



Universidad Nacional de Cajamarca
Facultad de Ingeniería
Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

Análisis comparativo de la socavación en pilares cilíndricos cimentados en lechos arenosos determinada con las metodologías del Circular de Ingeniería Hidráulica No. 18 (HEC-18) y del Departamento de Transporte de Florida (FDOT)

Tesis para optar al título de: Ingeniero Civil

Autor: Bach. John Michael Pajares Cardozo

Asesor: Ing. Luis Vásquez Ramírez

Cajamarca - 2017

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pag.
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problema	1
1.2 Objetivos	2
a. Objetivo General	2
b. Objetivos Específicos	3
1.3 Justificación de la investigación	3
CAPITULO II. MARCO TEORICO	4
2.1 Hidrología	4
2.2 Pilares de puentes	5
2.3 Estadísticas sobre fallas en puentes	7
2.4 Socavación	7
a. Tipos de socavación	8
b. Formas de socavación	9
2.5 Ecuaciones para el cálculo de socavación en pilares	10
a. Ecuación del HEC-18 para el cálculo de socavación en pilares	10
b. Ecuación del Departamento de Transporte de Florida (FDOT) para el cálculo de socavación en pilares	14
2.6 Parámetro estadísticos para comparar dos muestras	17
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS	19
3.1 Metodología del HEC-18 para el cálculo de socavación en pilares	19
3.2 Metodología del FDOT para el cálculo de socavación en pilares	19
3.3 Parámetros estadísticos para comparación de dos muestras	20
3.4 Análisis comparativo	20
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
4.1 Muestras de campo recopiladas en la Base de Datos de Socavación en Pilares de 2014 del USGS	21
4.2 Influencia de la Velocidad Crítica (V_c)	34

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	37
5.1 Conclusiones	37
5.2 Recomendaciones	41
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Pilar de columnas múltiples construido sobre tierra	6
Figura 2. Pilar tipo pared construido en zona marítima	6
Figura 3. Colapso de un puente debido a la socavación local en sus pilares (Bianco 1998)	8
Figura 4. Esquema de las variables que intervienen en la ecuación del HEC-18	11
Figura 5. Gráfica de la socavación generada en un pilar	11
Figura 6. Formas más usuales de tajamares (narices) de pilares	12
Figura 7. Ángulo (θ) de ataque del flujo	12
Figura 8. Esquema de las variables que intervienen en la ecuación del FDOT	15
Figura 9. Comparación entre las socavaciones observadas y las determinadas teóricamente	33
Figura 10. Resultados de dividir las socavaciones determinadas teóricamente entre sus respectivas socavaciones observadas	33
Figura 11. Muestras de donde la ecuación del HEC-18 da mejores resultados que la del FDOT	36
Figura 12. Comparación entre las socavaciones observadas y las determinadas teóricamente	37
Figura 13. Resultados de dividir las socavaciones determinadas teóricamente entre sus respectivas socavaciones observadas	38
Figura 14. Muestras donde HEC-18 dio mejores resultados que los dados por FDOT	39

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Cuadro 1. Factor de corrección K_1 , por forma de nariz del pilar	13
Cuadro 2. Factor de corrección, K_2 , por ángulo de ataque respecto al flujo	13
Cuadro 3. Factor de corrección K_3 , por condiciones de lecho	14
Cuadro 4. Muestras de campo analizadas	21
Cuadro 5. Resumen de las 146 muestras de campo analizadas	25
Cuadro 6. Profundidades de socavación determinadas mediante las ecuaciones de HEC-18 y FDOT	26
Cuadro 7. Error porcentual de las socavaciones calculadas mediante las metodologías del FDOT y del HEC-18 para cada una de las muestras de campo	30
Cuadro 8. Porcentaje de muestras que caen dentro y fuera del rango visto	34
Cuadro 9. Muestras donde el HEC-18 presenta mejores resultados que el FDOT	34
Cuadro 10. Resumen de los resultados obtenidos de las muestras de campo	37
Cuadro 11. Factor de corrección K_3 , por condiciones de lecho	40

Resumen

El objeto de la presente tesis fue determinar cuál de las metodologías entre la propuesta por el Departamento de Transporte de Florida (FDOT) y la propuesta por el Circular de Ingeniería Hidráulica No. 18 (HEC-18) es más precisa para calcular la profundidad máxima de socavación en pilares circulares de puentes emplazados sobre lechos arenosos. Para dicho fin se hizo el análisis de 146 muestras de campo, recopiladas en la Base de Datos de Socavación en Pilares de 2014 del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), pertenecientes a puentes ubicados en Estados Unidos, Canadá y Serbia. Siendo la conclusión principal que para la mayoría de casos la metodología del FDOT fue la que dio mejores resultados de cálculo de socavación, sobre todo para aquellos casos donde la velocidad del flujo era distinta del rango comprendido entre 0.65 y 1.50 respecto de la velocidad crítica; no obstante, para aquellos casos comprendidos dentro de aquel rango, fue la metodología del HEC-18 la que mejores resultados arrojó. Por lo que finalmente se propone una metodología que es resulta de considerar las conclusiones a las que se llegó con el presente trabajo de investigación.

Palabras clave: Socavación en pilares, lecho arenoso, hidráulica

Abstract

The purpose of this thesis was to determine if the methodology of the Florida Department of Transportation (FDOT) gave better approximations than the methodology of Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18) about calculating maximum depth scouring around circular piers on sandy beds. To reach this target, a comparative analysis was made using 146 field data collected by the United States Geological Survey (USGS) about bridges located in the United States, Canada and Serbia. The main conclusion being that for most cases the FDOT methodology was the one that gave better approximations of calculation of scour, especially when flow velocities were outside the range between 0.65 and 1.50 of the critical velocity; however, for those within that range, the HEC-18 methodology was the one that gave the best results when calculating the maximum depth of scour around a circular pier located on a sandy bed; thus finally a methodology is proposed resulting from the unification of the methodologies compared taking into consideration the observed range.

Key words: Pier scour, sandy bed, hydraulic

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

Nuestro país, por su ubicación geográfica, se ve afectado periódicamente por el Niño el cual se manifiesta con precipitaciones máximas extraordinarias, que a su vez ocasionan que muchos ríos en el Perú aumenten de forma considerable sus caudales. Uno de los principales problemas que ocasiona el aumento de los caudales de los ríos es la erosión hídrica alrededor de los cimientos de los diversos puentes emplazados sobre dichos ríos; dicha erosión hídrica es conocida en ingeniería como socavación. Los puentes principalmente están afectados por la socavación en sus estribos y en sus pilares; en el presente trabajo de investigación se verá el caso de la socavación alrededor de pilares. El conocimiento de la socavación alrededor de pilares es de gran importancia para poder determinar la profundidad de cimentación de éstos; puesto que, si estos pilares no han sido cimentados a una profundidad adecuada, la socavación alrededores de estos puede producir el colapso del puente; ocasionando a su vez malestar social y económico debido a la interrupción del transporte tanto de pasajeros como de carga.

Actualmente se dispone de muchas metodologías para determinar la socavación en pilares; dos de las mejor desarrolladas son la metodología del HEC-18 y la metodología del FDOT. No obstante, surge así la necesidad de conocer de cuál de estas metodologías se obtiene mejores resultados al momento de realizar el cálculo de socavación en pilares, siendo el caso visto en la presente tesis el referido a la socavación en pilares circulares cimentados sobre lechos arenosos. Para lograr dicho objetivo se ha analizado la profundidad máxima de socavación de 146 muestras de campo, recopiladas en la Base de Datos de Socavación en Pilares de 2014 del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), pertenecientes a puentes ubicados en los Estados Unidos, Canadá y Serbia; dichas muestras fueron tomadas entre junio de 1966 y marzo de 2007.

1.1 Problema

El Perú es un país muy diverso geográficamente, este cuenta con tres regiones naturales diferenciadas; la costa, la sierra y la selva. Siendo la sierra determinada por la más grande cadena montañosa de América, la Cordillera de los Andes; eso hace que en nuestro país exista una gran cantidad de corrientes de agua tales como ríos y quebradas, sobre los cuales se deben construir puentes para poder salvar dichos accidentes geográficos, lo cual permite una mayor interconexión entre la ciudades y regiones que conforman nuestro país, lo cual permite que el Perú puede desarrollarse tanto económicamente como

socialmente. De acuerdo a estadísticas del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), en 2011 la Red Vial Nacional contaba con más de 2300 puentes; con lo cual se observa la gran importancia que tienen este tipo de estructuras en nuestra realidad. Uno de los componentes principales que puede conformar un puente son los pilares, estas son las columnas centrales que soportan a esta estructura, dichos componentes puede ser opcional en aquellos casos donde el puente tenga una luz pequeña, pero es de uso prácticamente obligatorio en aquellos de grandes luces. Uno de los más grandes problemas a los cuales se ven expuesto los pilares es la erosión del lecho que produce el flujo del agua alrededor de estos, los cuales si no han sido cimentados a una profundidad adecuada pueden asentarse y por lo tanto ocasionar el colapso del puente al que sirven; dicho fenómeno erosivo es denominado socavación.

Actualmente se dispone de muchos métodos para determinar la socavación que se genera alrededor de los pilares de un puente; de acuerdo a la quinta edición del Manual de Evaluación de Socavación en Puentes de la Administración Federal de Carreteras (FHWA), dos de los métodos mejor desarrollados para calcular la socavación alrededor de pilares son el propuesto por el HEC-18 y el propuesto por el FDOT; siendo además este último sugerido en el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC 2011). No obstante, surge así la necesidad de conocer cuál de estos métodos es el que mejores resultados da al momento de ser empleado; lo que sería de gran utilidad a los ingenieros proyectistas de puentes para que así éstos puedan contar con mejores criterios de diseño para el planteamiento de la profundidad de cimentación que deban tener los pilares de los puentes al momento de ser diseñados. En la presente tesis se ha hecho el análisis comparativo, de dichos métodos de cálculo de socavación, para el caso de pilares circulares de puentes cimentados sobre lechos arenosos.

