

# MEDICIÓN DE LA SOCAVACIÓN ALREDEDOR DE UN PUENTE DURANTE CRECIDAS DEL RÍO RAPEL, CHILE

Marcelo García Medel<sup>1</sup>, Oscar Link Lazo<sup>1</sup>, Hernán Alcayaga<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Concepción, Edmundo Larenas 215, Concepción, Chile.

<sup>2</sup> Universidad Diego Portales, Avenida Ejercito Libertador 441, Santiago, Chile.  
Email: marcelogarcia@udec.cl, olink@udec.cl, hernan.alcayaga@udp.cl

## Introducción

La socavación es la causa principal de falla de puentes a nivel mundial (Brandimarte et al., 2012; Clubey et al., 2015). Se ha estudiado desde los trabajos pioneros desarrollados por Durand-Claye (1873). Actualmente existen más de 20 fórmulas que permiten estimar la profundidad máxima de socavación alrededor de una pila. No obstante, todas ellas han sido desarrolladas sobre la base de ensayos de laboratorio y sus resultados, además de discrepar de manera importante (Sheppard et al. 2014), presentan serios problemas de escala (Ettema et al. 1998, 2006; Lee y Sturm 2009). Por otra parte, se detecta que en muchos casos la socavación que lleva a la falla se alcanza durante un evento de crecida de una magnitud relativamente baja, siendo necesario introducir la variabilidad temporal del fenómeno en las fórmulas de diseño como las propuestas por Hager y Unger (2010), López et al. (2014), Link et al. (2017) o Pizarro et al. (2017). Más aún, durante la recesión de las crecidas fluviales se observa típicamente una depositación de sedimentos que produce un relleno de la fosa de socavación (Lu et al., 2008, Wang et al., 2017). En este estudio se analiza la socavación alrededor de una de las cepas del puente Rapel, causada por una serie de crecidas generadas por la operación de la central hidroeléctrica del mismo nombre que se ubica aproximadamente 24 km aguas arriba del puente. Se realizaron mediciones de socavación y profundidad de agua durante seis crecidas de aproximadamente un día de duración cada una. Se extendió el modelo de Link et al. (2017) para considerar el relleno de la fosa que ocurre durante la recesión de las crecidas. Se concluye que el modelo extendido representa de buena manera el fenómeno observado a escala natural y puede ser aplicado previa calibración de parámetros.

## Sitio de estudio

El sitio de estudio corresponde al puente Rapel sobre el río que lleva el mismo nombre (Latitud 33° 56' 23" y Longitud 71° 44' 10"), ubicado en la zona central de Chile. El régimen de caudales del río está regulado por la operación de una central hidroeléctrica ubicada 24 kilómetros aguas arriba del puente. En la Figura 1 se muestra la ubicación geográfica de la cuenca del río Rapel y el puente en estudio.

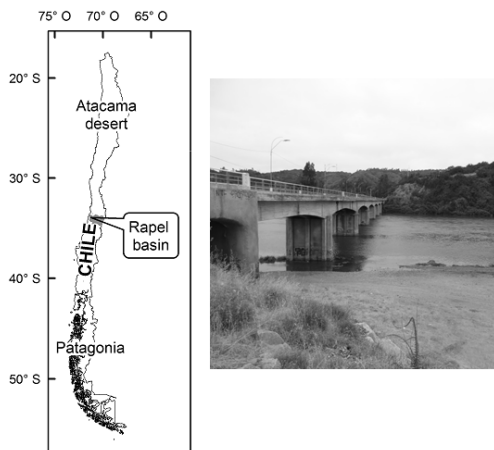


Figura 1.- Ubicación de la cuenca del río Rapel y Puente estudiado.

## Materiales y métodos

La medición de profundidad de socavación se realizó utilizando el sensor "Airmar Echo Range™ SS510 Smart™ Sensor" provisto de un datalogger "SDL 500". El sensor utilizado es un sonar, que calcula la

distancia basándose en el tiempo que demora un pulso acústico hacia el lecho del río y volver al sensor. Dentro de las ventajas de utilizar este método para medir la profundidad de socavación se cuenta la capacidad de registrar el eventual relleno que ocurre durante la recesión de las crecidas.

Para medir la profundidad de agua se utilizó un sensor de presión "HOBO Water Level Logger (U20-001-01)".

Se midieron los perfiles de velocidad durante una crecida mediante un *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP), de la marca Sontek, modelo Riversurveyor®.

Durante seis días se midió de manera simultánea la profundidad de socavación frente a la cepa en estudio y el nivel de agua. La frecuencia de medición fue de 10 minutos para todos los instrumentos.

Para calcular la socavación se extendió el modelo DFW (Pizarro et al., 2017, Link et al., 2017). El trabajo efectivo del escurreimiento sobre el lecho alrededor de la cepa de puente se define como:

$$W^* = \int_0^{t_{end}} \frac{1}{t_R} \left( \frac{u - 0.5u_c}{u_R} \right)^4 \delta dt \quad [1]$$

donde  $t_{end}$  es la duración del hidrograma,  $t_R$  es un tiempo de referencia,  $z_R$  es una profundidad de referencia,  $u$  es la velocidad media en la columna de agua y  $u_c$  es la velocidad crítica para el movimiento incipiente del sedimento.  $\delta$  es un parámetro que distingue cuando se acumula trabajo efectivo y se define como:

$$\delta = \begin{cases} 1 & u/u_c < 0.5 \\ 0 & u/u_c \geq 0.5 \end{cases} \quad [2]$$

La profundidad de socavación normalizada ( $Z^*$ ) se define como:

$$Z^* = \frac{1}{z} \frac{z}{d_s} \left( \frac{d_s}{D} \right)^2 = \frac{z}{z_R} \quad [3]$$

donde  $d_s$  es el tamaño representativo del sedimento.

