



Influencia de la granulometría, forma de pila y parámetros hidrológicos en la socavación*

Lorena Rivera-Soler^a ■ Daniel Fabián Daza Ramírez^b ■ Carlos Eduardo Torres^c

Resumen: El objetivo de este trabajo fue establecer la influencia que ejerce la granulometría del lecho del río, la forma de la pila de un puente y los parámetros hidrológicos en la profundidad de socavación, a partir de un modelo físico. Para el desarrollo experimental se empleó un suelo granular proveniente de río al que se le realizaron ensayos de laboratorio para determinar la distribución del tamaño de las partículas, empleando materiales cuya clasificación, según el sistema unificado de clasificación de suelos (USCS, por sus siglas en inglés) es SP (arena mal gradada), SW (arena bien gradada), SP-SC (arena mal gradada con arcilla). Adicionalmente, se realizó un análisis estadístico con el fin de determinar las diferencias significativas entre cada una de las variables y su influencia en dicho proceso. Se encontró que existe una fuerte relación entre la forma de la pila, el caudal y la granulometría, con las características hidrodinámicas del flujo cuando pasa por las pilas, así como en la profundidad de socavación.

Palabras clave: socavación; forma de pila; granulometría; caudal; modelo físico; análisis estadístico

Recibido: 16/09/2020

Aceptado: 14/10/2021

Disponible en línea: 30/12/2022

Cómo citar: Rivera-Soler, L., Daza Ramírez, D. F., & Torres, C. E. (2022). Influencia de la granulometría, forma de pila y parámetros hidrológicos en la socavación. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 32(2), 27-42. <https://doi.org/10.18359/rcin.5257>

* Artículo de investigación.

a Candidata a magíster en hidrosistemas, ingeniera civil. Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.

Correo electrónico: vivian.rivera@usantotomas.edu.co
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8380-7162>

b Ingeniero civil. Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.

Correo electrónico: danieldazar@usantotomas.edu.co
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5568-9154>

c Magíster en ingeniería geotecnia, ingeniero civil. Docente en la Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.

Correo electrónico: carlos.torresr@usantotomas.edu.co
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7956-4391>

Influence of grain size, pile shape, and hydrological parameters on scouring.

Abstract: The objective of this work was to establish the influence of river bed granulometry, bridge pile shape, and hydrologic parameters on scour depth based on a physical model. For the experimental development, granular soil from a river was used and laboratory tests were carried out to determine the particle size distribution using materials whose classification, according to the Unified Soil Classification System (USCS), is SP (poorly graded sand) SW (well-graded sand), SP-SC (poorly graded sand with clay). In addition, a statistical analysis was performed to determine the significant differences between each of the variables and their influence on the process. It was found that there is a strong relationship between the shape of the pile, flow rate, and granulometry, with the hydrodynamic characteristics of the flow as it passes through the piles, as well as the scour depth.

Keywords: scour; pile shape; grain size; flow rate; physical model; statistical analysis.

Introducción

Las pilas son estructuras fundamentales para proporcionar estabilidad a los puentes, muelles, entre otras obras, que requieren estar elevadas debido a un desnivel natural o porque están inmersas en el agua [1]. La existencia de estas pilas en el agua genera que el flujo cambie su patrón y se desarrollen diferentes fenómenos alrededor de la fundación de la estructura como turbulencia, vórtices en herradura, líneas de contracción, entre otros [2], que inducen a la erosión donde se está soportando la pila, profundizan el nivel del fondo del cauce, a lo cual se le conoce como socavación [3], [4], que, con el tiempo o al paso de corrientes muy fuertes, transportan más sedimentos y desestabilizan los pilares hasta llegar al colapso [5]-[7]. Además, se puede eliminar el sedimento alrededor de la base del puente, cambiar las frecuencias naturales estructurales, reducir la capacidad de soporte lateral de la base e incluso disminuir la capacidad sísmica del puente [8]-[11]. En Colombia, entre 1986 y 2001, se determinó que el 35 % de los puentes falla por socavación en la cimentación de sus estribos, lo que causa incertidumbre sobre los cálculos de diseño que se realizan actualmente [12].

Estudios sobre la caracterización de las diferentes variables que influyen en el proceso de socavación son la base para predecir y solucionar la estabilidad de las estructuras. Se han planteado fórmulas con base en métodos experimentales, donde se varían las características de los muelles y las pilas como el caudal, la geometría del elemento, la contracción y dirección del flujo [13]-[16]. Además, se ha estudiado el flujo uniforme estable cerca del inicio del movimiento de las partículas del lecho, para encontrar la profundidad de equilibrio de socavación [17]. Otros autores han realizado avances en la determinación temporal de la profundidad de erosión, acorde con hidrogramas de crecida y generación de herramientas que permitan la estimación de la fiabilidad de la fundación del puente con respecto a la erosión local [18]. En cuanto a la variación de geometría, se ha comparado el flujo dinámico del agua en dos tipos de pilas para evaluar su influencia en la erosión del cauce [19].

A pesar del progreso informado anteriormente, aún existe la necesidad de avanzar en la modelación física y numérica del flujo alrededor del obstáculo, es decir, el flujo en torno a la pila y el proceso erosivo. Adicionalmente, se debe desarrollar el enfoque probabilístico del problema de erosión local en pilas [18]. Por otra parte, es importante estudiar la influencia entre la magnitud de los eventos extremos y el transporte del material, debido a que no siempre un mayor caudal causa mayor socavación, pues esta depende de otros factores como el diámetro de partícula, la velocidad del flujo y la profundidad del agua [20], [21]. Las formas de las pilas son un punto de partida para el futuro análisis de formas de secciones combinadas o experimentales, donde se apreciarían los posibles fenómenos de forma más didáctica y clara [22].

Este estudio tiene como objetivo principal identificar la influencia de la granulometría del suelo, la forma de la pila y los parámetros hidrológicos en la socavación a partir de modelación física.

Materiales y métodos

El proceso de socavación se analizó en los laboratorios de la Universidad Santo Tomás, sede Bogotá. Se usó un canal de vidrio de grosor de 8 mm que tiene 2 m de largo, 28 cm de ancho y 25 cm de alto; un agujero en un extremo para la entrada de agua, una compuerta de caucho a 60 cm del agujero, que disminuye la energía del flujo, también un muro a 10 cm de la compuerta, con una altura de 10 cm —este sirve para sostener los materiales— y al final un vertedero en vidrio de 12 cm de alto con el mismo grosor que las paredes del canal (figura 1).

El sistema de medición del parámetro de socavación se realizó directamente de la pila, con una escala gráfica donde se tenía precisión de un milímetro, y el proceso de medición para los caudales se explica en el acápite de calibración.