1.2 Objetivos

a. Objetivo General

Determinar cuál de las metodologías, entre la propuesta por el HEC-18 y la propuesta por el FDOT, da mejores resultados para determinar la profundidad de socavación en pilares circulares de puentes emplazados sobre lechos arenosos.

b. Objetivos Específicos

- Determinar la profundidad de socavación mediante la metodología del HEC-18 de 146 muestras de campo recopiladas en la Base de Datos de Socavación en Pilares de 2014 del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), correspondientes a pilares circulares cimentados sobre lechos arenosos.
- Determinar la profundidad de socavación mediante la metodología del FDOT de 146 muestras de campo recopiladas en la Base de Datos de Socavación en Pilares de 2014 del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), correspondientes a pilares circulares cimentados sobre lechos arenosos.
- Comparar analíticamente los resultados de socavación obtenidos teóricamente con las dos metodologías vistas, con los respectivos resultados de socavación real vistos en campo.
- Determinar y explicar cuál de las metodologías comparadas es mejor para calcular la socavación alrededor de pilares circulares cimentados sobre lechos arenosos

1.3 Justificación de la investigación

La importancia de la siguiente investigación radica en el hecho de que en ingeniería se busca siempre optimizar los recursos con los que se dispone, haciendo estructuras seguras pero a la vez económicas; tomando en cuenta dicho principio, con la presente tesis se ha buscado comparar dos de las metodologías mejor desarrolladas para el cálculo de socavación en pilares; siendo el caso visto en el presente trabajo de investigación el referido a los pilares circulares emplazados sobre lechos arenosos. Dichas metodologías a comparar son la del HEC-18 y la del FDOT; buscando determinar cuál es la que mejores resultados da. Con lo cual se busca poder otorgarles a los ingenieros proyectistas más información para poder complementar mejor los criterios de diseño que estos consideran al momento de determinar la profundidad de cimentación que deben tener los pilares de un puente.

CAPITULO II. MARCO TEORICO

2.1 Hidrología

La hidrología es una rama de las ciencias de la Tierra que estudia el agua, su ocurrencia, distribución, circulación, y propiedades físicas, químicas y mecánicas en los océanos, atmósfera y superficie terrestre. Esto incluye las precipitaciones, la escorrentía, la humedad del suelo, la evapotranspiración y el equilibrio de las masas glaciares.

La circulación de las masas de agua en el planeta son responsables del modelado de la corteza terrestre, como queda de manifiesto en el ciclo geográfico. Esa influencia se manifiesta en función de la distribución de las masas de rocas coherentes y deleznales, y de las deformaciones que las han afectado, y son fundamentales en la definición de los diferentes relieves.

Recordemos que un río es una corriente de agua que fluye por un cauce desde las tierras altas a las tierras bajas y vierte en el mar o en una región endorreica (río colector) o a otro río (afluente). Los ríos se organizan en redes. Una cuenca hidrográfica es el área total que vierte sus aguas de escorrentía a un único río, aguas que dependen de las características de la alimentación. Una cuenca de drenaje es la parte de la superficie terrestre que es drenada por un sistema fluvial unitario. Su perímetro queda delimitado por la divisoria o divortium.

El estudio hidrológico, inicia con el análisis morfométrico de la cuenca, que incluye: la delimitación de la cuenca, la medición del área y la longitud, altura máxima y mínima, índice de compacidad, factor de forma, curva hipsométrica, pendiente media, caracterización de la red de drenaje y el perfil altimétrico del cauce principal, entre otros.

La hidrología tiene un papel muy importante en el planeamiento del uso de los Recursos Hidráulicos. Los estudios hidrológicos son fundamentales para:

- El diseño de obras hidráulicas, para efectuar estos estudios se utilizan frecuentemente modelos matemáticos que representan el comportamiento de toda la cuenca sustentada por la obra en análisis.
- La operación optimizada del uso de los recursos hídricos en un sistema complejo de obras hidráulicas, sobre todo si son de usos múltiples. En este caso se utilizan generalmente modelos matemáticos conceptuales, y se procesan en tiempo real.

- El correcto conocimiento del comportamiento hidrológico de como un río, arroyo, o de un lago es fundamental para poder establecer las áreas vulnerables a los eventos hidrometeorológicos extremos.
- Prever un correcto diseño de infraestructura vial, como caminos, carreteras, ferrocarriles, etc.

Todo esto y muchas aplicaciones más hacen que el hidrólogo sea un personaje importante en todo equipo multidisciplinar que enfrenta problemas de ingeniería civil en general y problemas de carácter ambiental (Aparicio-Mijares 1989).

2.2 Pilares de puentes

Los pilares de un puente tienen como función transmitir las cargas horizontales y verticales hacia la cimentación, reciben la acción de dos tramos continuos del tablero, de tal forma que no excedan al esfuerzo admisible del terreno. Además, para causar la menor perturbación posible al paso del agua, su forma generalmente empleada es rectangular con triángulos o segmentos de círculo en los extremos en dirección a la corriente del río, oponiéndose y favoreciéndola respectivamente, aguas arriba y aguas abajo, estos extremos frontales a la dirección de la corriente reciben el nombre de “tajamares”, y tienen por objeto hacer al pilar más hidrodinámico. La ventaja de hacer iguales los tajamares consiste en que la cimentación se hace simétrica con las cargas verticales del pilar. Es importante tomar en cuenta en la cimentación de los pilares de puentes, el efecto de socavación debida a la acción erosiva del agua. Entre los materiales más utilizados en la construcción de pilares está el concreto, hierro, madera, mampostería y combinaciones de los anteriores. Actualmente, se está haciendo más común diseñar los pilares para resistir altas cargas laterales causadas por eventos sísmicos, y desde el punto de vista estético, los pilares son uno de los componentes más visibles y pueden representar la diferencia entre una estructura agradable y una poco atractiva.¹

Las fuerzas que soporta cualquier pilar son:

- Fuerzas verticales: Carga muerta de la superestructura; carga móvil de la superestructura; peso propio del pilar arriba del plano considerado; carga por impacto.
- Fuerzas laterales: Presión debida al viento sobre la superestructura; presión debido al viento sobre el pilar; presión de hielo (si hay); presión debida al agua.
- Fuerzas longitudinales: Frenaje; presión de viento (generalmente despreciable).¹

¹Aquino Vásquez, DA. 2004. Manual de Construcción de Puentes de Concreto



Figura 1. Pilar de columnas múltiples construido sobre tierra.¹



Figura 2. Pilar tipo pared construido en zona marítima.¹

Los tipos de pilares se establecen de acuerdo con la conectividad estructural que tienen con el tablero, su forma y su configuración de marco. Según su conectividad con el tablero, se clasifican en monolíticas o en voladizo, según la forma se clasifican en sólida o hueca; redonda, octogonal, hexagonal, o rectangular y según su configuración de marco se tipifican en columna simple, cabeza de martillo, marco de múltiples columnas (Figura 1) y tipo pared (Figura 2). La selección del tipo de pilar está basada en los requisitos funcionales, estructurales, geométricos y estéticos y depende de muchos factores como el tipo de tablero; por ejemplo, los tableros de acero son normalmente soportados por pilares en voladizo, mientras que los tableros de concreto vaciados in situ, son soportados por marcos monolíticos. Otro factor a considerar es, si está sobre un canal o no; así por ejemplo, los pilares tipo pared son preferibles en cauces de ríos, ya que permiten construirse en proporciones delgadas e hidrodinámicas, mientras que los pilares marco de columnas son utilizados en puentes carreteros. La altura de los pilares es otro factor a

¹Aquino Vásquez, DA. 2004. Manual de Construcción de Puentes de Concreto

considerar para su selección ya que los más altos a menudo requieren secciones transversales huecas para reducir el peso de los mismos.¹

2.3 Estadísticas sobre fallas en puentes:

En un estudio estadístico llevado a cabo por DW Smith en 1976 titulado “Fallas en Puentes”, sobre las principales causas de falla o colapso de 143 puentes alrededor del mundo, concluyó que:

- 1 fallo debido a la corrosión
- 4 a la fatiga de los materiales
- 4 al viento
- 5 a un diseño estructural inadecuado
- 11 a terremotos
- 12 a un procedimiento inadecuado de construcción
- 14 fallaron por sobrecarga o impacto de embarcaciones
- 22 por materiales defectuosos y finalmente
- 70 fallaron debido a crecidas (de los cuales 66 fueron debido a la socavación, 46 % del total)

Demostrando que los aspectos hidráulicos son fundamentales en los puentes; un buen conocimiento de estos aspectos lograrían un puente más seguro (Smith 1976).

2.4 Socavación

Se denomina socavación a la excavación profunda causada por el agua (uno los tipos de erosión hídrica). Puede deberse al embate de las olas contra un acantilado, a los remolinos del agua y al roce con las márgenes de las corrientes que han sido desviadas por los lechos sinuosos.

