descarga de estructura de disipación

**Incremento de dimensiones de poza de erosión según contracción de cauce a escala real:**

Dado a que los resultados del modelo son confiables, se procedió a aplicar los resultados al prototipo con las relaciones de escala correspondientes. Pues los incrementos tanto en la profundidad (Ps), Longitud (L) y el tiempo que demora en alcanzar la máxima erosión (T), ensayos para diferentes porcentajes de contracción del cauce en el modelo físico, fueron trasladados al prototipo, y así se analizó su correlación respectiva.

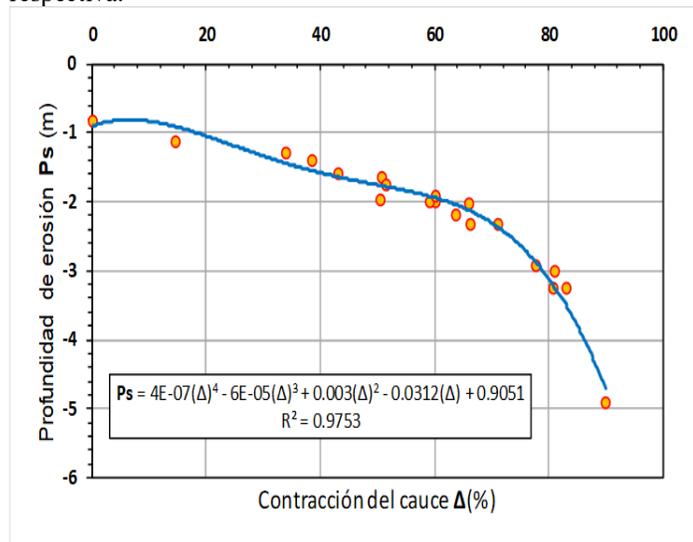


Fig. 7 Variación de la profundidad de erosión para diferentes porcentajes de contracción del cauce.

En la Fig. 7, se visualiza que la profundidad de erosión para condiciones de prueba sin contracción de cauce tiene un valor inferior a 1 m., la cual se incrementa siguiendo una tendencia polinomial hasta alcanzar profundidades cercanas a 5 m. para la contracción de cauce máxima ensayada del 90%.

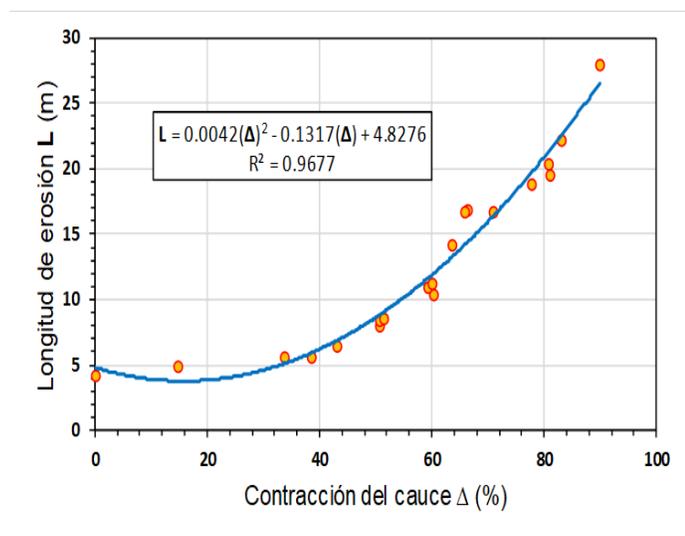


Fig. 8 Variación de la longitud máxima de socavación para diferentes porcentajes de contracción del cauce.

El ángulo de reposo del sedimento no cohesivo compuesto por arenas y gravas está directamente relacionado con la profundidad de la poza de erosión aguas abajo de la estructura, pues al incrementarse la profundidad se genera un incremento longitudinal en dicha poza de erosión, para el caso del presente trabajo experimental el mejor ajuste se da a una función polinomial de tercer orden, como muestra la Fig. 8.