Calibración

Con el fin de realizar una correcta modelación física se realizó una calibración de caudales usando un banco hidráulico TecEquipment H1D, para determinar los caudales que se emplearon en los ensayos. Este procedimiento se realizó fijando



Figura 1. Canal para la modelación física del proceso de socavación en pila de puentes

Fuente: elaboración propia.

diferentes aberturas de la compuerta y tomando el tiempo que se demora un volumen de 15 L en salir del canal, esto se varió por medio de una válvula, haciéndola rotar angularmente desde π rad hasta 10π rad. Finalmente, el volumen se dividió entre el tiempo obteniendo el caudal por cada rotación (figura 2).

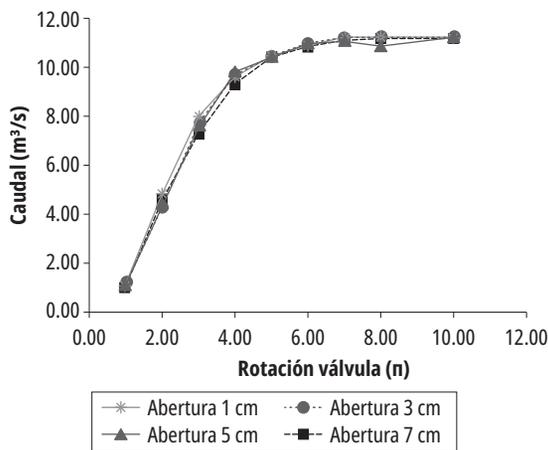


Figura 2. Caudales obtenidos a diferentes aberturas de compuerta y variando la rotación de la válvula

Fuente: elaboración propia.

Como se evidencia en la figura 2, los caudales obtenidos en los ensayos realizados a diferentes aberturas a partir de la rotación 6π rad eran similares; sin embargo, la velocidad luego de la

compuerta disminuía debido a que el espacio comprendido entre el agujero de entrada de agua y la compuerta funcionaba como una cámara de quietamiento, que sirve para disipar energía de presión en el flujo de llegada [23]. Por tanto, se decidió realizar ensayos para medir la velocidad, colocando una esfera inmediatamente después de la compuerta y midiendo el tiempo que se demoraba en llegar al final del canal. Estos ensayos se repitieron tres veces en cada abertura con la válvula en la rotación 10π rad y se promediaron los resultados. Con esto se determinó que para representar de manera correcta el fenómeno de socavación en el modelo experimental, se debe usar la compuerta totalmente abierta, ya que de esta forma se llega a la velocidad máxima. Finalmente, se decide tomar dos caudales obtenidos en las rotaciones 10π rad y 3π rad con valores de $1.87 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ a $1.3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente.

Los valores de caudales empleados en la modelación física son significativamente menores a los que se presentan en quebradas y ríos del país, por ejemplo, en la quebrada La Rocha con un caudal de $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$, o en el río Magdalena con un caudal de $7000 \text{ m}^3/\text{s}$. En estos dos ejemplos se presentaron problemas de socavación en sus puentes [12]. Cabe resaltar que estos valores son pequeños por las dimensiones del modelo y que el equipo empleado no arrojaba un mayor caudal.

Posteriormente, se determinan las características hidráulicas y geométricas que se emplearon en la modelación, tal como se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Características hidráulicas y geométricas

Condiciones de flujo	Subcrítico
Caudales (m ³ /s)	1.87x10 ⁻⁴
	1.3x10 ⁻⁴
Forma de pila	Circular
	Cuadrada
Ancho de pila (m)	0.05
Material de pila	Madera

Fuente: elaboración propia.

Material

Adicionalmente, para la modelación física del proceso de socavación se seleccionaron tres tipos de materiales, todos de composición arenosa con presencia de finos. Cada granulometría posee

parámetros característicos, como se evidencia en la tabla 2:

Donde:

- **D₁₀**: diámetro por el que pasa el 10 % de las partículas en milímetros.
- **D₃₀**: diámetro por el que pasa el 30 % de las partículas en milímetros.
- **D₅₀**: diámetro por el que pasa el 50 % de las partículas en milímetros.
- **D₆₀**: diámetro por el que pasa el 60 % de las partículas en milímetros.
- **SP**: arena mal gradada.
- **SW**: arena bien gradada.
- **SP-SC**: arena mal gradada con arcilla.

En la figura 3 se observan las curvas granulométricas de los tres tipos de materiales empleados en el proyecto.

Se observa en las curvas que los tres materiales encontrados corresponden a arenas con

Tabla 2. Tipos de granulometrías y parámetros característicos empleados en la modelación física

Suelo	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	D ₅₀	C _u	C _c	Clasificación
N.º 1	0.154	0.290	0.726	0.425	4.71	0.75	SP
N.º 2	0.256	0.863	2.023	1.800	7.90	1.44	SW
N.º 3	0.101	0.231	0.766	0.350	7.59	0.69	SP-SC

Fuente: elaboración propia.

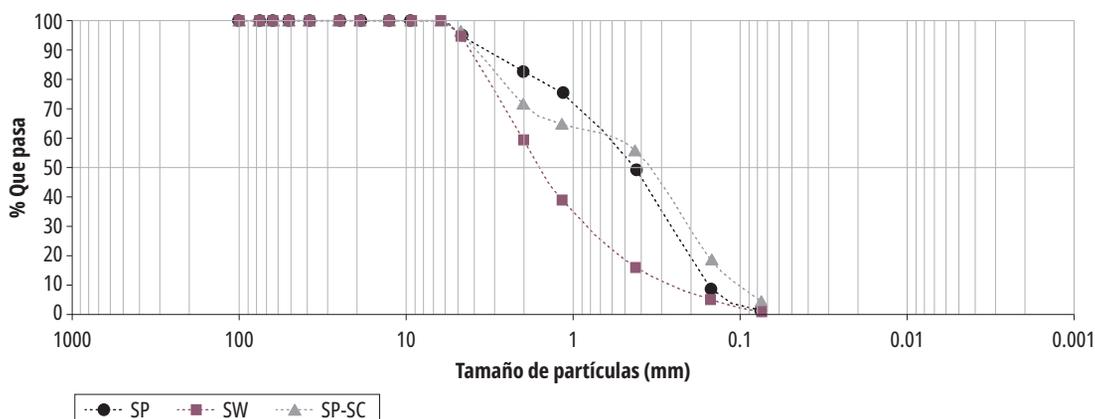


Figura 3. Distribución granulométrica de los materiales empleados en la modelación

Fuente: elaboración propia.

porcentajes de finos que varían entre 1,49 % para el material sw a 5,19 % para el material sp-sc, lo cual indica que esta fracción fina en el río se puede convertir en una carga en suspensión o disuelta, que se transporta y mantiene en el agua por medio de una mezcla turbulenta y en solución; al contrario del porcentaje restante que equivale a una carga de fondo, en donde esta se transporta sobre la superficie del lecho rodando, deslizándose o a saltos a velocidades menores [4].

Este tipo de granulometrías son comunes en ríos de llanura, con cauces ensanchados y poca energía de flujo, típicos de varias zonas del país.