En este último caso es más rápida en la primera fase de las avenidas. La socavación provoca el retroceso de las cascadas y de los acantilados que, al ser privados e apoyo en su base, se van desplomando progresivamente.²

¹Aquino Vásquez, DA. 2004. Manual de Construcción de Puentes de Concreto

²Obras Fluviales – Cátedra de Obras Hidráulicas de la Universidad Nacional de Córdoba (Argentina)



Figura 3. Colapso de un puente debido a la socavación local en sus pilares (Bianco 1998).

a. Tipos de socavación:

De acuerdo al Manual de Puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones de 2016 en la zona del río donde se ubicará el puente se deberá tener en cuenta tres tipos de socavación: general, por contracción y local. Ya que dicha información es de gran importancia para poder diseñar la cimentación que tendrán tanto los pilares como los estribos. Y para el caso de se empleen cimentaciones superficiales, el fondo de ésta deberá estar por debajo de la profundidad de socavación máxima calculada, estimado en por lo menos 1.00 m. Los tipos de socavación son:

- Socavación general: La socavación general es un fenómeno de largo plazo, que podríamos llamar natural, se suele dar principalmente en la parte alta de las cuencas hidrográficas, donde la pendiente de los ríos suele ser elevada. Como consecuencia, la velocidad del agua y la capacidad de arrastre de la corriente son altas. En la medida que el flujo arrastra más material, el flujo alcanza rápidamente su capacidad potencial de arrastre. En ese punto ya no se produce socavación, la sección, márgenes y fondo son estables. A medida que se avanza en el curso del río o arroyo, la pendiente disminuye, consecuentemente disminuye la velocidad, y la corriente deposita el material que transportaba.²
- Socavación por contracción. La socavación por contracción es causada principalmente por la disminución del ancho del flujo ya sea por causas naturales o artificiales. La causa más común de socavación por contracción es la reducción de la sección del flujo por los terraplenes de acceso al puente y en menor grado por las pilas que bloquean parte de la sección recta. Una disminución en la sección mojada implica aumento de la velocidad media del agua y del esfuerzo cortante. Por lo tanto, representa aumento

²Obras Fluviales – Cátedra de Obras Hidráulicas de la Universidad Nacional de Córdoba (Argentina)

en las fuerzas erosivas en la contracción ocasionando que la cantidad de material del lecho que es removido supere al que es transportado hacia el sitio.

El aumento en velocidad produce el incremento en el transporte de material haciendo que el nivel del lecho descienda, que la sección mojada aumente, por lo que la velocidad y el esfuerzo cortante nuevamente disminuyen, haciendo que el equilibrio del río se vaya restableciendo con el tiempo. Esta situación de equilibrio se da cuando el material que es removido es igual al material que es transportado hasta el sitio en consideración. Otros factores que causan socavación por contracción son:

- Contracciones naturales de la corriente.
 - Zonas de aproximación al puente que obstruyen las planicies de inundación.
 - Islas o barras de sedimentos en el puente, aguas arriba o aguas abajo.
 - Acumulación de basuras o hielo.
 - Crecimiento de vegetación en el cauce, en las bancas, o en la zona de inundación.
 - Flujo a presión en el puente (Guevara 2003).
- Socavación local: Los casos más típicos de socavación local son:
 - Al pie de un talud, lo que podrá provocar su derrumbe, si no se toman medidas.
 - En los pilares o estribos de un puente, pudiendo provocar el colapso del mismo.
 - Inmediatamente aguas abajo de un embalse. En efecto, el embalse retiene casi la totalidad del transporte sólido del río, así, el agua que es descargada aguas abajo de la represa está casi totalmente libre de sedimentos, teniendo por lo tanto una capacidad de socavación considerable.²

b. Formas de socavación:

Dos formas de socavación se presentan en un cauce según haya o no, movimiento de sedimentos aguas arriba, y son: socavación en lecho móvil y socavación en agua clara.

- Socavación en lecho móvil: Se presenta cuando hay transporte de sedimentos del lecho desde aguas arriba hasta el sitio de emplazamiento del puente y por lo tanto parte de este sedimento queda atrapado en la fosa de socavación. En este caso, la socavación alcanza el equilibrio cuando la cantidad de material que es transportado iguala la cantidad de material que es removido. Se le conoce también como socavación en lecho vivo (Guevara 2003). La FDOT (2011) propone una ecuación para calcular la velocidad crítica, la cual depende del diámetro medio del lecho y de la profundidad

²Obras Fluviales – Cátedra de Obras Hidráulicas de la Universidad Nacional de Córdoba (Argentina)

del flujo; si esta velocidad es menor que la velocidad de flujo entonces existirá este tipo de socavación.

- Socavación en agua clara: Se presenta cuando no hay transporte de sedimentos del lecho desde aguas arriba al sitio de emplazamiento del puente y por lo tanto no hay reabastecimiento de la fosa socavada. En este caso, la socavación alcanza equilibrio cuando el esfuerzo cortante en el lecho es menor que el requerido para el inicio del movimiento de las partículas, o sea cuando el flujo no puede remover más partículas de la fosa formada (Guevara 2003). Si la velocidad crítica es mayor a la velocidad de flujo entonces se dice que existirá este tipo de socavación (Arneson et. al 2012).

2.5 Ecuaciones para el cálculo de socavación en pilares

Se verán las dos metodologías recomendadas en la quinta edición del documento titulado Evaluación de Socavación en Puentes (más conocido como HEC-18) publicado en 2012, para hacer el cálculo de socavación en pilares. La primera es la propuesta propiamente por el HEC-18 y la segunda es la propuesta por el Departamento de Transporte de Florida (FDOT).

a. Ecuación del HEC-18 para el cálculo de socavación en pilares

Esta metodología (basada en la ecuación para cálculo de socavación en pilares de la Universidad Estatal de Colorado) es recomendada tanto para socavación en agua clara como en lecho móvil. Y en su forma básica predice la profundidad máxima de socavación en pilares emplazados sobre lechos arenosos con diámetro medio (D_{50}) menor a 20 mm.

Las variables que componen a esta metodología son las siguientes:

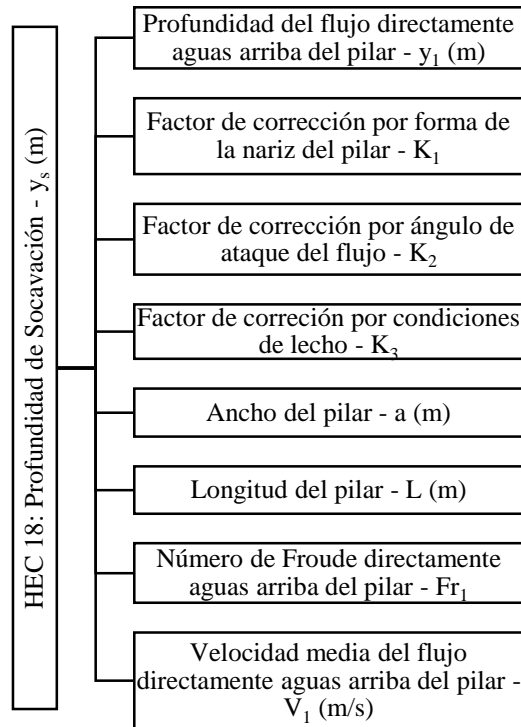


Figura 4. Esquema de las variables que intervienen en la metodología del HEC-18.

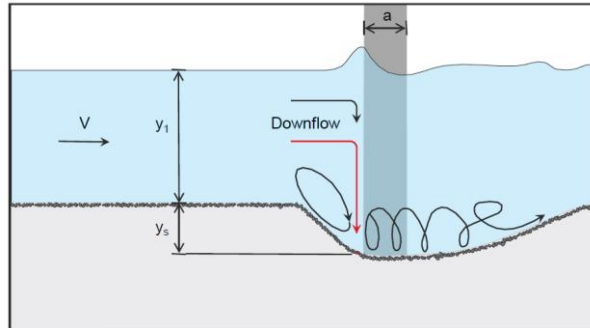


Figura 5. Gráfica de la socavación generada en un pilar.

La ecuación de HEC-18 es:

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0 K_1 K_2 K_3 \left(\frac{a}{y_1}\right)^{0.65} Fr_1^{0.43} \quad (1)$$

La socavación máxima en pilares con nariz redondeada y alineado en dirección al flujo es:

$$y_s \leq 2.4 \text{ veces el ancho del pilar} \quad \text{para} \quad Fr \leq 0.8 \quad (2)$$

$$y_s \leq 3.0 \text{ veces el ancho del pilar} \quad \text{para} \quad Fr > 0.8$$

En término de y_s/a , la ecuación 1 tiene la forma:

$$\frac{y_s}{a} = 2.0 K_1 K_2 K_3 \left(\frac{y_1}{a}\right)^{0.35} Fr_1^{0.43} \quad (3)$$

Donde:

y_s = profundidad de socavación (m)

y_1 = profundidad de flujo inmediatamente aguas arriba del pilar (m)

K_1 = factor de corrección por forma de nariz del pilar. Figura 6 y Cuadro 1

K_2 = factor de corrección por ángulo de ataque de flujo. Figura 7, Ecuación 4 y Cuadro 2

K_3 = factor de corrección por condiciones del lecho del río. Cuadro 3

a = ancho del pilar (m)

L = longitud del pilar (m)

Fr_1 = número de Froude inmediatamente aguas arriba del pilar = $V_1/(gy_1)^{1/2}$

V_1 = velocidad media de flujo inmediatamente aguas arriba del pilar (m/s)

g = aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

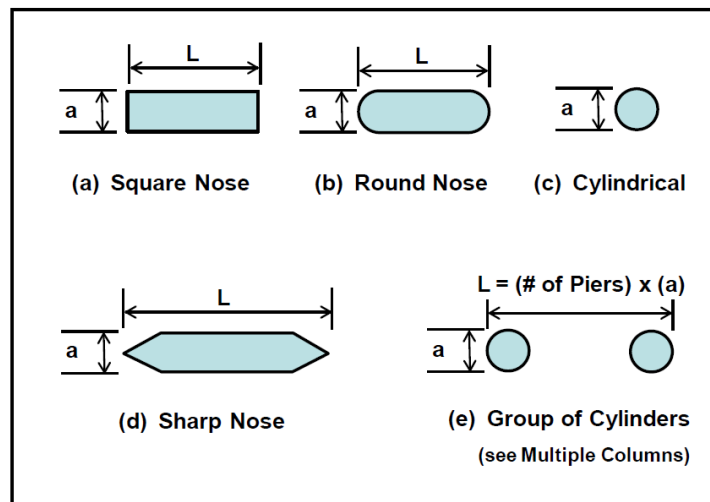


Figura 6. Formas más usuales de tajamares (narices) de pilares.

