

EROSIÓN AGUAS ABAJO DE TRAVIESAS EN TRAMOS CURVOS: RESULTADOS PRELIMINARES

Mishel V. Reyes^{1,2}, Julio M. Kuroiwa^{3,4} y Luis F. Castro^{5,6}

¹Tesista. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

² Investigadora Junior. Laboratorio Nacional de Hidráulica. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

³ Director. Laboratorio Nacional de Hidráulica. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

⁴ Docente Principal. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

⁵ Investigador. Laboratorio Nacional de Hidráulica. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

⁶ Jefe de Prácticas. Departamento Académico de Hidráulica e Hidrología. Facultad de Ingeniería Civil.

Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

E-mail: mreycsc@uni.pe, jkuroiwa@uni.edu.pe, lfcastro@uni.edu.pe

Introducción

Las traviesas han sido empleadas como obras de control de socavación para evitar la profundización del cauce en tramos donde este efecto hubiera desestabilizado estructuras de importancia, como obras de cruce, viaductos, etc. Martín-Vide (2013) indica que, en particular, este tipo de medida se aplica con éxito para controlar la incisión en ríos efímeros y torrenciales. El Suplemento Técnico 14G del USDA (2007) incluye una serie de técnicas empleadas en los Estados Unidos de América para estabilizar los cauces, entre ellas, las traviesas conformadas con roca suelta. Martín-Vide (2001) estudió el río Besòs, en Barcelona, en el cual se ejecutaron trabajos de rehabilitación del cauce, logrando la estabilización mediante un sistema que incluía traviesas. En los caudales máximos ensayados el flujo seguía la dirección de los muros u obras de encauzamiento. Bormann y Julien (1991) desarrollaron un método para predecir la máxima profundidad de erosión que ocurre aguas abajo de traviesas basándose en un modelo teórico que tomaba en cuenta la difusión del chorro y la estabilidad de la partícula. Martín-Vide, J.P. (2013) observó que la pendiente final del lecho entre traviesas es mucho menor que la pendiente de equilibrio cuando no hay traviesas. Esto genera una especie de “caída” entre la traviesa ubicada aguas arriba y el lecho, por lo que varios autores han considerado que la erosión local aguas abajo de traviesas y la que ocurre aguas abajo de una caída son similares. Por ejemplo, Lenzi et al. (2003) cita el trabajo de Bormann y Julien (1991) y analiza los datos de 73 sitios en Italia donde se midió la erosión que ocurre aguas abajo de las caídas. En los casos citados no se analizó la influencia de la curvatura del cauce en los patrones de erosión local, en particular en la profundidad máxima. El segundo y tercer autor de este documento ejecutaron una serie de pruebas en un modelo físico de un tramo del Río Rímac con la finalidad de probar la eficacia de traviesas para proteger las estructuras del tramo 2 de la Línea 1 del Metro de Lima. El tramo representado tiene tramos curvos en los cuales se observó patrones de socavación asimétricos el cual fue reportado en LNH (2013). Por lo tanto, se continuó la investigación con la finalidad de mejorar la predicción de la socavación que ocurre inmediatamente aguas abajo de traviesas, tomando en cuenta la curvatura del cauce.

Objetivo

El objetivo de la presente investigación fue determinar el efecto de la curvatura sobre la erosión local que se genera aguas abajo de una traviesa. Para lograr este objetivo se empleó un modelo físico. Los patrones de velocidades fueron analizados y calibrados para mejorar la predicción de la socavación máxima que ocurre aguas abajo de las traviesas en tramos curvos.