Análisis adimensional

Se realiza un análisis adimensional con el fin de realizar una comparación entre los parámetros, donde se calcula un caudal normalizado a partir del número de Froude con el que se obtiene la ecuación (1).

$$Qn = \frac{Q}{bh^{\frac{3}{2}}\sqrt{g}} \tag{1}$$

Donde:

- Q_n:** caudal normalizado
- Q:** caudal obtenido experimentalmente
- b:** base del canal de laboratorio
- h:** altura del estrato de suelo + lámina de agua
- g:** gravedad

Además, se determina una socavación normalizada (ecuación 2) empleando el diámetro medio de las partículas (D₅₀), del que se obtienen los resultados que se evidencian en la tabla 3.

$$Y = \frac{S}{d_{50}} \tag{2}$$

Donde:

- Y:** socavación normalizada.
- S:** socavación obtenida experimentalmente.
- D₅₀:** diámetro por el que pasa el 50 % de las partículas en milímetros.

Tabla 3. Valores de caudal y socavación normalizada

Suelo	Qn	Y (circular)	Y (cuadrada)
SP	0.00088	56.5	59.4
	0.00061	24.9	12.5
SW	0.00088	6.1	10.9
	0.00061	1.5	2.6
SP-SC	0.00088	46.3	57.4
	0.00061	17.7	13.7

Fuente: elaboración propia.

Análisis estadístico

El análisis de los datos fue hecho de forma numérica en el *software* R, con el fin de determinar las variables que influyen de manera significativa en el proceso de socavación en pilas de puentes.

Inicialmente se realizó el test de Shapiro-Wilk, para verificar la normalidad del conjunto de datos [24], [25] y la prueba de Bartlett, para probar homogeneidad de varianza [26]. Adicionalmente, se aplicaron métodos estadísticos utilizando el programa R: 1) la prueba de Kruskal-Wallis es el equivalente no paramétrico del análisis de varianza (ANOVA) [27], que puede utilizarse para determinar la influencia de los factores en el cambio de una variable respuesta [28], en este caso la socavación, y 2) la prueba de Wilcoxon es una prueba no paramétrica, equivalente a la prueba *t*, que se utiliza para establecer si hay diferencias estadísticamente significativas entre las muestras [29].

El análisis de la varianza es una técnica estadística para analizar la variación de una variable de respuesta (variable aleatoria continua), medida en condiciones definidas por factores discretos (variables de clasificación, a menudo con niveles nominales). Con frecuencia, utilizamos el ANOVA para probar la igualdad entre varios medios, comparando la varianza entre los grupos en relación con la varianza dentro de los grupos [30].

Para el cotejo de más de dos muestras independientes, la prueba de Kruskal-Wallis H es un procedimiento preferido en muchas situaciones [31],

como técnica no paramétrica con la que se analiza la varianza. En otras palabras, analiza si hay una diferencia en los valores medios de tres o más muestras independientes [32].

Resultados y discusiones

En el siguiente apartado se presentan los resultados obtenidos de la modelación física del proceso de socavación en pilas de puentes. Los análisis se realizaron comparando los valores determinados experimentalmente de socavación con las diferentes variables, como forma de la pila, caudal, granulometría, coeficiente de curvatura y coeficiente de uniformidad de cada uno de los tipos de suelos.

En la figura 4 se muestra la influencia del tipo de material en el proceso de socavación variando la forma de la pila (circular - cuadrada) y se obtiene que, al tener una mayor distribución de tamaños de partículas, la socavación es menor [33]. En la figura 4A se advierte que la arena mal gradada (SP) tiene una diferencia en la profundidad de socavación con los demás materiales estudiados (SP-SC) y (SW). Diferentes autores han coincidido con este comportamiento e indican que, cuanto menor sea el diámetro de la partícula, mayor es la profundidad de socavación [33]. Sin embargo, los lechos que contienen arcilla tienden a demorar más la erosión porque sus partículas son difíciles de separar,

como ocurre en la arena mal gradada con arcilla (SP-SC) [4]. Esto se debe a que se genera un proceso de agradación, es decir, de acumulación de materiales finos que no permite socavación en el frente de la pila.

Por otro lado, en los ensayos realizados con la pila cuadrada (figura 4B), se observa que las granulometrías SP-SC y SP no presentan diferencias en los resultados, es decir, no influye el contenido de arcilla, porque los valores de socavación se encuentran dentro de los mismos rangos. Lo contrario sucede al variar la pila a una redondeada, donde sí se presentan cambios en la erosión de estos tipos de materiales. Esto se debe, en términos generales, al hecho de que sobre la cara de la pila cuadrada se concentra mayor energía; según los resultados de investigaciones recientes de Du y Liang [34] y Xiang *et al.* [35], la resistencia del suelo al transporte depende más de su gradación (entramamiento), que del contenido de partículas finas.

Posteriormente, en la figura 5 se cotejan los tres materiales empleados, para determinar la variación de los resultados al tener diferentes caudales y distintas formas de pilas. Varios autores han analizado el efecto del caudal y han hallado que la altura de socavación aumenta cuando este es mayor [18], [33], [36], [37].

En las figuras 5A y 5B, se observa en las granulometrías SP (arena mal gradada) y SP-SC (arena

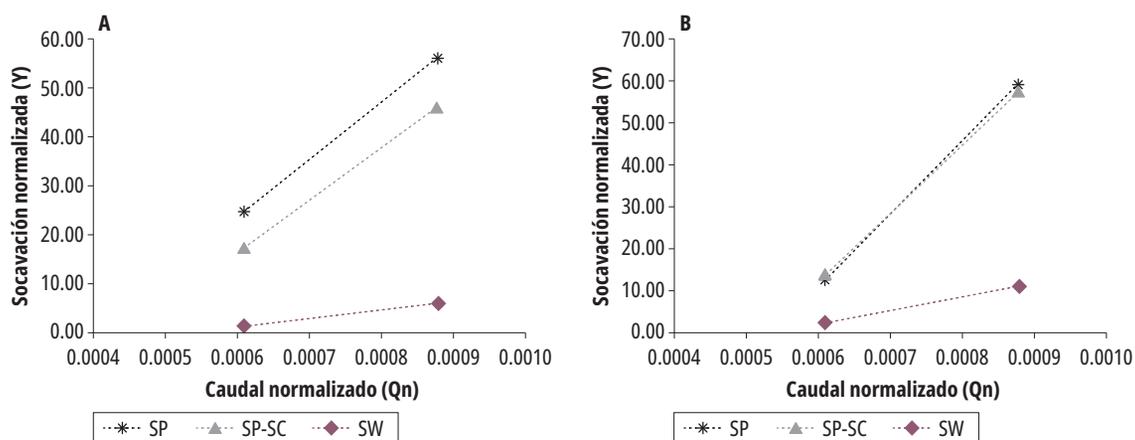


Figura 4. A) Socavación normalizada vs. caudal normalizado para pila circular. B) Socavación normalizada vs. caudal normalizado para pila cuadrada