(a): Nariz cuadrada

(b): Nariz redondeada

(c): Cilíndrico

(d): Nariz aguda

(e): Grupo de cilindros (columnas múltiples)

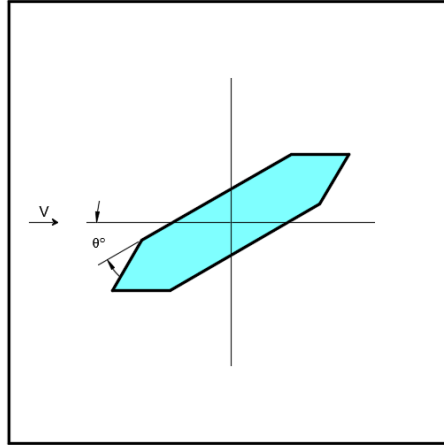


Figura 7. Ángulo (θ) de ataque del flujo.

El factor de corrección, K_2 , por ángulo de ataque del flujo, es calculado utilizando la siguiente ecuación:

$$K_2 = \left(\cos \theta + \frac{L}{a} \sin \theta \right)^{0.65} \quad (4)$$

Si L/a es mayor a 12, entonces se tomará un $L/a = 12$ como máximo (Arneson et. al 2012).

Cuadro 1. Factor de corrección K_1 , por forma de nariz del pilar

Factor de corrección K_1	
(a): Nariz cuadrada	1.1
(b): Nariz redondeada	1.0
(c): Cilíndrico	1.0
(d): Nariz aguda	0.9
(e): Grupo de cilindros	1.0

Cuadro 2. Factor de corrección, K_2 , por ángulo de ataque respecto al flujo

Factor de corrección K_2			
Ángulo θ	$L/a = 4$	$L/a = 8$	$L/a = 12$
0	1.0	1.0	1.0
15	1.5	2.0	2.5
30	2.0	2.8	3.5
45	2.3	3.3	4.3
90	2.5	3.9	5.0
Ángulo θ respecto del flujo L: longitud del pilar			

Cuadro 3. Factor de corrección K₃, por condiciones de lecho

Factor de corrección K ₃		
Condiciones de lecho	Altura de duna (m)	K ₃
Socavación en agua clara	N/A	1.1
Lecho plano	N/A	1.1
Dunas pequeñas	$3 > H \geq 0.6$	1.1
Dunas medias	$9 > H \geq 3$	1.1 a 1.2
Dunas grandes	$H \geq 9$	1.3

b. Ecuación del Departamento de Transporte de Florida (FDOT) para el cálculo de socavación en pilares:

Un estudio llevado a cabo en 2011 por el Programa de Investigación en Carreteras de la Cooperativa Nacional de los Estados Unidos (NCHRP) hizo algunas modificaciones a la ecuación de Sheppard y Miller para obtener mejores resultados al utilizar ésta; al igual que la ecuación del HEC-18, la ecuación de la NCHRP incluye velocidad de flujo, profundidad, ángulo de ataque del flujo, forma y geometría del pilar, pero también tamaño de partícula del lecho. Una de las variables que emplea dicha ecuación es el ancho efectivo pilar, a^* , el cual combina geometría, forma y ángulo de ataque del flujo hacia éste. También hace la distinción entre socavación de agua clara y de lecho móvil.

Los resultados del NCHRP fueron evaluados y expandidos dentro de una metodología de análisis para cálculo de socavación en pilares desarrollada por el Departamento de Transporte de Florida (FDOT).

Esta metodología predice la profundidad máxima de socavación en pilares emplazados sobre lechos con diámetro medio (D_{50}) comprendido entre 0.1 mm y 100 mm.

Esta metodología incluye las siguientes variables:

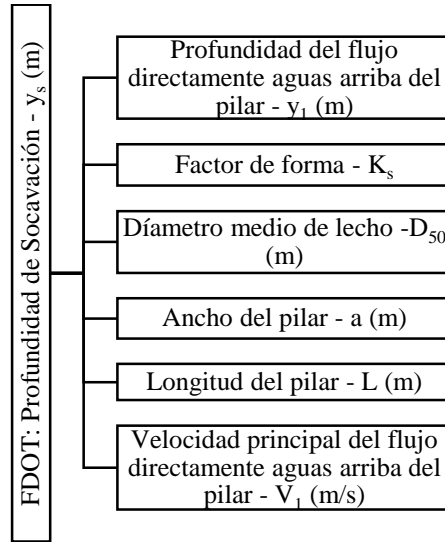


Figura 8. Esquema de las variables que intervienen en la metodología del FDOT.

$$\frac{y_s}{a^*} = 2.5f_1f_2f_3 \quad \text{para} \quad 0.4 \leq \frac{V_1}{V_c} < 1.0 \quad (5)$$

$$\frac{y_s}{a^*} = f_1 \left[2.2 \left(\frac{\frac{V_1}{V_c} - 1}{\frac{V_{lp}}{V_c} - 1} \right) + 2.5f_3 \left(\frac{\frac{V_{lp}}{V_c} - \frac{V_1}{V_c}}{\frac{V_{lp}}{V_c} - 1} \right) \right] \quad \text{para} \quad 1.0 \leq \frac{V_1}{V_c} \leq \frac{V_{lp}}{V_c} \quad (6)$$

$$\frac{y_s}{a^*} = 2.2f_1 \quad \text{para} \quad \frac{V_1}{V_c} > \frac{V_{lp}}{V_c} \quad (7)$$

$$f_1 = \tanh \left[\left(\frac{y_1}{a^*} \right)^{0.4} \right] \quad (8)$$

$$f_2 = \left\{ 1 - 1.2 \left[\ln \left(\frac{V_1}{V_c} \right) \right]^2 \right\} \quad (9)$$

$$f_3 = \left[\frac{\left(\frac{a^*}{D_{50}} \right)^{1.13}}{10.6 + 0.4 \left(\frac{a^*}{D_{50}} \right)^{1.33}} \right] \quad (10)$$

Donde:

y_s = profundidad de socavación (m)

a^* = ancho efectivo del pilar (m)

V_1 = velocidad media de flujo inmediatamente aguas arriba del pilar (m/s)

V_{lp} = velocidad pico de socavación en lecho móvil (m/s)

V_c = velocidad crítica para mover partículas del diámetro medio (m/s)

D_{50} = tamaño medio de las partículas de material del lecho

$$V_{lp} = 5V_c \quad \text{o} \quad 0.6\sqrt{gy_1} \quad (\text{se elige el mayor}) \quad (11)$$

$$V_c = 5.75u_c^* \log\left(5.53 \frac{y_1}{D_{50}}\right) \quad (12)$$

$$u_c^* = K_u(0.0377 + 0.041D_{50}^{1.4}) \quad \text{para} \quad 0.1 \text{ mm} < D_{50} < 1 \text{ mm} \quad (13)$$

$$u_c^* = K_u(0.1D_{50}^{0.5} - 0.0213/D_{50}) \quad \text{para} \quad 1 \text{ mm} < D_{50} < 100 \text{ mm} \quad (14)$$

$$K_u = 0.3048$$

El ancho efectivo del pilar, a^* , es el ancho proyectado por el factor de forma, K_{sf} .

$$a^* = K_{sf}a_{proj} \quad (15)$$

El factor de forma para un pilar circular o para uno de nariz redondeada es 1 y para uno cuadrado el factor de forma depende del ángulo de ataque.

$$K_{sf} = 1.0 \quad \text{para pilares de forma circular o nariz redondeada} \quad (16)$$

$$K_{sf} = 0.86 + 0.97 \left(\frac{\pi\theta}{180} - \frac{\pi}{4}\right)^4 \quad \text{para pilares con nariz cuadrada} \quad (17)$$

Donde:

θ = ángulo de ataque del flujo (grados sexagesimales)

El ancho proyectado del pilar es:

$$a_{proj} = a \cos\theta + L \sin\theta \quad (18)$$

Donde:

a_{proj} = ancho proyectado del pilar en dirección del flujo (m)

a = ancho del pilar (m)

L = longitud del pilar (m)

La metodología puede ser empleada siguiendo los siguientes pasos:

1. Calcular V_c usando la ecuación 12
2. Calcular V_{lp} usando la ecuación 11
3. Calcular a^* usando la ecuación 15
4. Calcular f_1 usando la ecuación 8
5. Calcular f_3 usando la ecuación 10
6. Calcular y_{s-c}/a^* e y_{s-c}
7. Calcular y_{s-lp}/a^*
8. Si $V_1 < 0.4 V_c$, luego $y_s = 0.0$
9. Si $0.4 V_c < V_1 \leq V_c$, luego calcular f_2 e $y_s = f_2 y_{s-c}$
10. Si $V_1 \geq V_{lp}$, luego $y_s = y_{s-lp}$
11. Si $V_c < V_1 < V_{lp}$, luego calcular y_s con la siguiente ecuación:

$$y_s = y_{s-c} + \frac{(V_1 - V_c)}{(V_{lp} - V_c)} (y_{s-lp} - y_{s-c}) \quad (19)$$

Nótese que la ecuación 19 es una versión equivalente pero simplificada de la ecuación 6. Donde y_{s-c} es la socavación a velocidad crítica (V_c) para movimiento del material del lecho y es igual a $2.5f_1f_3a^*$. y_{s-lp} es la socavación a velocidad pico en lecho móvil (V_{lp}) y es igual a $2.2f_1a^*$ (Arneson et. al 2012).