Materiales y métodos

Los experimentos se llevaron a cabo en un modelo físico a

escala 1/40 que representaba una longitud de 1397 m del tramo urbano del Río Rímac. Por lo tanto, la longitud en el modelo fue aproximadamente 35 m. Debido a que las partículas del cauce eran gruesas, al reducir las a escala se encontraban en el rango de las gravas y arenas. El diámetro medio del material del lecho, d_{50} , y los valores de d_{16} , d_{84} y d_{90} , son 1.34, 0.21, 3.73 y 4.33 mm, respectivamente. Las pruebas se ejecutaron mediante un sistema de recirculación compuesto por una cisterna subterránea cuya capacidad total es 120 m³. Una de las cuatro bombas disponibles cuya capacidad es 150 L/s fue usada para bombear el agua a un reservorio rectangular elevado de 5 m³, ubicado aproximadamente a 5 m por encima del nivel del área de los modelos hidráulicos. Una tubería de 356 mm (14”) transportó el agua hacia un tanque metálico donde un vertedero triangular de 53° equipado con un limnómetro Neyrpic permitía la medición de caudales. Se empleó un puente metálico para medir los tirantes y las velocidades durante las pruebas. En una primera etapa se empleó un correntómetro electromagnético marca Sensa, modelo RC-2, para medir las velocidades en el modelo. Al finalizar las pruebas se bloqueó la salida lentamente mediante una compuerta para impedir cualquier erosión adicional a la obtenida durante los ensayos. El rango de caudales fue entre 2.96 y 57.7 L/s. Se incorporó sedimentos entre 0 y 14 Kg/min.



Figura 1.- Vista en dirección aguas abajo del módulo de pruebas.

En una etapa posterior, que forma parte del desarrollo de la tesis del título profesional de la primera autora, se obtuvieron los patrones de velocidad con un velocímetro acústico Doppler (ADV, siglas en inglés) marca Nortek, modelo Vectrino, los cuales permitieron calibrar el modelo TELEMAT 3D. Este modelo permitirá simular el patrón de flujo en el cauce y explicar la formación de fosas asimétricas en el lecho simulado.

Observaciones y resultados

En los experimentos desarrollados por el LNH (2013) se pudo observar que se formaban fosas de erosión asimétricas en los

tramos curvos del modelo físico. Hasta la fecha se han repetido los ensayos con los mayores caudales donde se han registrado velocidades con un velocímetro ADV. Debajo se muestra una vista en planta donde se muestran los contornos de las fosas de erosión para el caudal máximo, 57.7 L/s, obtenido en el segundo grupo de ensayos.

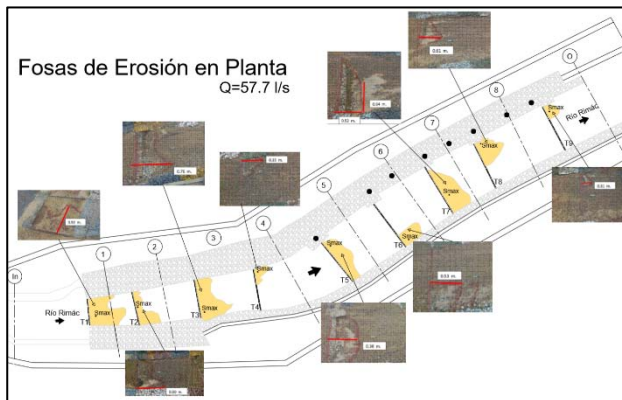


Figura 2.- Esquema donde se muestran las traviesas y la forma de las fosas de erosión en planta.

Se midieron los patrones de velocidad en las secciones ubicadas inmediatamente aguas arriba de las traviesas. La Figura 3, debajo, muestra los patrones de velocidad en las traviesas.

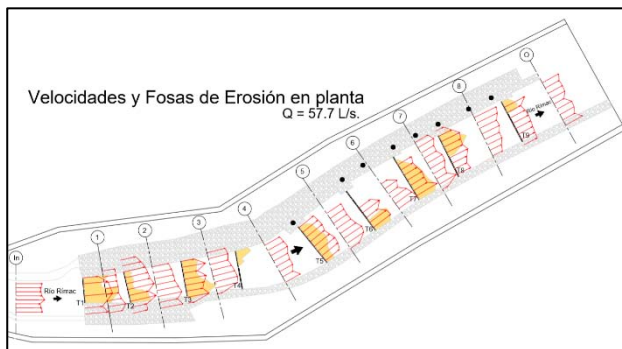


Figura 3.- Esquema donde se muestran las traviesas, la forma de las fosas de erosión en planta y las velocidades en la dirección principal del flujo.

Al analizar la asimetría de las fosas de erosión se parte inicialmente del radio de curvatura de $R/W = 3.01$ ($R=5\text{m}$, $W=1.66\text{ m}$) en el tramo entre los ejes 4 y 5. La curvatura genera mayores velocidades en la margen derecha entre los ejes 5 y 7 y luego tiendan a volverse uniformes aguas abajo. Además, en la Figura 2, se observa el desplazamiento de la erosión máxima hacia la margen izquierda entre las traviesas 6, 7 y 8.