Fuente: elaboración propia.

mal gradada con arcilla) el aumento de la socavación en la pila circular, con caudales pequeños, mucho más evidente cuando hay ausencia de finos (SP); sin embargo, cuando el caudal aumenta esta es mayor en la pila cuadrada. Adicionalmente, en la figura 5C se concluye que en una arena bien gradada (sw), la socavación es mayor para la pila cuadrada, ya sea con caudales bajos o altos, comparando con los resultados de la pila circular, lo que confirma la fuerte influencia que ejerce la distribución de los tamaños de partículas en la profundidad que alcanza la socavación y la relación igualmente importante que existe entre esta distribución y la forma de la pila. Si la pila no es redondeada o con forma aerodinámica genera más vórtices y líneas de corriente secundarias, debido a los cambios bruscos que experimenta la corriente. Estos obstáculos aportan al desprendimiento de las partículas del fondo del cauce y producen la socavación de la pila [37].

Por otro lado, para analizar la distribución de los tamaños de partículas en una masa de suelo, se usan los coeficientes de curvatura (C_c) y de uniformidad (C_u), los cuales dependen de diámetros característicos (D_{60} , D_{30} y D_{10}), que representan la probabilidad de encontrar un tamaño menor que el mismo en la masa de suelo. El coeficiente de uniformidad es la razón entre el D_{60} y el D_{10} y es un indicativo de la presencia de diferentes tamaños de partículas. El coeficiente de curvatura es una medida del grado de concavidad de la distribución y permite rastrear acumulaciones de tamaños en la muestra. Cuando C_u es alto, la distribución de los tamaños es adecuada (bien gradado) [38] y cuando C_c está en un rango que varía entre 1 y 3, se dice igualmente que el material no tiene acumulaciones de tamaños, y por tanto es bien gradado.

La gradación del suelo está directamente relacionada con su resistencia, pues se desarrolla una mayor cadena de contactos entre partículas y una distribución óptima de los esfuerzos a través de ellas. Asimismo, los parámetros característicos de la distribución granulométrica (C_u y C_c) están relacionados con la resistencia del suelo [39]. Este efecto se confirma con los resultados obtenidos en la figura 6, donde se evidencia que la socavación se reduce en la medida en que aumenta el

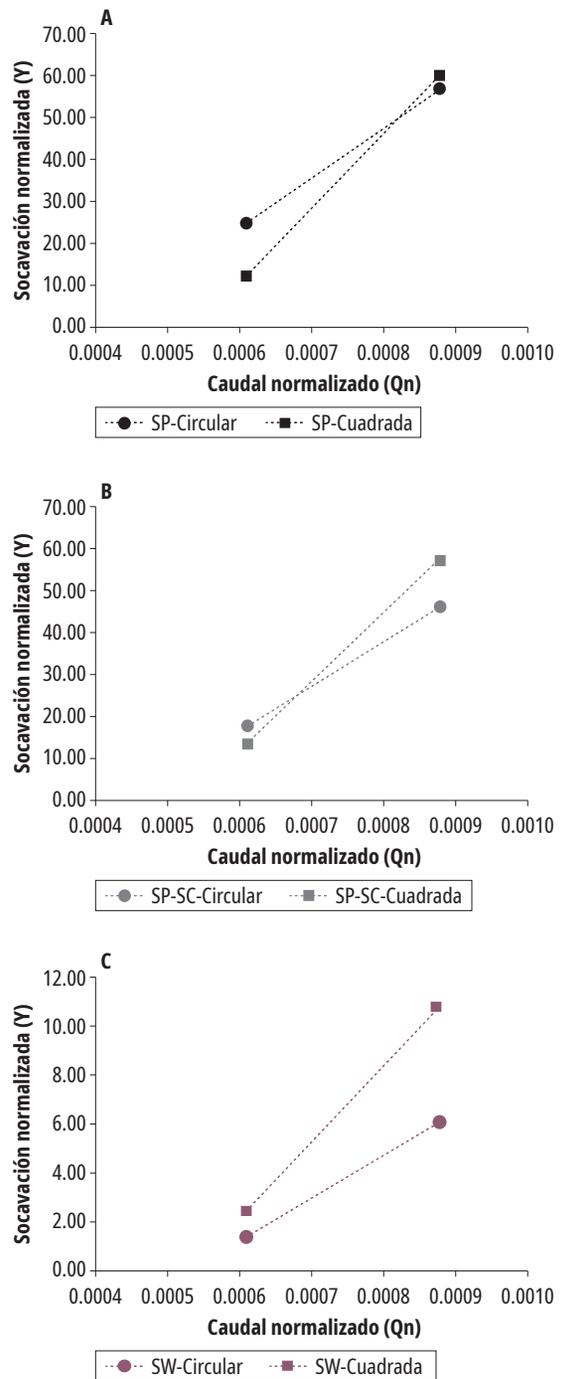


Figura 5. A) Socavación normalizada vs. caudal normalizado para SP. B) Socavación normalizada vs. caudal normalizado para SP-SC. C) Socavación normalizada vs. caudal normalizado para SW

Fuente: elaboración propia.

coeficiente de uniformidad. Esto es mucho más importante cuando el coeficiente toma valores superiores a 7.5. Es claro, también, que la forma

de la pila desempeña un papel importante en la socavación y la relación de esta con el C_u ; pues se observa que en pilas cuadradas para valores de C_u inferiores a 7.5 la influencia de este coeficiente es nula, contrario a lo que se observa en pilas circulares donde la tendencia es siempre decreciente. Estos resultados son consecuentes con lo reportado por Kells *et al.* (2001) [33], quienes obtuvieron una relación inversamente proporcional entre el coeficiente de uniformidad y la socavación.

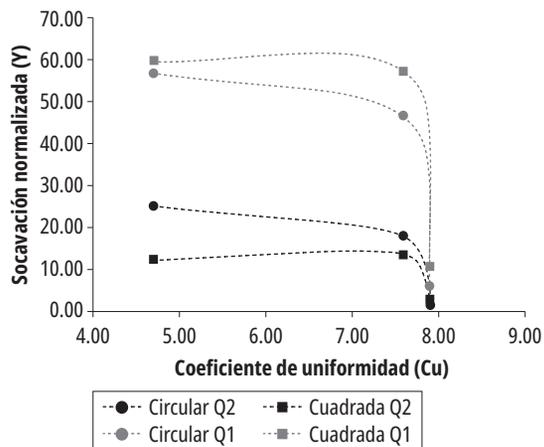


Figura 6. Socavación normalizada vs. coeficiente de uniformidad

Fuente: elaboración propia.