Para relacionar la profundidad de socavación normalizada con el trabajo efectivo del flujo se utiliza una función exponencial de tres parámetros:

$$Z^* = c_1 (1 - e^{-c_2 W^{*c_3}}) \quad [4]$$

donde  $c_1$ ,  $c_2$  y  $c_3$  son los parámetros del modelo que deben ser calibrados en función de la geometría del sedimento y la cepa, siendo específicos para cada sitio.

## Resultados

En la Figura 2 se presentan las mediciones de socavación frente a la cepa estudiada y el caudal del río. Las mediciones fueron realizadas durante una serie de crecidas, donde se pueden distinguir tres eventos de socavación. Es importante notar que existe un umbral de caudal para el cual aumenta la profundidad de socavación. Durante la fase recesiva de las crecidas se observa un relleno de la fosa.

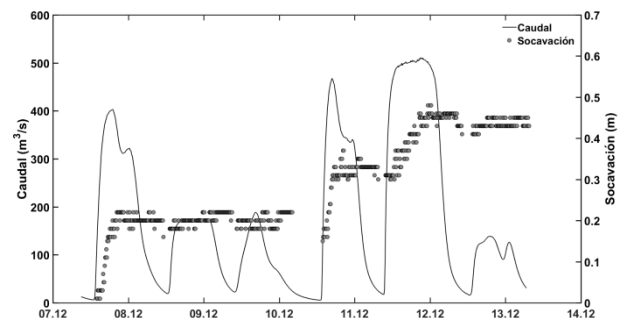


Figura 2.- Hidrograma y mediciones de socavación en el tiempo.

Los resultados de la calibración y validación del modelo de socavación se muestran en la Figura 3. Se utilizó el primer evento de socavación para calibrar los parámetros  $c_1$ ,  $c_2$  y  $c_3$  requeridos por el modelo. Además en la figura se muestra la validación del modelo con las mediciones posteriores al primer evento de socavación, destacando el buen desempeño del modelo extendido para predecir la evolución temporal de la socavación. Los valores de RMSE y Eficiencia de Nash-Sutcliffe fueron de 2.31 cm y 0.958, respectivamente, indicando que la calidad de los cálculos del modelo es muy buena.

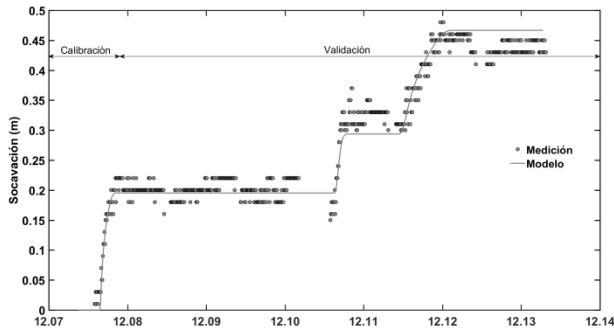


Figura 3.- Evolución temporal de la socavación.

## Referencias

- Brandimarte, L., P. Paron y G. Di Baldassarre** (2012). "Bridge pier scour: A review of processes, measurements and estimates". *Environmental Engineering and Management Journal*. Vol. 11, No. 5. pp. 975-989.
- Clubey, S., D. Richards y C. Manes** (2015). "High-resolution sonars set to revolutionise bridge scour inspections". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering*, ICE, Vol. 168, No. 1, pp. 35-42.
- Durand-Claye, A.** (1873). "Expériences sur les affouillements". *Annales des Ponts et Chaussées*, pp. 467.
- Ettema, R., B. Melville y B. Barkdoll** (1998). "Scale Effect in Pier-Scour Experiments". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 6, pp. 639-642.
- Ettema, R., G. Kirkil y M. Muste** (2006). "Similitude of Large-Scale Turbulence in Experiments on Local Scour at Cylinders". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 1, pp. 33-40.
- Hager, W. y J. Unger** (2010). "Bridge pier scour under flood waves". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 136, No. 10, pp. 842-847.
- Lee, S. y T. Sturm** (2009). "Effect of sediment size scaling on physical modeling of bridge pier scour". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 135, No. 10, pp. 793-802.
- Link, O., C. Castillo, A. Pizarro, A. Rojas, B. Ettmer, C. Escauriaza y S. Manfreda** (2017). "A Model of Bridge Pier Scour During Flood Waves". *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 55, No. 3, pp. 310-323.
- López, G., L. Teixeira, M. Ortega-Sánchez y G. Simarro** (2006). "Estimating final scour depth under clear water flood". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 140, No. 3, pp. 328-332.
- Lu, J., J. Hong, C. Su, C. Wang, and J. Lai** (2008). "Field Measurements and Simulation of Bridge Scour Depth Variations during Floods". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 6, pp. 810-821.
- Pizarro, A., B. Ettmer, S. Manfreda, A. Rojas y O. Link** (2017). "Dimensionless Effective Flow Work for Estimation of Pier Scour Caused by Flood Waves". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 143, No. 7.
- Sheppard, D.M., B. Melville y H. Demir** (2014). "Evaluation of Existing Equations for Local Scour at Bridge Piers". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 140, No. 1, pp. 14-23.

**Wang C., X. Yu y F. Liang** (2017). "A Review of Bridge Scour: Mechanism, Estimation, Monitoring and Countermeasures". *Natural Hazard*, Vol. 87, No. 3 pp. 1881-1906.