

ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ERODIBILIDAD A PARTIR DE ENSAYOS DE EROSIÓN POR CHORRO

Joel Fernández Espinoza¹ y Ronald R. Gutiérrez^{1, 2}

¹Grupo de investigación GERDIS, Departamento de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú.

²Grupo de investigación IDEHA, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Norte, Colombia.
E-mail: joelm.fernandez@pucp.edu.pe, rgutierrezll@uninorte.edu.co

Introducción

Una de las principales causas del deterioro de la calidad del agua en los ríos es el exceso de sedimentos. La urbanización y el incremento de escorrentía superficial favorecen la generación de caudales máximos y por ende la intensificación de los procesos de erosión ribereña, los cuales a su vez se traducen en un aumento de la carga de sedimentos (Clark and Wynn, 2007). El modelo utilizado ampliamente en la literatura hasta la fecha para determinar el desprendimiento del suelo es el modelo lineal conocido como la ecuación de exceso de esfuerzo cortante (Partheniades, 1965). Este modelo establece que la tasa de erosión es proporcional a la diferencia entre el esfuerzo cortante aplicado (τ) y el esfuerzo cortante crítico (τ_c):

$$\varepsilon_r = k_d(\tau - \tau_c)^a \quad [1]$$

Donde ε_r es la tasa de desprendimiento (m/s); k_d es el coeficiente de erodibilidad ($m^3/N-s$); τ_c es el esfuerzo cortante crítico (Pa); τ es el esfuerzo cortante aplicado en la superficie del suelo y a es un exponente que por lo general es asumido como 1. De donde se desprende que los parámetros que rigen los procesos de erosión ribereña son el esfuerzo cortante crítico del suelo (τ_c) y el coeficiente de erodibilidad del suelo (k_d), llamados parámetros de erodibilidad. Usualmente la estimación de estos parámetros se ha realizado sobre la base de ecuaciones empíricas desarrolladas en otros contextos geográficos que, en la mayoría de los casos, subestiman o sobrestiman estos valores. Así, el objetivo del presente estudio es determinar los parámetros de erodibilidad del suelo mediante la aplicación de la prueba de erosión por chorro (Jet Erosion Test - JET) en el campo. Para ello, se diseñó el dispositivo de erosión por chorro en el Perú bajo la asesoría del Servicio de Investigación Agrícola de los Estados Unidos (USDA-ARS). Este diseño implicó realizar algunas modificaciones al diseño original, las cuales permitieron trabajar bajo las condiciones geográficas del Perú. Asimismo, hubo un proceso de calibración del instrumento, el cual implicó la determinación del coeficiente de descarga ($C_d = 0.97$) y la prueba de desempeño del dispositivo JET en laboratorio. Finalmente, se realizaron 4 pruebas JET en el campo a lo largo de la subcuenca Rímac (Cuenca alta del Río Rímac - Distrito de Chicla, Perú). En promedio, el esfuerzo cortante crítico obtenido (τ_c) fue de $4.03 Pa$ y el coeficiente de erodibilidad (k_d) fue de $1.21 cm^3/N-s$. El desarrollo de esta prueba puede ser potencialmente aplicado a los principales ríos del país que presentan riesgo de erosión ribereña.

Materiales y métodos

Con la finalidad de poder hacer estimaciones de erosión ribereña en los principales ríos del Perú, se procedió a diseñar y producir el dispositivo de erosión por chorro (JET) en el país. Este diseño tuvo como base las especificaciones propuestas por Hanson and Cook (2004) y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Por consiguiente, el diseño tuvo tres etapas: (i) stock de los materiales para la producción del equipo, (ii) modificaciones al diseño original conforme a las condiciones geográficas del país, y (iii) elaboración de los

planos de diseño. La Figura 1 muestra el diagrama del dispositivo de erosión por chorro (JET) y algunas vistas de la instalación del equipo en el laboratorio de Hidráulica de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

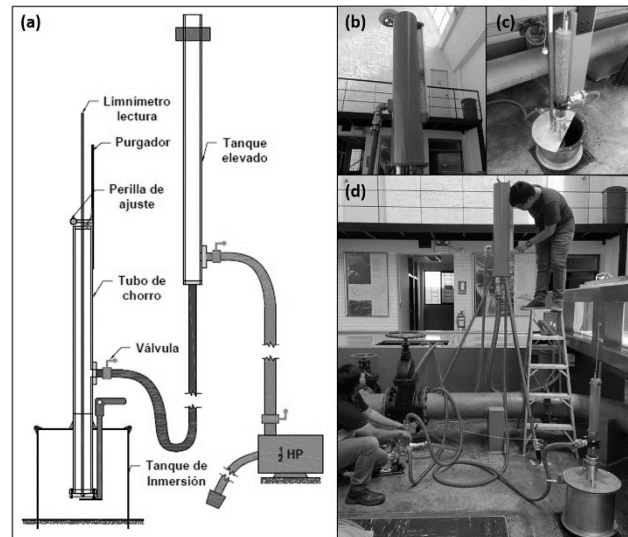


Figura 1.- Diseño del dispositivo de erosión por chorro (JET), (a) Esquema del dispositivo JET, (b) Tanque elevado con el aliviadero tipo "Morning Glory" incorporado, (c) Tubo de chorro acoplado al tanque de inmersión, (d) Instalación del dispositivo JET en el laboratorio.