En la figura 7 el resultado es similar, porque se observa que la socavación es inversamente proporcional al coeficiente de curvatura tanto en pilas cuadradas como circulares. La socavación es mayor para la pila cuadrada cuando el caudal es alto; no obstante, cuando el caudal es bajo la socavación es mayor para la pila circular. Es indudable que para valores de C_c inferiores a la unidad (suelos mal gradados), la influencia de la forma de la pila es muy importante en el desarrollo de la socavación, y cuando toma valores superiores a 1.30, el efecto de la forma de pila disminuye y es nulo, incluso, para caudales pequeños.

Para el análisis estadístico se realizan inicialmente pruebas univariadas. La primera es Shapiro-Wilk, que arrojó un p-value: 1.47×10^{-6} lo cual indica, con un 95 % de confianza, que los datos no tienen una distribución normal. Cuando el valor

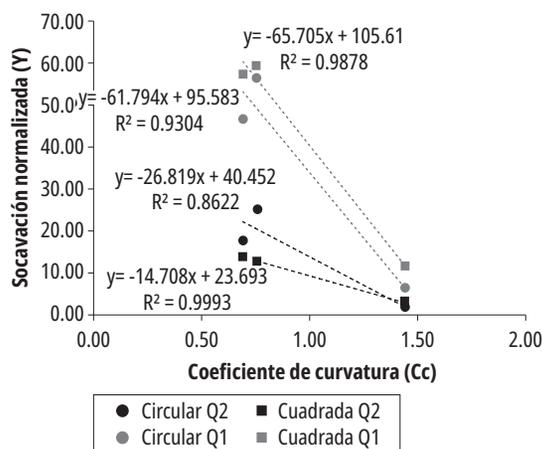


Figura 7. Socavación normalizada vs. coeficiente de curvatura

Fuente: elaboración propia.

de probabilidad es $p\text{-value} < 0.05$ significa que la hipótesis nula es falsa, es decir, que los promedios son diferentes. Lo contrario sucede cuando el $p\text{-value} > 0.05$, significando que la hipótesis nula es cierta. Cuanto más pequeño es el valor de p, más fiable es el resultado del estudio [40]. Adicionalmente, se realizó la prueba de Barlett para demostrar la homogeneidad de varianza entre los resultados experimentales de socavación y las variables: granulometría, forma de la pila y caudal. Los hallazgos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados del valor de probabilidad en la prueba de Barlett

Suelo	Forma de pila	Caudal
p-value	p-value	p-value
0.076	0.223	2.58×10^{-5}

Fuente: elaboración propia.

Con la prueba de Barlett se advierte que no existe homogeneidad de varianza, porque no todas las variables analizadas tuvieron como resultado un $p\text{-value} < 0.05$. Por tal razón, luego de realizar las dos pruebas mencionadas se descarta el análisis de los datos con estadística paramétrica y se comprueba realizando las pruebas de ANOVA y Kruskal-Wallis.

En la figura 8 la socavación aumenta significativamente cuando el material es mal gradado (SP); pero, cuando la arena es mal gradada con arcilla (SP-SC), esta tiene mayor cohesión, lo que dificulta la erosión y la capacidad de arrastre de las partículas localizadas alrededor de la pila. Según la prueba de Wilcoxon, las granulometrías que mayores diferencias tuvieron fueron SP y SW con un p-value: 0.0019, por lo que podemos concluir que al tener una distribución heterogénea de tamaños de partículas menor es el valor de socavación, es decir, una distribución granulométrica extendida protege de la erosión. Por el contrario, la granulometría casi uniforme, como la de una arena fina, aumenta el peligro de erosión [41].

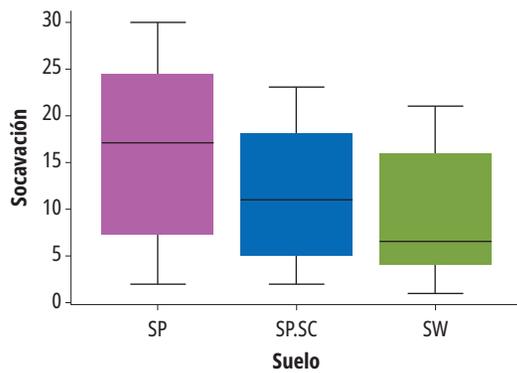


Figura 8. Socavación en mm obtenida con respecto a los tres tipos de materiales analizados

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de socavación presentan diferencias al emplear distintas formas de pilas. Como se evidencia en la figura 9, la pila cuadrada genera mayor socavación; sin embargo, los rangos de confianza tienen similitud. Para afirmar esto con mayor certeza se realiza la prueba de Wilcoxon, donde se obtuvo que no hay diferencias significativas entre la variación de la forma de pilares con un p-value: 0.45. Varios estudios señalan que la forma de las pilas tiene un efecto mínimo en la generación de la socavación [37].

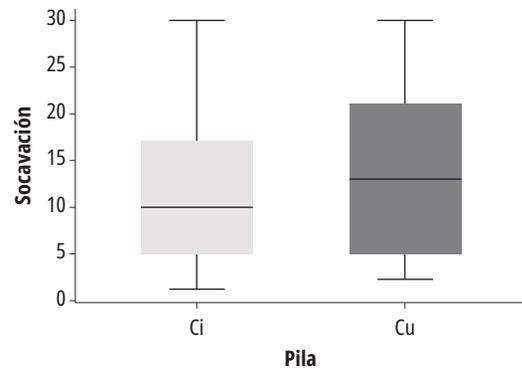


Figura 9. Socavación en mm obtenida con respecto a las formas de pila escogidas para la modelación física

Fuente: elaboración propia.

En la figura 10 se compara el caudal con la socavación obtenida experimentalmente: esta aumenta cuando se presentan caudales altos, es decir, que en épocas de lluvia se puede presentar mayor transporte de sedimentos. Esto lo han corroborado varios investigadores, que afirman que cuando una estructura se diseñó a un periodo de retorno y este se sobrepasa, lo más usual es que el lecho se erosione y provoque inestabilidad en pilas y muelles del puente, ya que con caudales altos y estrechamiento en el ancho hay más energía generando mayores esfuerzos cortantes en el suelo [18], [42],

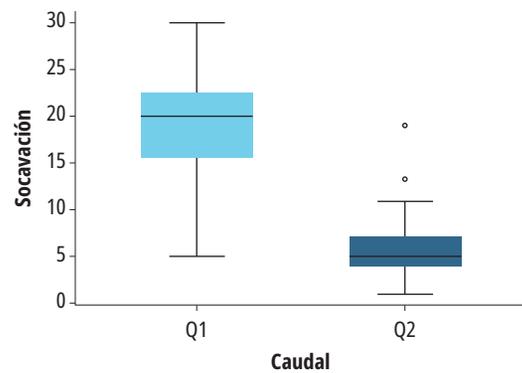


Figura 10. Socavación en mm obtenida con respecto a los caudales escogidos en la modelación física

Fuente: elaboración propia.