2.6 Parámetros estadísticos para comparar dos muestras:

Aquí se muestra la teoría de los parámetros más básicos que se emplearon para la comparación de las metodologías vistas, lo cual se hizo analizando los errores porcentuales que arrojó el uso de cada metodología de cálculo de socavación. Los cuales fueron la media y la desviación estándar.

a. Error porcentual:

Es el cociente (la división) entre el error absoluto (valor calculado menos el valor real) y el valor real, multiplicado por 100 (Arriagada y Peralta 2008).

$$e_{rel} = \frac{v_c - v_r}{v_r}$$

b. Media aritmética

La media aritmética, denominada simplemente media, es la suma de los valores observados de la variable, dividido por el número de observaciones. Para valores de una variable X observados en una muestra, la media aritmética se denota por \bar{x} (Zamora 2003).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

c. Desviación estándar

La desviación estándar es la raíz cuadrada positiva de la varianza. La desviación estándar calculada a partir de una muestra se denotara por s y referida a la población σ . (Zamora 2003). Esto es,

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

Para poder determinar cuál de las ecuaciones, entre la propuesta por el HEC-18 y la propuesta por el FDOT, es mejor para determinar la profundidad máxima de socavación en un pilar circular emplazado sobre lecho arenoso se hizo el análisis de 146 muestras de campo de puentes ubicados en los Estados Unidos, Canadá y Serbia; dicha muestras fueron obtenidas de la Base de Datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) de 2014, y corresponden a data tomada entre junio de 1966 y marzo de 2007. Dicha base de datos cuenta con más de 1800 casos de socavación en pilares ubicados alrededor del mundo; siendo seleccionados para el caso del presente trabajo de investigación solo aquellos correspondientes a pilares circulares emplazados sobre lechos arenosos.

3.1 Metodología del HEC-18 para el cálculo de socavación en pilares

La metodología del HEC-18 para el cálculo de socavación en pilares toma en cuenta principalmente cuatro variables: la geometría y dimensiones del pilar, profundidad de flujo y velocidad de flujo. En el presente trabajo de investigación se ha empleado la forma básica de esta metodología, la cual ha sido desarrollada para ser empleada en el caso de lechos no cohesivos cuyo diámetro medio sea menor a 20 mm.

El cálculo de socavación para cada una de las 146 muestras de campo analizadas, se realizó en una hoja de cálculo elaborada para dicho fin, donde se ingresaron cada una de las variables que componían la metodología del HEC-18; cuyo resultado final era la socavación máxima de cada una de las muestras. Todos estos datos fueron ordenados en tablas para un mejor entendimiento.

3.2 Metodología del FDOT para el cálculo de socavación en pilares

La metodología del FDOT para el cálculo de socavación en pilares, al igual que la metodología del HEC-18 toma en cuenta las mismas cuatro variables (geometría y dimensiones del pilar, profundidad de flujo y velocidad de flujo), he incluye una quinta que está relacionada con la granulometría del lecho, dicha variable es el diámetro medio (D_{50}). Esta metodología ha sido desarrollada para ser empleada en el caso de lechos no cohesivos cuyo diámetro medio este comprendido entre 0.1 mm y 100 mm.

El cálculo de socavación para cada una de las 146 muestras de campo analizadas, se realizó en una hoja de cálculo elaborada para dicho fin, donde se ingresaron cada una de

las variables que componían la metodología del FDOT; cuyo resultado final era la socavación máxima de cada una de las muestras. Aquí también, todos los datos fueron ordenados en tablas para un mejor entendimiento.

3.3 Parámetros estadísticos para comparación de dos muestras

Para analizar cuál de las metodologías comparadas es la más apropiada para ser empleada en el cálculo de socavación en pilares de puentes, se calculó el error porcentual de cada una de las muestras, tomando en cuenta la socavación real vista en campo y la socavación teórica calculada. Con los errores porcentuales de cada una de las 146 muestras de campo analizadas, tanto para el caso del HEC-18 y del FDOT; se hizo el cálculo de tres parámetros estadísticos básicos, estos fueron: la media y la desviación estándar. Esto con el fin de poder comparar y determinar cuál de las metodologías vistas es la que mejores resultados da al ser empleada.

3.4 Análisis comparativo

Finalmente para realizar el análisis comparativo de las metodologías vistas se emplearon tres métodos:

El primero fue la comparación estadística previamente detallada, con lo cual la metodología más recomendada fue aquella cuyos parámetros eran los menores.

El segundo fue una comparación mediante la elaboración de gráficas donde se pudiera observar claramente cuál de las metodologías vistas era la que mejores aproximaciones daba respecto de los resultados observados en campo.

Y el tercer método de comparación, el cual se basó en el método empleado por Gaudio et al. (2010) para comparar 6 ecuaciones de cálculo de socavación en pilares, el cual para aquel caso consistió en determinar dos límites, los cuales consideraban que las socavaciones calculadas no debían ser menores en 10 % ni tampoco mayores en 50 % a las socavaciones observadas en campo, esto debido a que se buscaba la ecuación cuyos resultados fuesen seguros pero a la vez económicos; es decir, que no arrojen resultados subestimados pero tampoco sobreestimaciones excesivas al momento de hacer el cálculo de la profundidad de socavación. Dicho método ha sido modificado para el caso de la presente investigación, de tal forma que se emplearon un límite inferior en 15 % y uno superior en 100 % de las socavaciones observadas. Siendo mejor aquella metodología de la que se obtuvo más resultados dentro de dicho rango.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Muestras de campo recopiladas en la Base de Datos de Socavación en Pilares de 2014 del USGS

Las 146 muestras de campo recopiladas en la Base de Datos de Socavación en Pilares de 2014 del USGS fueron seleccionadas de una base de datos mucho más amplia, eligiendo solo aquellas que permitían hacer una comparación adecuada con lo buscado en la presente tesis; es decir, aquellas que estuviesen completas con todos los parámetros que requerían las metodologías comparadas y además que correspondieran a pilares circulares emplazados sobre lechos arenosos. Dichos pilares pertenecen a puentes ubicados en los Estados Unidos, Canadá y Serbia. Los datos de las muestras de campo analizadas se encuentran en la siguiente tabla:

Cuadro 4. Muestras de campo analizadas.

Dato N°	Pilar		Características del flujo y río				Lecho	Socavación observada
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Ancho a (m)	Forma de la nariz	Profundidad del flujo y ₁ (m)	Velocidad media V ₁ (m/s)	Número de Froude F	Pendiente del cauce S (%)	Diámetro medio D ₅₀ (mm)	Profundidad máxima de socavación y _s (m)
1	1.52	Circular	0.46	0.27	0.13	0.10	0.58	0.76
2	1.52	Circular	1.22	0.49	0.14	0.10	0.58	0.30
3	1.52	Circular	1.52	0.76	0.20	0.10	0.58	0.30
4	1.52	Circular	1.22	0.88	0.26	0.10	0.58	0.30
5	1.52	Circular	3.05	1.83	0.33	0.10	1.80	1.83
6	1.52	Circular	3.05	1.80	0.33	0.10	1.80	1.37
7	1.52	Circular	3.20	1.98	0.35	0.10	1.80	1.22
8	1.52	Circular	2.59	2.07	0.41	0.10	1.80	1.07
9	1.52	Circular	3.05	1.58	0.29	0.10	1.80	0.91
10	1.52	Circular	1.98	1.55	0.35	0.10	1.80	0.61
11	1.52	Circular	2.13	1.52	0.33	0.10	1.80	0.61
12	1.52	Circular	1.98	0.98	0.22	0.10	1.80	0.76
13	1.52	Circular	2.29	1.13	0.24	0.10	1.80	0.76
14	1.52	Circular	0.91	0.98	0.33	0.10	1.80	0.61
15	1.52	Circular	2.44	1.16	0.24	0.10	1.80	0.61
16	1.52	Circular	0.91	0.94	0.32	0.10	1.80	0.46
17	1.52	Circular	1.52	1.13	0.29	0.10	1.80	0.46
18	1.52	Circular	1.83	1.10	0.26	0.10	1.80	0.46
19	1.19	Circular	6.19	0.85	0.11	0.03	0.31	1.22
20	4.57	Circular	0.82	0.64	0.23	0.10	0.36	1.92

Cuadro 4 (continuación). Muestras de campo analizadas.