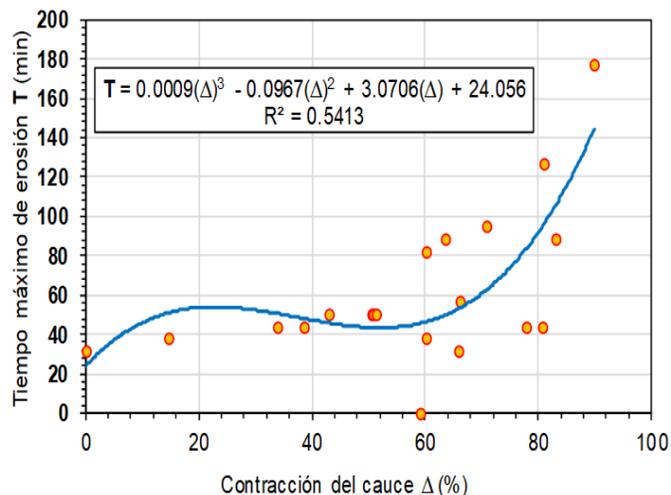


Fig. 9 Variación del tiempo de socavación para diferentes porcentajes de contracción del cauce.

El tiempo que demora en estabilizar el lecho está relacionado con la contracción del cauce, a mayor contracción de cauce mayor será el tiempo en estabilizar el lecho ya que mayor será el volumen de material a transportar, así como mayor será el esfuerzo necesario al estar a mayor profundidad. La Fig. 9, muestra una dispersión de los resultados experimentales con un ajuste polinomial de tercer orden.

Los resultados del modelamiento hidráulico a partir de las Figuras 7, 8 y 9 nos permite visualizar una relación directa entre la contracción del cauce y las variables profundidad, longitud y tiempo de socavación en la descarga de éste tipo de estructuras, es evidente que el fenómeno estudiado es muy complejo dado a que se generan ángulos de ataque muy variables de los chorros generados cuando entran en contacto con el lecho del río, Amin [11] en su programa experimental cuantificó el impacto de las medidas estructurales hidráulicas (chorros de agua de doble línea) en la minimización de las dimensiones de socavación aguas abajo de un vertedero de socavación para agua clara para un pozo de socavación de cuasi – equilibrio, mientras que Borman [8] encontró que la difusión por chorro turbulento reduce la velocidad del fluido cerca de las partículas del lecho y se obtiene una socavación de equilibrio por lo que las partículas no cohesivas del lecho no pueden eliminarse del orificio de socavación. [12] experimentó en laboratorio la variación de la profundidad máxima de socavación haciendo

variar la relación profundidad de la socavación y el diámetro equivalente de los chorros “ $\delta$ ” entre valores  $-20 < \delta < -10$ , encontrando que la profundidad de erosión es menor para condiciones hidráulicas sin contracción de cauce, con su modelo análogo de chorros múltiples que no se cruzan, en comparación al modelo análogo con chorros cruzados múltiples así como los chorros únicos que representarían el efecto de una contracción del cauce. Por otro lado, Ghodsian [21], investigó la profundidad de socavación local debido a chorros de caída libre en sedimentos no uniformes y encontró que la longitud y el ancho del orificio de socavación disminuyen hasta un 30% a medida que la desviación estándar geométrica de los sedimentos varía de 1.3 a 2.7. Por lo que al igual que [14] y [16] los resultados de la presente investigación pueden ser representadas por ecuaciones polinomiales muy consistentes con ajustes muy altos, lo que implica que podemos utilizar funciones empíricas deducidas a partir del modelamiento experimental para estimar el incremento de erosión en estructuras de derivación en ríos altoandinos con lechos arenos gravosos.

### Aplicación al prototipo:

La visualización y comparación de los incrementos de las dimensiones como profundidad, Longitud y tiempo en la poza de erosión por efecto de la contracción del cauce que se pueden generar en la presa derivadora Huayrapongo, constituye el insumo final para concluir la investigación. Pues para un ancho natural del cauce medido en campo de 54 m, en las TABLAS III, IV y V se presentan porcentajes de incremento de la profundidad, longitud y tiempo en que se alcanza la máxima socavación utilizando las ecuaciones encontradas a partir del modelamiento hidráulico en esta investigación para contracciones de cauce estándar generados con anchos de estructura comunes en el proceso constructivo, donde está incluido el ancho actual de la estructura de derivación que es de 30 m, para el cual se registró una profundidad máxima de erosión medida en campo de -3.32 m.