[43]. Según la prueba de Wilcoxon, hay diferencias significativas en los resultados al emplear diferentes caudales con un p -value: 2×10^{-16} .

Finalmente, se optó por realizar el análisis por eventos, es decir, con cada uno de los ensayos realizados en la modelación física, con el fin de hacer una comparación global y determinar las variables más influyentes en el proceso de socavación en pila de puentes. Se realizaron doce eventos, tal como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Eventos obtenidos de la modelación física

Evento	Suelo	Pila	Caudal
Evento 1	SW	Circular	1.87×10^{-4}
Evento 2	SW	Circular	1.3×10^{-4}
Evento 3	SW	Cuadrada	1.87×10^{-4}
Evento 4	SW	Cuadrada	1.3×10^{-4}
Evento 5	SP	Circular	1.87×10^{-4}
Evento 6	SP	Circular	1.3×10^{-4}
Evento 7	SP	Cuadrada	1.87×10^{-4}
Evento 8	SP	Cuadrada	1.3×10^{-4}
Evento 9	SP - SC	Circular	1.87×10^{-4}
Evento 10	SP - SC	Circular	1.3×10^{-4}
Evento 11	SP - SC	Cuadrada	1.87×10^{-4}
Evento 12	SP - SC	Cuadrada	1.3×10^{-4}

Fuente: elaboración propia.

En la figura 11 se prueba que existen grandes diferencias entre los distintos eventos, es decir, variables como tipo de material, forma de la pila y caudal, sí influyen de manera importante en este proceso, y se concluye que los eventos 5 y 7 son los que mayor resultado de altura de socavación presentan, pues el caudal es mayor y el material está mal gradado (SP). También se demuestra gráficamente que al tener arenas bien gradadas (SW) se reduce la erosión alrededor de la pila; sin embargo, en arenas mal gradadas con arcilla (SP-SC) se forman estructuras complejas, llamadas agregados, debido a las fuerzas cohesivas o adhesivas [44], [45]. Por esta razón, se posterga un poco la erosión y esta ocurre cuando las fuerzas hidrodinámicas exceden las resistivas (atracción entre partículas) dentro de los suelos [46].

Adicionalmente, se observa que se presentan valores atípicos en los eventos 1, 3, 4, 6 y 8, o sea que existen observaciones que son inconsistentes, alejadas o atípicas, que parecen desviarse notablemente de la mayoría de los datos [47], [48]; estos valores se obtuvieron experimentalmente.

Según la prueba de Wilcoxon, hay cambios notorios entre los eventos. En la tabla 6 se registran los valores de probabilidad entre cada uno de ellos: los datos en color rojo significan que existe similitud, y en color negro, que hay diferencias significativas entre los eventos, es decir, que la variación al realizar las combinaciones entre los parámetros

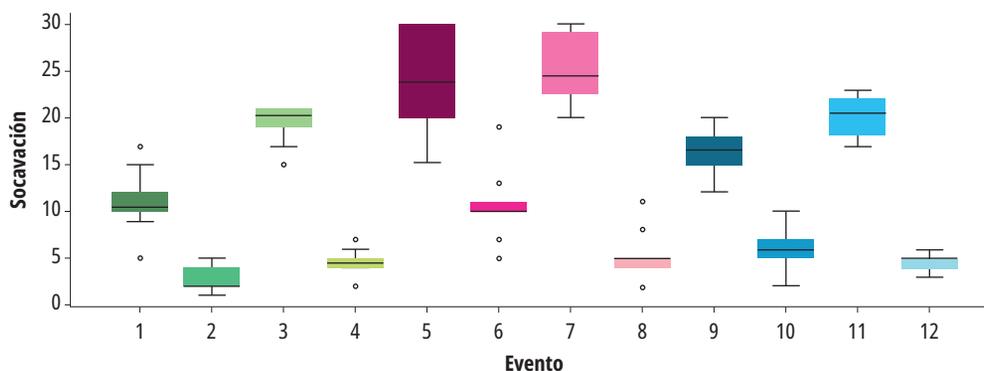


Figura 11. Boxplot de los eventos obtenidos en la modelación física

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Eventos obtenidos de la modelación física

Prueba de Wilcoxon entre eventos											
Eventos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	0.010	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	0.014	0.219	0.100	-	-	-	-	-	-	-	-
5	0.010	0.010	0.357	0.010	-	-	-	-	-	-	-
6	1.000	0.010	0.011	0.014	0.010	-	-	-	-	-	-
7	0.010	0.010	0.079	0.010	1.000	0.010	-	-	-	-	-
8	0.049	0.170	0.010	1.000	0.010	0.066	0.010	-	-	-	-
9	0.057	0.010	0.087	0.010	0.042	0.062	0.010	0.010	-	-	-
10	0.079	0.062	0.010	0.810	0.010	0.089	0.010	1.000	0.010	-	-
11	0.010	0.010	1.000	0.010	0.627	0.014	0.087	0.010	0.077	0.010	-
12	0.015	0.087	0.010	1.000	0.010	0.015	0.010	1.000	0.010	0.889	0.010

Fuente: elaboración propia.

indica que se debe considerar un análisis detallado de las características propias de la zona, como los caudales y el material del lecho a la hora de determinar la forma de la pila.

Conclusiones

Los resultados obtenidos al realizar la variación de la forma de la pila, independientemente del tipo de suelo, permiten concluir que no hay diferencias significativas en los resultados; sin embargo, existe una pequeña discrepancia, dado que es posible obtener más altura de socavación en una pila cuadrada que en una circular, porque estas presentan aristas perpendiculares al sentido del flujo y generan mayor vorticidad en el frente de la pila. Por tanto, se sugieren formas redondeadas.

La distribución del tamaño de las partículas desempeña un papel importante en la susceptibilidad a la socavación local; el análisis de las granulometrías mostró que, al tener una buena gradación, es decir, una arena bien gradada (SW), siempre es menor el valor de erosión alrededor de la pila para cualquier caudal. Igualmente, en materiales mal gradados disminuye la profundidad de socavación; no obstante, un lecho con partículas finas y sin cohesión genera mayor erosión que un material mal gradado, cuando se le adicionan finos. Este

efecto es importante en pilas circulares e irrelevante en pilas cuadradas, encontrando una doble relación entre variables que debe ser analizada cuando se calcula este efecto en el diseño de puentes sobre ríos. De lo anterior, es necesario resaltar que con una arena mal gradada con y sin arcilla, para caudales bajos la socavación es mayor en pilas circulares, y en la medida en que el caudal aumenta, la socavación incrementa en pilas cuadradas para arenas mal gradadas con arcilla (SP-SC). En cambio, el efecto de la forma de la pila tiende a ser poco significativo en arenas mal gradadas (SP).