Dato N°	Pilar		Características del flujo y río				Lecho	Socavación observada
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Ancho a (m)	Forma de la nariz	Profundidad del flujo y ₁ (m)	Velocidad media V ₁ (m/s)	Número de Froude F	Pendiente del cauce S (%)	Diámetro medio D ₅₀ (mm)	Profundidad máxima de socavación y _s (m)
21	4.57	Circular	1.92	1.92	0.44	0.10	0.36	1.77
22	4.57	Circular	5.12	2.35	0.33	0.10	0.36	1.28
23	4.57	Circular	3.93	2.19	0.35	0.10	0.36	1.37
24	4.57	Circular	3.35	1.98	0.35	0.10	0.36	3.05
25	1.22	Circular	0.64	0.67	0.27	0.05	1.19	0.30
26	1.22	Circular	0.64	0.67	0.27	0.05	1.19	0.30
27	1.22	Circular	2.29	1.65	0.35	0.05	1.19	1.31
28	1.22	Circular	2.29	1.65	0.35	0.05	1.19	0.46
29	1.22	Circular	1.04	1.01	0.32	0.05	1.19	0.34
30	1.22	Circular	1.04	1.01	0.32	0.05	1.19	0.30
31	0.69	Circular	0.88	0.24	0.08	0.20	0.69	0.49
32	0.69	Circular	1.71	0.66	0.16	0.20	0.69	0.40
33	7.01	Circular	2.68	1.04	0.20	0.10	0.36	2.68
34	4.57	Circular	4.45	2.10	0.32	0.10	0.36	1.62
35	0.98	Circular	5.82	1.32	0.17	0.03	0.28	0.82
36	1.07	Circular	3.87	1.37	0.22	0.05	1.82	0.49
37	1.13	Circular	1.55	1.58	0.41	0.18	5.00	0.40
38	1.07	Circular	4.08	1.37	0.22	0.05	0.78	0.30
39	4.27	Circular	11.73	2.99	0.28	0.01	0.30	4.75
40	4.27	Circular	11.67	2.50	0.23	0.01	0.30	4.39
41	4.27	Circular	12.04	2.99	0.27	0.01	0.30	4.54
42	4.27	Circular	11.73	2.50	0.23	0.01	0.30	3.93
43	0.76	Circular	2.23	0.73	0.16	0.02	0.19	0.40
44	1.13	Circular	2.87	2.13	0.40	0.18	5.00	0.73
45	4.27	Circular	11.19	3.17	0.30	0.01	0.30	5.52
46	4.27	Circular	11.67	3.17	0.30	0.01	0.30	5.15
47	4.27	Circular	10.82	2.56	0.25	0.01	0.30	3.29
48	4.27	Circular	11.28	2.56	0.24	0.01	0.30	2.07
49	4.27	Circular	9.63	2.90	0.30	0.01	0.30	5.64
50	4.27	Circular	9.27	2.10	0.22	0.01	0.30	4.18
51	4.27	Circular	9.33	2.10	0.22	0.01	0.30	3.84
52	4.27	Circular	9.69	2.90	0.30	0.01	0.30	3.75
53	0.76	Circular	2.71	0.64	0.12	0.11	0.92	0.76
54	0.91	Circular	8.75	1.39	0.15	0.01	0.70	1.52
55	0.91	Circular	6.46	0.53	0.07	0.01	0.70	0.98
56	0.91	Circular	8.02	0.57	0.06	0.01	0.70	0.91
57	0.76	Circular	2.77	0.91	0.18	0.02	0.19	0.43

Cuadro 4 (continuación). Muestras de campo analizadas.

Dato N°	Pilar		Características del flujo y río				Lecho	Socavación observada
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Ancho a (m)	Forma de la nariz	Profundidad del flujo y ₁ (m)	Velocidad media V ₁ (m/s)	Número de Froude F	Pendiente del cauce S (%)	Diámetro medio D ₅₀ (mm)	Profundidad máxima de socavación y _s (m)
58	0.76	Circular	1.65	0.76	0.19	0.14	4.00	0.76
59	0.76	Circular	1.49	0.24	0.06	0.14	0.25	0.15
60	0.69	Circular	0.88	0.32	0.11	0.20	0.69	0.73
61	0.69	Circular	0.79	0.32	0.12	0.20	0.69	0.40
62	0.69	Circular	1.80	0.69	0.16	0.20	0.69	0.37
63	0.69	Circular	1.55	0.64	0.16	0.20	0.69	0.21
64	0.98	Circular	6.25	1.60	0.20	0.03	0.28	1.07
65	0.98	Circular	7.92	1.88	0.21	0.03	0.28	1.22
66	0.98	Circular	9.30	2.17	0.23	0.03	0.28	1.07
67	1.13	Circular	3.08	1.80	0.33	0.18	5.00	0.49
68	0.76	Circular	3.17	1.28	0.23	0.14	4.00	0.67
69	0.76	Circular	3.11	0.67	0.12	0.14	0.25	0.15
70	0.91	Circular	5.09	1.28	0.18	0.02	0.90	0.67
71	0.91	Circular	7.32	0.96	0.11	0.01	0.70	0.76
72	0.88	Circular	4.72	0.91	0.13	0.02	0.74	0.34
73	0.88	Circular	4.27	0.85	0.13	0.02	0.74	0.27
74	0.88	Circular	4.88	0.80	0.12	0.02	0.74	0.46
75	0.88	Circular	4.39	0.78	0.12	0.02	0.74	0.24
76	0.69	Circular	1.07	0.50	0.15	0.20	0.69	0.46
77	0.69	Circular	0.88	0.38	0.13	0.20	0.69	0.40
78	0.69	Circular	1.40	0.52	0.14	0.20	0.69	0.43
79	0.69	Circular	1.62	0.52	0.13	0.20	0.69	0.37
80	0.88	Circular	5.03	0.99	0.14	0.02	0.74	0.37
81	0.88	Circular	4.51	0.92	0.14	0.02	0.74	0.27
82	0.88	Circular	4.79	1.04	0.15	0.02	0.74	0.37
83	0.88	Circular	4.27	0.86	0.13	0.02	0.74	0.34
84	0.88	Circular	4.39	0.86	0.13	0.02	0.74	0.49
85	0.88	Circular	4.48	0.92	0.14	0.02	0.74	0.37
86	0.98	Circular	8.38	1.66	0.18	0.03	0.28	1.52
87	0.91	Circular	5.94	0.76	0.10	0.04	0.50	1.04
88	0.91	Circular	5.12	0.31	0.04	0.04	0.50	0.43
89	0.91	Circular	4.94	0.97	0.14	0.01	0.70	1.37
90	0.91	Circular	5.03	0.37	0.05	0.01	0.70	0.49
91	0.91	Circular	5.94	0.38	0.05	0.01	0.70	0.46
92	0.91	Circular	6.95	1.01	0.12	0.01	0.70	1.07
93	0.91	Circular	5.33	0.40	0.05	0.01	0.70	0.91
94	0.91	Circular	6.10	0.37	0.05	0.01	0.70	0.61

Cuadro 4 (continuación). Muestras de campo analizadas.

Dato N°	Pilar		Características del flujo y río				Lecho	Socavación observada
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Ancho a (m)	Forma de la nariz	Profundidad del flujo y ₁ (m)	Velocidad media V ₁ (m/s)	Número de Froude F	Pendiente del cauce S (%)	Diámetro medio D ₅₀ (mm)	Profundidad máxima de socavación y _s (m)
95	0.91	Circular	6.71	0.92	0.11	0.01	0.70	1.37
96	0.91	Circular	5.73	0.25	0.03	0.01	0.70	0.37
97	0.91	Circular	5.15	0.31	0.04	0.01	0.70	0.61
98	0.91	Circular	6.49	0.87	0.11	0.01	0.70	1.55
99	0.91	Circular	4.75	0.29	0.04	0.01	0.70	0.55
100	0.91	Circular	5.64	0.33	0.04	0.01	0.70	0.46
101	0.91	Circular	5.00	0.31	0.04	0.01	0.70	0.91
102	0.91	Circular	6.61	0.94	0.12	0.01	0.70	1.28
103	0.91	Circular	5.88	0.29	0.04	0.01	0.70	0.40
104	1.01	Circular	2.35	1.25	0.26	0.05	1.15	0.52
105	0.88	Circular	4.63	1.01	0.15	0.02	0.74	0.43
106	0.88	Circular	5.03	1.12	0.16	0.02	0.74	0.40
107	0.88	Circular	5.09	1.00	0.14	0.02	0.74	0.55
108	0.88	Circular	4.36	0.96	0.15	0.02	0.74	0.43
109	0.88	Circular	4.85	1.12	0.16	0.02	0.74	0.61
110	0.88	Circular	4.63	1.02	0.15	0.02	0.74	0.55
111	0.88	Circular	5.15	1.05	0.15	0.02	0.74	0.61
112	0.88	Circular	4.63	0.95	0.14	0.02	0.74	0.46
113	0.88	Circular	4.69	1.09	0.16	0.02	0.74	0.61
114	0.88	Circular	4.69	0.99	0.15	0.02	0.74	0.40
115	0.91	Circular	7.50	1.02	0.12	0.01	0.70	1.22
116	0.91	Circular	6.34	0.35	0.04	0.01	0.70	0.46
117	0.91	Circular	5.52	0.48	0.06	0.01	0.70	0.49
118	0.91	Circular	7.44	0.98	0.11	0.01	0.70	1.07
119	0.91	Circular	5.61	0.41	0.06	0.01	0.70	0.61
120	0.91	Circular	6.40	0.33	0.04	0.01	0.70	0.46
121	0.91	Circular	7.13	0.33	0.04	0.01	0.70	0.91
122	0.91	Circular	7.56	0.99	0.12	0.01	0.70	1.10
123	0.91	Circular	5.76	0.52	0.07	0.01	0.70	0.70
124	1.22	Circular	3.23	1.13	0.20	0.19	0.15	0.85
125	4.57	Circular	1.01	1.55	0.49	0.10	0.36	0.82
126	0.76	Circular	3.66	0.79	0.13	0.04	0.16	0.15
127	1.07	Circular	4.11	1.77	0.28	0.05	1.30	0.27
128	1.22	Circular	2.71	2.01	0.39	0.07	0.32	1.98
129	1.22	Circular	3.17	1.68	0.30	0.11	1.70	2.23
130	1.22	Circular	6.00	2.93	0.38	0.11	1.70	2.32
131	2.13	Circular	9.51	0.85	0.09	0.02	1.30	1.58

Cuadro 4 (continuación). Muestras de campo analizadas.

Dato N°	Pilar		Características del flujo y río				Lecho	Socavación observada
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Ancho a (m)	Forma de la nariz	Profundidad del flujo y_1 (m)	Velocidad media V_1 (m/s)	Número de Froude F	Pendiente del cauce S (%)	Diámetro medio D_{50} (mm)	Profundidad máxima de socavación y_s (m)
132	2.13	Circular	9.85	0.88	0.09	0.02	1.30	0.98
133	1.22	Circular	4.36	1.25	0.19	0.20	0.74	1.52
134	1.22	Circular	4.79	1.28	0.19	0.20	0.74	1.07
135	1.22	Circular	10.67	1.49	0.15	0.01	0.46	1.95
136	1.22	Circular	10.39	1.46	0.14	0.01	0.46	1.80
137	1.22	Circular	10.82	1.46	0.14	0.01	0.46	1.74
138	1.22	Circular	10.39	1.46	0.14	0.01	0.46	1.74
139	1.22	Circular	10.30	1.43	0.14	0.01	0.46	1.46
140	1.22	Circular	15.45	2.44	0.20	0.01	1.60	2.01
141	1.22	Circular	14.94	2.59	0.21	0.01	1.60	1.55
142	1.22	Circular	15.48	2.62	0.21	0.01	1.60	1.28
143	1.49	Circular	4.91	1.40	0.20	-	0.32	1.19
144	2.71	Circular	11.00	2.19	0.21	-	0.31	2.5
145	4.50	Circular	18.80	1.84	0.14	-	0.25	4.3
146	4.50	Circular	17.40	2.28	0.17	-	0.25	2.99

Cuadro 5. Resumen de las 146 muestras de campo analizadas.