TABLA III  
INCREMENTO DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN – PRESA DERIVADORA HUAYRAPONGO

Ancho de la Estructura (B)	Contracción del cauce ( $\Delta\%$ )	Profundidad máxima de socavación (Ps)	Incremento de la Prof. de Socavación	
			(m)	(%)
54 m	0,0 %	-2,13 m	0,00	0,0
50 m	7,4 %	-2,25 m	0,12	5,5
45 m	16,7 %	-2,42 m	0,29	13,6
40 m	25,9 %	-2,63 m	0,50	23,4
35 m	35,2 %	-2,89 m	0,76	35,5
30 m	44,4 %	-3,22 m	1,09	50,9
25 m	53,7 %	-3,66 m	1,52	71,4

TABLA IV  
INCREMENTO DE LA LONGITUD MÁXIMA DE SOCAVACIÓN – PRESA DERIVADORA HUAYRAPONGO

Ancho de la Estructura (B)	Contracción del cauce ( $\Delta\%$ )	Longitud máxima de poza de erosión. (L)	Incremento de la Longitud máx. de Socavación	
			(m)	(%)
54 m	0,0 %	14,0 m	0,0	0,0
50 m	7,4 %	15,1 m	1,1	7,7
45 m	16,7 %	16,5 m	2,5	17,9
40 m	25,9 %	18,0 m	4,0	28,7
35 m	35,2 %	19,6 m	5,6	40,1
30 m	44,4 %	21,3 m	7,3	52,1
25 m	53,7 %	23,1 m	9,1	64,8

TABLA V  
INCREMENTO DE LA LONGITUD MÁXIMA DE SOCAVACIÓN – PRESA DERIVADORA HUAYRAPONGO

Ancho de la Estructura (B)	Contracción del cauce ( $\Delta\%$ )	Tiempo de socavación T (seg)	Incremento del Tiempo de Socavación	
			(seg)	(%)
54 m	0,0 %	4 242	0,0	0,0
50 m	7,4 %	4 380	138	3,2
45 m	16,7 %	4 578	330	7,8
40 m	25,9 %	4 800	558	13,2
35 m	35,2 %	5 076	828	19,6
30 m	44,4 %	5 406	1164	27,4
25 m	53,7 %	5 832	1584	37,3

El incremento en la poza de erosión aguas abajo de la estructura de derivación Huayrapongo, está influenciada directamente por los cambios de rigidez del concreto en el dissipador de energía y el material granular del lecho del río. De las TABLAS III, IV Y V podemos avizorar que para contracciones de cauce que superan el 25%, el incremento de la socavación en la estructura es significativo lo que conllevará a fallas estructurales en la descarga de la presa derivadora.

Vásquez [20], al igual que Borman [8], en sus investigaciones lograron demostrar que la concordancia entre las profundidades de socavación calculadas a partir de sus modelos deducidos y las mediciones en el prototipo es satisfactoria considerando una amplia variedad de configuraciones analizadas. Del mismo modo en la presente investigación la predicción de la profundidad de erosión para un ancho de estructura de 30 metros que se puede apreciar en la tabla III, estimada a partir de la ecuación encontrada experimentalmente en la Fig. 7, confirma la concordancia con la medida en campo para las condiciones hidráulicas del prototipo reproducidas en el modelo.

#### IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelamiento hidráulico desarrollado como metodología principal para analizar la erosión en la descarga de estructuras de derivación emplazadas en ríos altoandinos con lechos areno gravosos cuya construcción ha generado contracción del cauce natural del río ( $\Delta\%$ ), fundamenta que el incremento en las dimensiones: profundidad, longitud y tiempo en la poza de erosión aguas abajo de presas derivadoras puede estimarse a partir de funciones polinomiales de cuarto, segundo y tercer respectivamente.

Utilizando las funciones polinomiales obtenidas del modelamiento hidráulico se encontró que la profundidad máxima de erosión en la descarga de la presa derivadora Huayrapongo, se incrementa desde 5,5% hasta 71,4% para contracciones del cauce natural de 7,4% al 53,7%, encontrándose también que longitudinalmente la variación es parabólica, incrementando las longitudes de la poza de erosión de 7,7% hasta 64,8% para contracciones del cauce natural de 7,4% hasta 53,7%.