Se empleó el programa TELEMAC-3D para implementar un modelo numérico y simular los flujos que discurren por el modelo hidráulico. Los datos registrados en campo fueron utilizados para calibrar el modelo.

Empleando la expresión de Bormann y Julien (1991) y los datos de los mismos autores y esta investigación se graficó la erosión observada versus la erosión calculada. La Figura 4 muestra que los datos de esta investigación estarían subestimados por lo general (excepto uno) y esto se debería a una mayor concentración de flujo sobre los lados externos de la curva. Además, el gráfico sugiere que un factor de corrección de 3 permite generar una envolvente por debajo de la cual se encontrarían estimados todos los datos de erosión máxima de los tramos del módulo experimental del cauce que representa el río Rímac, que corresponden a esta investigación.

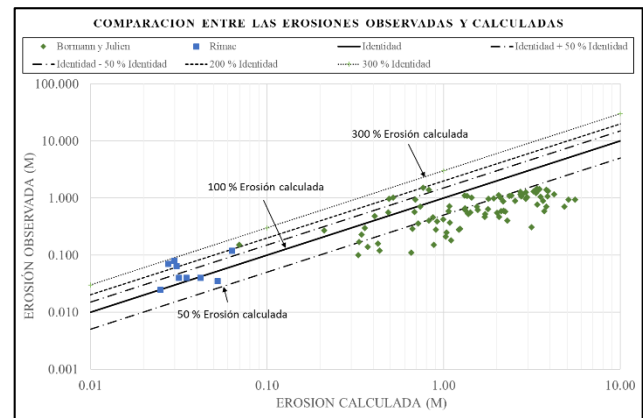


Figura 4.- Erosión local observada versus erosión local estimada empleando la expresión de Bormann y Julien (1991).

Conclusiones

Los resultados de esta investigación experimental sugieren que, en tramos curvos de ríos aluviales de fuerte pendiente, y que han sido protegidos con traviesas, se generen erosiones locales más profundas que en tramos rectos. Para propósitos de comparación, se empleó la ecuación de Bormann y Julien (1991) y se verificó que las erosiones observadas en esta investigación eran subestimadas. Sin embargo, un factor de 3 genera una envolvente que podría usarse con fines de diseño. Los efectos de curvatura en las dimensiones de la fosa de erosión deben ser estudiados en investigaciones posteriores.

Referencias bibliográficas

- Bormann, N. E., y Julien, P. Y.** (1991). "Scour downstream of grade control structures." *J. Hydraul. Eng.*, 117(5), 579–594.
- Laboratorio Nacional de Hidráulica- LNH.** (2013). Estudio De Un Modelo Físico A Escala Reducida Del Proyecto De Las Obras Complementarias Que Se Realizarán Sobre El Río Rímac. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
- Lenzi, M.A.; Marion, A y Comiti, F.** (2003). Local scouring at grade-control structures in alluvial mountain rivers. *Water Resour. Res.*, 39(7), 1176.
- Martín-Vide, J.P.** (2001). Restoration of an Urban River in Barcelona, Spain. *Environ Engg and Policy* 2. 113-119.
- Martín-Vide, J.P.** (2013). Erosión, Sedimentación y Restauración de Ríos. Ejemplos de Ingeniería e Investigación. Tecnología y Ciencias del Agua, Vol. IV (5), 5-18.
- United States Department of Agriculture- USDA.** (2007). Technical Supplement 14G. Grade Stabilization Techniques. National Engineering Handbook. United States Department of Agriculture. Washington D.C., Estados Unidos de América.

Agradecimientos y reconocimientos

La fase experimental del estudio se ejecutó en el modelo físico que se construyó para el Estudio Mediante un Modelo Físico de las Obras Complementarias que se Ejecutarán en el Río Rímac, encargado por el Consorcio Tren Eléctrico al LNH.

La participación de la primera autora en la presente investigación fue auspiciada por el Proyecto de Investigación Formativa FIC-F-9-2016, del Instituto General de Investigación (IGI), que depende del Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Los modelos numéricos fueron ejecutados en un clúster de alto rendimiento que fue instalado en el LNH-UNI, a través del Convenio N° 257-INNOVATEPERU-EC- 2016, firmado entre el Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad del Ministerio de la Producción y la Universidad Nacional de Ingeniería.