Rango	Pilar		Características del flujo y río				Lecho	Socavación observada
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Ancho a (m)	Forma de la nariz	Profundidad del flujo y_1 (m)	Velocidad media V_1 (m/s)	Número de Froude F	Pendiente del cauce S (%)	Diámetro medio D_{50} (mm)	Profundidad máxima de socavación y_s (m)
Máximo	7.01	Circular	18.80	3.17	0.49	0.20	5.00	5.64
Mínimo	0.69	Circular	0.46	0.24	0.03	0.01	0.15	0.15

Una vez ordenados todos los datos necesarios para poder emplear las metodologías comparadas. Se hicieron las hojas de cálculo respectivas con el fin de determinar las profundidades teóricas de socavación para cada una de las 146 muestras de campo, obteniendo los siguientes resultados:

Cuadro 6. Profundidades de socavación determinadas mediante las metodologías del HEC-18 y FDOT.

N°	Datos previos						Socavación			Proporción	
							Calculada		Observada		
	FDOT	HEC-18	y _s (m)								
	a (m)	L (m)		y ₁ (m)	V ₁ (m/s)	θ°	D ₅₀ (m)	y _s (m)	y _s (m)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	(7)/(9)	(8)/(9)	
1	1.52	1.52	0.46	0.27	0	5.8E-04	0.98	0.91	0.76	1.29	1.20
2	1.52	1.52	1.22	0.49	0	5.8E-04	1.48	1.34	0.30	4.84	4.38
3	1.52	1.52	1.52	0.76	0	5.8E-04	1.69	1.67	0.30	5.55	5.47
4	1.52	1.52	1.22	0.88	0	5.8E-04	1.71	1.72	0.30	5.62	5.66
5	1.52	1.52	3.05	1.83	0	1.8E-03	2.36	2.67	1.83	1.29	1.46
6	1.52	1.52	3.05	1.80	0	1.8E-03	2.35	2.65	1.37	1.71	1.93
7	1.52	1.52	3.20	1.98	0	1.8E-03	2.41	2.78	1.22	1.97	2.28
8	1.52	1.52	2.59	2.07	0	1.8E-03	2.36	2.75	1.07	2.21	2.58
9	1.52	1.52	3.05	1.58	0	1.8E-03	2.30	2.51	0.91	2.52	2.74
10	1.52	1.52	1.98	1.55	0	1.8E-03	2.15	2.35	0.61	3.52	3.85
11	1.52	1.52	2.13	1.52	0	1.8E-03	2.17	2.35	0.61	3.56	3.86
12	1.52	1.52	1.98	0.98	0	1.8E-03	2.02	1.92	0.76	2.65	2.52
13	1.52	1.52	2.29	1.13	0	1.8E-03	2.10	2.08	0.76	2.76	2.74
14	1.52	1.52	0.91	0.98	0	1.8E-03	1.71	1.73	0.61	2.80	2.84
15	1.52	1.52	2.44	1.16	0	1.8E-03	2.13	2.13	0.61	3.50	3.49
16	1.52	1.52	0.91	0.94	0	1.8E-03	1.70	1.71	0.46	3.72	3.73
17	1.52	1.52	1.52	1.13	0	1.8E-03	1.95	1.97	0.46	4.27	4.32
18	1.52	1.52	1.83	1.10	0	1.8E-03	2.02	2.00	0.46	4.41	4.37
19	1.19	1.19	6.19	0.85	0	3.1E-04	1.49	1.80	1.22	1.22	1.48
20	4.57	4.57	0.82	0.64	0	3.6E-04	2.59	2.91	1.92	1.35	1.51
21	4.57	4.57	1.92	1.92	0	3.6E-04	5.05	5.23	1.77	2.86	2.96
22	4.57	4.57	5.12	2.35	0	3.6E-04	5.63	6.51	1.28	4.40	5.08
23	4.57	4.57	3.93	2.19	0	3.6E-04	5.46	6.10	1.37	3.98	4.45
24	4.57	4.57	3.35	1.98	0	3.6E-04	5.18	5.71	3.05	1.70	1.87
25	1.22	1.22	0.64	0.67	0	1.2E-03	1.26	1.21	0.30	4.13	3.98
26	1.22	1.22	0.64	0.67	0	1.2E-03	1.26	1.21	0.30	4.13	3.98
27	1.22	1.22	2.29	1.65	0	1.2E-03	1.89	2.12	1.31	1.44	1.62
28	1.22	1.22	2.29	1.65	0	1.2E-03	1.89	2.12	0.46	4.14	4.64
29	1.22	1.22	1.04	1.01	0	1.2E-03	1.50	1.54	0.34	4.46	4.60
30	1.22	1.22	1.04	1.01	0	1.2E-03	1.50	1.54	0.30	4.91	5.06
31	0.69	0.69	0.88	0.24	0	6.9E-04	0.55	0.56	0.49	1.12	1.15
32	0.69	0.69	1.71	0.66	0	6.9E-04	1.00	0.94	0.40	2.52	2.38
33	7.01	7.01	2.68	1.04	0	3.6E-04	4.94	5.54	2.68	1.84	2.07
34	4.57	4.57	4.45	2.10	0	3.6E-04	5.34	6.09	1.62	3.31	3.77
35	0.98	0.98	5.82	1.32	0	2.8E-04	1.36	1.89	0.82	1.65	2.30
36	1.07	1.07	3.87	1.37	0	1.8E-03	1.79	1.93	0.49	3.67	3.96
37	1.13	1.13	1.55	1.58	0	5.0E-03	1.91	1.88	0.40	4.82	4.75

Cuadro 6 (continuación). Profundidades de socavación determinadas mediante las metodologías del HEC-18 y FDOT.

N°	Datos previos						Socavación			Proporción	
							Calculada		Observada		
	FDOT	HEC-18	y _s (m)								
	a (m)	L (m)		y ₁ (m)	V ₁ (m/s)	θ°	D ₅₀ (m)	y _s (m)	y _s (m)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	(7)/(9)	(8)/(9)	
38	1.07	1.07	4.08	1.37	0	7.8E-04	1.66	1.95	0.30	5.45	6.38
39	4.27	4.27	11.73	2.99	0	3.0E-04	5.67	7.72	4.75	1.19	1.62
40	4.27	4.27	11.67	2.50	0	3.0E-04	5.27	7.14	4.39	1.20	1.63
41	4.27	4.27	12.04	2.99	0	3.0E-04	5.65	7.75	4.54	1.25	1.71
42	4.27	4.27	11.73	2.50	0	3.0E-04	5.27	7.15	3.93	1.34	1.82
43	4.27	4.27	2.23	0.73	0	1.9E-04	0.93	1.10	0.40	2.35	2.77
44	4.27	4.27	2.87	2.13	0	5.0E-03	2.11	2.32	0.73	2.89	3.18
45	4.27	4.27	11.19	3.17	0	3.0E-04	5.84	7.87	5.52	1.06	1.43
46	4.27	4.27	11.67	3.17	0	3.0E-04	5.82	7.91	5.15	1.13	1.54
47	4.27	4.27	10.82	2.56	0	3.0E-04	5.34	7.14	3.29	1.62	2.17
48	4.27	4.27	11.28	2.56	0	3.0E-04	5.33	7.18	2.07	2.57	3.47
49	4.27	4.27	9.63	2.90	0	3.0E-04	5.67	7.42	5.64	1.01	1.32
50	4.27	4.27	9.27	2.10	0	3.0E-04	4.98	6.43	4.18	1.19	1.54
51	4.27	4.27	9.33	2.10	0	3.0E-04	4.98	6.44	3.84	1.30	1.68
52	4.27	4.27	9.69	2.90	0	3.0E-04	5.67	7.42	3.75	1.51	1.98
53	4.27	4.27	2.71	0.64	0	9.2E-04	1.17	1.07	0.76	1.53	1.40
54	4.27	4.27	8.75	1.39	0	7.0E-04	1.45	1.96	1.52	0.95	1.29
55	4.27	4.27	6.46	0.53	0	7.0E-04	1.33	1.24	0.98	1.36	1.27
56	4.27	4.27	8.02	0.57	0	7.0E-04	1.34	1.32	0.91	1.47	1.45
57	4.27	4.27	2.77	0.91	0	1.9E-04	0.99	1.25	0.43	2.31	2.92
58	4.27	4.27	1.65	0.76	0	4.0E-03	1.14	1.07	0.76	1.50	1.41
59	4.27	4.27	1.49	0.24	0	2.5E-04	0.71	0.65	0.15	4.63	4.26
60	4.27	4.27	0.88	0.32	0	6.9E-04	0.79	0.64	0.73	1.08	0.87
61	4.27	4.27	0.79	0.32	0	6.9E-04	0.78	0.63	0.40	1.97	1.59
62	4.27	4.27	1.80	0.69	0	6.9E-04	1.01	0.97	0.37	2.76	2.65
63	4.27	4.27	1.55	0.64	0	6.9E-04	0.99	0.92	0.21	4.63	4.33
64	0.98	0.98	6.25	1.60	0	2.8E-04	1.42	2.08	1.07	1.33	1.95
65	0.98	0.98	7.92	1.88	0	2.8E-04	1.45	2.30	1.22	1.19	1.88
66	0.98	0.98	9.30	2.17	0	2.8E-04	1.49	2.34	1.07	1.39	2.19
67	1.13	1.13	3.08	1.80	0	5.0E-03	2.12	2.18	0.49	4.36	4.47
68	0.76	0.76	3.17	1.28	0	4.0E-03	1.54	1.47	0.67	2.29	2.19
69	0.76	0.76	3.11	0.67	0	2.5E-04	0.97	1.11	0.15	6.35	7.27
70	0.91	0.91	5.09	1.28	0	9.0E-04	1.48	1.76	0.67	2.21	2.62
71	0.91	0.91	7.32	0.96	0	7.0E-04	1.39	1.64	0.76	1.83	2.15
72	0.88	0.88	4.72	0.91	0	7.4E-04	1.35	1.47	0.34	4.02	4.38
73	0.88	0.88	4.27	0.85	0	7.4E-04	1.33	1.41	0.27	4.86	5.15
74	0.88	0.88	4.88	0.80	0	7.4E-04	1.33	1.40	0.46	2.91	3.06

Cuadro 6 (continuación). Profundidades de socavación determinadas mediante las metodologías del HEC-18 y FDOT.