Las granulometrías se describen en términos de los parámetros característicos de uniformidad (C_u) y curvatura (C_c). En pilas circulares se encontró que en la medida en que aumenta el C_u , la socavación disminuye a una razón baja, hasta que se alcanza un valor de C_u de 7.5, donde se presenta una disminución ostensible de la socavación. En pilas cuadradas, el efecto del aumento del C_u es nulo hasta un valor de 7.5, a partir del cual sí se presenta una disminución en la socavación.

Con respecto al coeficiente de curvatura (C_c), se observa una relación inversamente proporcional con la socavación, tanto para pilas cuadradas como circulares. Se encontró que para valores bajos de C_c (inferiores a 1.0), la influencia de la forma de la pila es importante para cualquier valor de caudal.

Por otro lado, cuando C_c toma valores superiores a 1.30, la influencia de la forma de la pila disminuye e, incluso, es nula para caudales bajos.

La separación por eventos fue importante, porque determinó las diferencias y similitudes, tales como: al presentarse un evento con un suelo mal gradado, una pila cuadrada y un caudal alto, se esperaría un aumento en la altura de socavación, que generaría fallas y posteriores colapsos de las estructuras, pero estos resultados arrojaron valores atípicos en los eventos 1, 3, 4, 6 y 8, que son observaciones incompatibles con el resto del conjunto de datos, lo cual puede corresponder a errores de medición. Por tanto, se recomienda realizar más repeticiones en los ensayos y mayores variaciones de caudales, con el fin de obtener mejores y más representativos resultados. Adicionalmente, la aplicación de estas afirmaciones en el mundo real se debe basar no solo en estudios de socavación, sino en estudios hidráulicos, hidrológicos, geomorfológicos, topográficos y geotécnicos.

El estudio de las variables que influyen en el proceso de socavación es importante para determinar los fenómenos físicos que mayor riesgo generan en la erosión alrededor del obstáculo; en este estudio se determinó que el caudal se encuentra directamente relacionado con las alturas de socavación, es decir, que al tener mayor flujo en un determinado tiempo se puede generar gran afectación en la estructura, ocasionando daños en esta o su posible colapso. Por tal motivo, se puede proponer una barrera para disminuir la altura de socavación que, a su vez, funcionaría para reducir la velocidad al llegar a la pila. Adicionalmente, cuando se presentan grandes variaciones de caudal se recomienda instalar miras en los flujos ambientales, con el fin de controlar de mejor manera la dinámica de los niveles.

Vale la pena aclarar que todos los resultados obtenidos son únicamente comparables con sitios que presenten tales características granulométricas; sin embargo, no son generalizables, porque la variable caudal se empleó únicamente para comparar la diferencia entre un valor alto y bajo.

Para trabajos futuros se pueden considerar otras variables, como esfuerzos cortantes, velocidades del flujo, variación de profundidad de agua

y cambios de pendientes, para realizar un análisis multivariado y determinar otras posibles relaciones entre variables. Además, se pueden emplear distintas barreras o soluciones que funcionen para mitigar el proceso de socavación en pilas de puente.

Referencias

- [1] C. Zhang, X. Zhang, M. Huang y H. Tang, "Responses of caisson-piles foundations to long-term cyclic lateral load and scouring", *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 119, abr. 2019, pp. 62-74, doi: 10.1016/j.soildyn.2018.12.026
- [2] Q. Zhang, X.-L. Zhou y J.-H. Wang, "Numerical Investigation of Local Scour around three Adjacent Piles with different Arrangements Under Current", *Ocean Eng.*, vol. 142, sep. 2017, pp. 625-638, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.07.045
- [3] M. Zaid, Z. Yazdanfar, H. Chowdhury y F. Alam, "A Review on the Methods used to reduce the Scouring Effect of Bridge Pier", *Energy Procedia*, vol. 160, feb. 2019, pp. 45-50, doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.117
- [4] J. Suárez Díaz, *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, 2001.
- [5] A. M. Shirole y R. Holt, "Planning for a Comprehensive Bridge Safety Assurance Program", 1991. / paper/PLANNING-FOR-A-COMPREHENSIVE-BRIDGE-SAFETY-PROGRAM-Shirole-Holt/659745ddb088de0b91c4f5d443655d6f98547a0
- [6] B. W. Melville y S. E. Coleman, *Bridge Scour*. Water Resources Publication, 2000.
- [7] L. J. Prendergast y K. Gavin, "A review of bridge scour monitoring techniques", *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 6, n.º 2, abr. 2014, pp. 138-149, doi: 10.1016/j.jrmge.2014.01.007
- [8] F. Federico, G. Silvagni y F. Volpi, "Scour Vulnerability of River Bridge Piers", *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 129, n.º 10, oct. 2003, pp. 890-899, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:10(890)
- [9] Z. Wang, L. Dueñas-Osorio y J. E. Padgett, "Influence of Scour Effects on the Seismic Response of Reinforced Concrete Bridges", *Eng. Struct.*, vol. 76, oct. 2014, pp. 202-214, doi: 10.1016/j.engstruct.2014.06.026
- [10] F. Liang, H. Zhang y M. Huang, "Influence of Flood-Induced Scour on Dynamic Impedances of Pile Groups Considering the stress History Of Undrained Soft Clay", *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 96, may 2017, pp. 76-88, doi: 10.1016/j.soildyn.2017.02.009
- [11] J. Zhang, K. Wei y S. Qin, "An Efficient Numerical Model for Hydrodynamic Added Mass of Immersed