El tiempo necesario para alcanzar la socavación máxima en la descarga de la estructura de captación, es variable para diferentes porcentajes de contracción; incrementándose desde 3,2% hasta 37,3% para contracciones del cauce natural de 7,4% al 53,7%.

#### REFERENCIAS

- [1] D. Vericat, C. Garcia, y R. J. Batalla, "Variaciones temporales y espaciales en la granulometría del tramo bajo del Ebro," Cuaternario y geomorfología, vol. 20, no 1-2, 2006.
- [2] H. D. Farías, "Forma en planta de ríos de llanura. Conciliación de criterios empíricos y analíticos para la identificación de umbrales morfológicos. En Principios y aplicaciones en hidráulica de ríos," Segundo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, AIC-INA Neuquén. 2005.
- [3] L.J. Prendergast, K. Gavin, y P. Doherty, "Una investigación sobre el efecto de la socavación en la frecuencia natural de una turbina eólica marina," Ocean Engineering, vol. 101, pág. 1-11, 2015.
- [4] J. G. Whittaker, Scour Related to Energy Dissipaters for High Head Structures. 1984.
- [5] F. Hjulström, "Transportation of detritus by moving water: Part 1. Transportation," Recent Marine Sediments, a Symposium. 1939.
- [6] J. Maza, R. Springall, "Modelos fluviales de fondo móvil y su calibración," México, DF: Instituto de Ingeniería, 1968.
- [7] A. Rocha, Introducción a la hidráulica fluvial. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima: Facultad de Ingeniería Civil, 1998.
- [8] N. Bormann, P. Julien, "Scour downstream of grade-control structures," Journal of hydraulic engineering, vol. 117, no 5, p. 579-594, 1991.
- [9] H. M. Azamathulla, A. A. Ghani, "Anfis-based approach for predicting the scour depth at culvert outlets," Journal of pipeline systems engineering and practice, vol. 2, no 1, pp. 35-40, 2011.
- [10] A. Guven, M. Gunal, "Prediction of scour downstream of grade-control structures using neural networks," Journal of Hydraulic Engineering, vol. 134, no 11, p. 1656-1660, 2008.
- [11] A. M. A. Amin, "Physical model study for mitigating local scour downstream of clear over-fall weirs," Ain Shams Engineering Journal, vol. 6, no 4, pp. 1143-1150, 2015.
- [12] S. Pagliara, M. Palermo, "Scour process caused by multiple subvertical non-crossing jets," Water Science and Engineering, vol. 10, no 1, pp. 17-24, 2017.
- [13] N. Rajaratnam y O. Aderibigbe, "A method for reducing scour below vertical gates". Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy, vol. 101, no 2, p. 73-83, 1993.
- [14] S. Pagliara, R. Das, y M. Palermo, "Energy dissipation on submerged block ramps," Journal of irrigation and drainage engineering, vol. 134, no 4, p. 527-532, 2008.
- [15] G. J. Hoffmans, "Jet scour in equilibrium phase. Journal of Hydraulic Engineering," vol. 124, no 4, p. 430-437, 1998.
- [16] B. Nácher Rodríguez, "Influencia de la contracción y de los cambios de rigidez del lecho en las condiciones críticas de inicio del movimiento aguas abajo de puentes sobre cauces", 2013.
- [17] M. Vergara, Técnicas de modelación en hidráulica. México: Ediciones Alfaomega, 1993.
- [18] A. Shields, Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebepbewegung, Berlin: Technical University, 1936.
- [19] M. S. Yalin, Theory of hydraulic models. Macmillan International Higher Education, 1971.
- [20] L. Vásquez y R. Llique, "Efectos de la contracción del cauce, lecho no cohesivo y pendiente de ríos, en la profundidad de socavación en estructuras de captación," Revista Caxamarca, vol. 16, no 2, pp. 13-18, 2017.
- [21] M. Ghodsian, M. Mehraein, & H. R. Ranjbar, "Local scour due to free fall jets in non-uniform sediment," Scientia Iranica, vol. 19, no 6, p. 1437-1444, 2012.