Una vez que se fabricó el dispositivo, se procedió con la etapa de calibración del equipo en laboratorio con la finalidad de buscar obtener resultados fiables. Para ello, el proceso de calibración involucró dos etapas importantes: (1) la determinación del coeficiente de descarga C_d , y (2) la evaluación del desempeño del dispositivo de erosión por chorro en el laboratorio. Es importante señalar que estos procedimientos fueron realizados previo a la salida de campo en donde se determinaron los parámetros de erodibilidad. La Tabla 1 muestra los resultados de la calibración hidráulica del dispositivo de erosión por chorro JET para tres configuraciones de carga analizadas (77, 79 y 109cm). En promedio se obtuvo un coeficiente de descarga (C_d) de 0.97, el cual fue incluido como factor para los cálculos de los parámetros de erodibilidad.

Tabla 1.- Calibración hidráulica del dispositivo JET para tres configuraciones de cargas.

Carga [cm]	Diámetro del orificio [mm]	Velocidad del chorro [m/s]	Número de Reynolds	Coefficiente de descarga [C_d]
77	6,65	3,79	27482	0,98
79	6,65	3,82	27675	0,97
109	6,65	4,44	32170	0,96

Luego del proceso de calibración, en donde se puso a prueba la fiabilidad del equipo de representar con mayor exactitud los parámetros de erodibilidad, se procedió a realizar ensayos de erosión por chorro en el campo. El área de estudio se ubica en la

parte alta de la cuenca del Río Rímac (Subcuenca Rímac), específicamente en el distrito de Chicla. La longitud principal del río es de 18.18km, con un caudal máximo instantáneo de $106\text{m}^3/\text{s}$ para 100 años de período de retorno, de acuerdo con la estación hidrométrica Río Blanco (ANA, 2010).

Resultados

Previamente a la salida de campo, como parte del reconocimiento del terreno se extrajo y analizó una muestra de suelo del área de estudio. Este proceso de análisis incluyó la distribución de las partículas del suelo, los límites líquidos y plásticos, la densidad máxima y el contenido de humedad óptima (Khanal et al., 2016). De acuerdo con la clasificación SUCS, se trata de un suelo SM con 5% de arcilla, 12% de limo y 83% de arena. Este suelo no presenta índice de plasticidad, su densidad máxima es de $1.71\text{gr}/\text{cm}^3$ y su contenido de humedad óptima es de 15%. Estos tipos de suelos arenosos son fácilmente erosionables debido a la presencia de gran porcentaje de arena en su matriz. Por lo tanto las presiones de carga aplicadas para estimar los parámetros de erodibilidad deben ser moderadas así como cortos intervalos de medición.

Los ensayos de erosión por chorro en el campo siguieron el presente protocolo, el cual estuvo basado en los criterios de Al-Madhhachi et al. (2013): 4 mediciones con intervalos de 60 segundos, 2 mediciones con intervalos de 120 segundos, 4 mediciones con intervalos de 180 segundos y por último 2 mediciones con intervalos de 300 segundos. La presión de carga aplicada fue de 97cm para las cuatro pruebas realizadas. En promedio, los parámetros de erodibilidad en la ribera del río Rímac fueron los siguientes: (i) esfuerzo cortante crítico (τ_c) de 4.03Pa y (ii) coeficiente de erodibilidad (k_d) de $1.21\text{cm}^3/\text{N}\cdot\text{s}$.

Conclusiones y trabajos futuros

El dispositivo de erosión por chorro (JET) aparece como la herramienta capaz de cubrir esa brecha de falta de información necesaria para la estimación de los parámetros de erodibilidad. Con ello se podría potencialmente caracterizar las cuencas e identificar zonas en riesgo de erosión ribereña. El dispositivo JET ofrece una evaluación sencilla, rápida y económica con un gran potencial de aplicación en los principales ríos del Perú a efecto regular en materia de control de erosión e introducir planes de mitigación de erosión ribereña en áreas susceptibles a estos procesos erosivos.

Referencias bibliográficas

Al-Madhhachi, A. T., Hanson, G. J., Fox, G. A., Tyagi, A. K., and R. Bulut (2013). "Measuring soil erodibility using a laboratory "mini" jet". *Transactions of the ASABE*, Vol. 56, No. 3, 901 – 910.

ANA (2010). "Evaluación de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Rímac: Estudio Hidrológico y Ubicación de la Red de Estaciones Hidrométricas en la Cuenca del Río Rímac". *Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos – Área de Aguas Superficiales*, Vol. 1, pp. 225.

Clark, L. A. and T. M. Wynn (2007). "Methods for determining streambank critical shear stress and soil erodibility: Implications for erosion rate predictions". *Transactions of the ASABE*, Vol. 50, No. 1, 95–106.

Hanson, G. and K. Cook (2004). "Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ". *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 20, No. 7.

Khanal, A., Fox, G. A., and A. T. Al-Madhhachi (2016). "Variability of erodibility parameters from laboratory mini jet erosion test". *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 21, No. 10, 1 – 17.

Partheniades, E. (1965). "Erosion and deposition of cohesive soils". *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 91, No. 1.