- Column with Arbitrary Cross - Section”, *Ocean Eng.*, vol. 187, sep. 2019, p. 106-192, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106192
- [12] T. Ochoa, *Hidrología hidráulica y socavación en puentes*, 1a. ed. Bogotá: Ecoe Ediciones, 2017.
- [13] E. M. Laursen y A. Toch, “A Generalized Model Study of Scour Around Bridge Piers and Abutments”, *STATE Univ. IOWA Repr. Eng.*, vol. 120, sep. 1953, pp. 123-31.
- [14] Melville B. W. y Sutherland A. J., “Design Method for Local Scour at Bridge Piers”, *J. Hydraul. Eng.*, vol. 114, n.º 10, oct. 1988, pp. 1210-1226, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:10(1210).
- [15] Melville Bruce W. y Chiew Yee-Meng, “Time Scale for Local Scour at Bridge Piers”, *J. Hydraul. Eng.*, vol. 125, n.º 1, ene. 1999, pp. 59-65, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:1(59).
- [16] R. E. Baker, “Local Scour at Bridge Piers in non-uniform Sediment”, University of Auckland, Auckland, New Zealand, 1986.
- [17] A. H. Cardoso y R. Bettess, “Effects of Time and Channel Geometry on Scour at Bridge Abutments”, *J. Hydraul. Eng.*, vol. 125, n.º 4, abr. 1999, pp. 388-399, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:4(388).
- [18] G. López Méndez, “Erosión local en pilas de puentes”, tesis de doctorado Universidad de La República, Facultad de Ingeniería, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Montevideo, sep. 2013, p. 118.
- [19] P. Jaramillo-Mejía, “Evaluación del efecto de la geometría de pilares en la socavación del cauce”, tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Universidad de Piura, Perú, 2017.
- [20] S. Wang, K. Wei, Z. Shen y Q. Xiang, “Experimental Investigation of Local Scour Protection for Cylindrical Bridge Piers Using Anti-Scour Collars”, *Water*, vol. 11, n.º 7, jul. 2019, p. 1515, doi: 10.3390/w11071515
- [21] D. Flores Paucar, “Influencia de la morfología fluvial en la socavación de estribos del puente las balsas Región Junín en el 2017”, Universidad Nacional del Centro del Perú, 2019.
- [22] P. Arciniegas y V. Javier, “Simulación de un cauce fluvial para el estudio de la influencia de la sección de las pilas de los puentes en procesos de erosión o sedimentación”, Sangolquí / Espe / 2011, 2011.
- [23] O. Baquero, “Ejercicios de tratamiento de agua potable”, Bogotá: Universidad Santo Tomás, 2018.
- [24] J. Jurečková y J. Pícek, “Shapiro-Wilk-type test of normality under nuisance regression and scale”, *Comput. Stat. Data Anal.*, vol. 51, n.º 10, jun. 2007, pp. 5184-5191, doi: 10.1016/j.csda.2006.08.026
- [25] L. A. Gómez Lemos, “Patrones de cambio en la talla de la megafauna bentónica de fondos blandos tropicales: correlativos biológicos y ambientales”, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [26] H. Mendoza, “Diseño Experimental”, [Internet], 2002. Disponible en <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000352/>
- [27] S. L. Galarza-Molina, A. Torres, P. Moura y J. Lara-Borrero, “CRIDE: A Case Study in Multi-Criteria Analysis for Decision-Making Support in Rainwater Harvesting”, *Int. J. Inf. Technol. Decis. Mak.*, vol. 14, n.º 01, ene. 2015, pp. 43-67, doi: 10.1142/S0219622014500862
- [28] P. E. McKnight y J. Najab, “Mann-Whitney U Test”, en *The Corsini Encyclopedia of Psychology*, I. B. Weiner y W. E. Craighead, Eds. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010, p. corpsy0524.
- [29] I. C. Anaene Oyeka y G. U. Ebul, “Modified Wilcoxon Signed-Rank Test”, *Open J. Stat.*, vol. 02, n.º 02, 2012, pp. 172-176, doi: 10.4236/ojs.2012.22019
- [30] M. G. Larson, “Analysis of Variance”, *Circulation*, vol. 117, n.º 1, ene. 2008, pp. 115-121, doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.107.654335
- [31] A. Vargha y H. D. Delaney, “The Kruskal-Wallis Test and Stochastic Homogeneity”, *J. Educ. Behav. Stat.*, vol. 23, n.º 2, jun. 1998, pp. 170-192, doi: 10.3102/10769986023002170
- [32] F. S. Nahm, “Nonparametric statistical tests for the continuous data: the basic concept and the practical use”, *Korean J. Anesthesiol.*, vol. 69, n.º 1, 2016, p. 8, doi: 10.4097/kjae.2016.69.1.8
- [33] J. A. Kells, R. Balachandar y K. P. Hagel, “Effect of grain size on local channel scour below a sluice gate”, *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 28, n.º 3, jun. 2001, pp. 440-451, doi: 10.1139/l01-012
- [34] S. Du y B. Liang, “Comparisons of Local Scouring for Submerged Square and Circular Cross-Section Piles in Steady Currents”, *Water*, vol. 11, n.º 9, ago. 2019, p. 1820, doi: 10.3390/w11091820
- [35] Q. Xiang, K. Wei, F. Qiu, C. Yao y Y. Li, “Experimental Study of Local Scour around Caissons under Unidirectional and Tidal Currents”, *Water*, vol. 12, n.º 3, feb. 2020, p. 640, doi: 10.3390/w12030640
- [36] W.-Y. Chang, J.-S. Lai y C.-L. Yen, “Evolution of Scour Depth at Circular Bridge Piers”, *J. Hydraul. Eng.*, vol. 130, n.º 9, sep. 2004, pp. 905-913, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:9(905)
- [37] C. Ramos y E. H. Enrique, “Estudio de la socavación local en pilas circulares de puentes en lechos no cohesivos con modelación física en laboratorio”, 2018.

- [38] G. Duque Escobar y C. E. Escobar, “Estructura del suelo y granulometría”, [Internet], 2016. Disponible en <http://bdigital.unal.edu.co/53252/17/estructuradelsueloygranulometria.pdf>
- [39] J.-J. Wang, H.-P. Zhang, S.-C. Tang y Y. Liang, “Effects of Particle Size Distribution on Shear Strength of Accumulation Soil”, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 139, n.º 11, nov. 2013, pp. 1994-1997, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000931.
- [40] M. Molina Arias, “¿Qué significa realmente el valor de $p^?$ ”, *Pediatría Aten. Primaria*, vol. 19, n.º 76, dic. 2017, pp. 377-381.
- [41] C. M. Avalos Castro y J. C. Zegarra Tordoya, “Evaluación de la socavación que producirá en pilares y estribos del puente moche, la derivación del caudal de la quebrada San Idelfonso”, Trujillo: Universidad Privada del Norte, 2018.
- [42] D. Flores Paucar, “Influencia de la morfología fluvial en la socavación de estribos del puente las balsas Región Junín en el 2017”, Huancayo, Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2019.
- [43] I. A. Anderson, M. M. Dewoolkar, D. M. Rizzo y D. R. Huston, “Scour Related Vermont Bridge Damage from Tropical Storm Irene”, en *Structures Congress 2014*, Boston, Massachusetts, United States, abr. 2014, pp. 505-515, doi: 10.1061/9780784413357.046
- [44] P. Meakin, “Fractal Aggregates”, *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 28, ene. 1987, pp. 249-331, doi: 10.1016/0001-8686(87)80016-7
- [45] C. Kranenburg, “The Fractal Structure of Cohesive Sediment Aggregates”, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, vol. 39, n.º 5, nov. 1994, pp. 451-460, doi: 10.1006/ecss.1994.1075
- [46] Y. Xu, “Approach to the Erosion Threshold of Cohesive Sediments”, *Ocean Eng.*, vol. 172, ene. 2019, pp. 183-190, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.11.036
- [47] N. J. Carter, N. C. Schwertman y T. L. Kiser, “A Comparison of two Boxplot Methods for Detecting Univariate Outliers which adjust for Sample Size and Asymmetry”, *Stat. Methodol.*, vol. 6, n.º 6, nov. 2009, pp. 604-621, doi: 10.1016/j.stamet.2009.07.001
- [48] J. Majewska, “Identification of Multivariate Outliers – Problems and Challenges of Visualization Methods”, 2015.