N°	Datos previos						Socavación			Proporción	
							Calculada		Observada		
	FDOT	HEC-18	y _s (m)								
	a (m)	L (m)		y ₁ (m)	V ₁ (m/s)	θ°	D ₅₀ (m)	y _s (m)	y _s (m)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	(7)/(9)	(8)/(9)	
75	0.88	0.88	4.39	0.78	0	7.4E-04	1.32	1.36	0.24	5.43	5.59
76	0.69	0.69	1.07	0.50	0	6.9E-04	0.91	0.79	0.46	1.99	1.72
77	0.69	0.69	0.88	0.38	0	6.9E-04	0.86	0.69	0.40	2.16	1.73
78	0.69	0.69	1.40	0.52	0	6.9E-04	0.95	0.83	0.43	2.23	1.95
79	0.69	0.69	1.62	0.52	0	6.9E-04	0.97	0.85	0.37	2.65	2.33
80	0.88	0.88	5.03	0.99	0	7.4E-04	1.36	1.54	0.37	3.73	4.21
81	0.88	0.88	4.51	0.92	0	7.4E-04	1.35	1.47	0.27	4.92	5.37
82	0.88	0.88	4.79	1.04	0	7.4E-04	1.37	1.56	0.37	3.75	4.27
83	0.88	0.88	4.27	0.86	0	7.4E-04	1.33	1.41	0.34	3.98	4.22
84	0.88	0.88	4.39	0.86	0	7.4E-04	1.34	1.42	0.49	2.74	2.92
85	0.88	0.88	4.48	0.92	0	7.4E-04	1.35	1.47	0.37	3.69	4.02
86	0.98	0.98	8.38	1.66	0	2.8E-04	1.41	2.20	1.52	0.92	1.44
87	0.91	0.91	5.94	0.76	0	5.0E-04	1.29	1.44	1.04	1.24	1.39
88	0.91	0.91	5.12	0.31	0	5.0E-04	1.03	0.95	0.43	2.41	2.24
89	0.91	0.91	4.94	0.97	0	7.0E-04	1.39	1.56	1.37	1.01	1.13
90	0.91	0.91	5.03	0.37	0	7.0E-04	1.15	1.03	0.49	2.36	2.11
91	0.91	0.91	5.94	0.38	0	7.0E-04	1.18	1.07	0.46	2.58	2.33
92	0.91	0.91	6.95	1.01	0	7.0E-04	1.40	1.66	1.07	1.31	1.55
93	0.91	0.91	5.33	0.40	0	7.0E-04	1.22	1.07	0.91	1.33	1.17
94	0.91	0.91	6.10	0.37	0	7.0E-04	1.14	1.05	0.61	1.87	1.73
95	0.91	0.91	6.71	0.92	0	7.0E-04	1.39	1.58	1.37	1.01	1.15
96	0.91	0.91	5.73	0.25	0	7.0E-04	0.51	0.89	0.37	1.39	2.42
97	0.91	0.91	5.15	0.31	0	7.0E-04	0.94	0.96	0.61	1.54	1.57
98	0.91	0.91	6.49	0.87	0	7.0E-04	1.38	1.54	1.55	0.89	0.99
99	0.91	0.91	4.75	0.29	0	7.0E-04	0.83	0.92	0.55	1.51	1.68
100	0.91	0.91	5.64	0.33	0	7.0E-04	1.00	0.99	0.46	2.19	2.17
101	0.91	0.91	5.00	0.31	0	7.0E-04	0.93	0.95	0.91	1.01	1.04
102	0.91	0.91	6.61	0.94	0	7.0E-04	1.39	1.60	1.28	1.08	1.25
103	0.91	0.91	5.88	0.29	0	7.0E-04	0.80	0.95	0.40	2.03	2.39
104	1.01	1.01	2.35	1.25	0	1.2E-03	1.56	1.67	0.52	3.02	3.22
105	0.88	0.88	4.63	1.01	0	7.4E-04	1.36	1.54	0.43	3.20	3.60
106	0.88	0.88	5.03	1.12	0	7.4E-04	1.39	1.63	0.40	3.50	4.10
107	0.88	0.88	5.09	1.00	0	7.4E-04	1.37	1.55	0.55	2.49	2.82
108	0.88	0.88	4.36	0.96	0	7.4E-04	1.35	1.49	0.43	3.17	3.49
109	0.88	0.88	4.85	1.12	0	7.4E-04	1.38	1.61	0.61	2.27	2.64
110	0.88	0.88	4.63	1.02	0	7.4E-04	1.37	1.54	0.55	2.49	2.81
111	0.88	0.88	5.15	1.05	0	7.4E-04	1.37	1.58	0.61	2.25	2.60

Cuadro 6 (continuación). Profundidades de socavación determinadas mediante las metodologías del HEC-18 y FDOT.

N°	Datos previos						Socavación			Proporción	
							Calculada		Observada		
	FDOT	HEC-18	y _s (m)								
	a (m)	L (m)		y ₁ (m)	V ₁ (m/s)	θ°	D ₅₀ (m)	y _s (m)	y _s (m)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	(7)/(9)	(8)/(9)	
112	0.88	0.88	4.63	0.95	0	7.4E-04	1.36	1.50	0.46	2.96	3.28
113	0.88	0.88	4.69	1.09	0	7.4E-04	1.38	1.59	0.61	2.26	2.60
114	0.88	0.88	4.69	0.99	0	7.4E-04	1.36	1.52	0.40	3.43	3.84
115	0.91	0.91	7.50	1.02	0	7.0E-04	1.40	1.68	1.22	1.15	1.38
116	0.91	0.91	6.34	0.35	0	7.0E-04	1.10	1.04	0.46	2.40	2.28
117	0.91	0.91	5.52	0.48	0	7.0E-04	1.31	1.16	0.49	2.68	2.38
118	0.91	0.91	7.44	0.98	0	7.0E-04	1.40	1.65	1.07	1.31	1.55
119	0.91	0.91	5.61	0.41	0	7.0E-04	1.24	1.09	0.61	2.04	1.80
120	0.91	0.91	6.40	0.33	0	7.0E-04	1.00	1.01	0.46	2.19	2.21
121	0.91	0.91	7.13	0.33	0	7.0E-04	0.99	1.03	0.91	1.09	1.12
122	0.91	0.91	7.56	0.99	0	7.0E-04	1.40	1.66	1.10	1.27	1.52
123	0.91	0.91	5.76	0.52	0	7.0E-04	1.32	1.21	0.70	1.88	1.73
124	1.22	1.22	3.23	1.13	0	1.5E-04	1.46	1.89	0.85	1.71	2.21
125	4.57	4.57	1.01	1.55	0	3.6E-04	4.39	4.38	0.82	5.33	5.32
126	0.76	0.76	3.66	0.79	0	1.6E-04	0.94	1.22	0.15	6.14	7.98
127	1.07	1.07	4.11	1.77	0	1.3E-03	1.82	2.17	0.27	6.64	7.92
128	1.22	1.22	2.71	2.01	0	3.2E-04	1.93	2.37	1.98	0.98	1.19
129	1.22	1.22	3.17	1.68	0	1.7E-03	1.98	2.24	2.23	0.89	1.00
130	1.22	1.22	6.00	2.93	0	1.7E-03	2.28	2.93	2.32	0.99	1.26
131	2.13	2.13	9.51	0.85	0	1.3E-03	2.89	2.79	1.58	1.83	1.76
132	2.13	2.13	9.85	0.88	0	1.3E-03	2.91	2.85	0.98	2.98	2.92
133	1.22	1.22	4.36	1.25	0	7.4E-04	1.80	2.06	1.52	1.18	1.35
134	1.22	1.22	4.79	1.28	0	7.4E-04	1.81	2.10	1.07	1.70	1.97
135	1.22	1.22	10.67	1.49	0	4.6E-04	1.75	2.51	1.95	0.89	1.28
136	1.22	1.22	10.39	1.46	0	4.6E-04	1.74	2.47	1.80	0.97	1.38
137	1.22	1.22	10.82	1.46	0	4.6E-04	1.74	2.49	1.74	1.00	1.43
138	1.22	1.22	10.39	1.46	0	4.6E-04	1.74	2.47	1.74	1.00	1.42
139	1.22	1.22	10.30	1.43	0	4.6E-04	1.74	2.45	1.46	1.19	1.67
140	1.22	1.22	15.45	2.44	0	1.6E-03	2.15	2.93	2.01	1.07	1.45
141	1.22	1.22	14.94	2.59	0	1.6E-03	2.17	2.93	1.55	1.40	1.88
142	1.22	1.22	15.48	2.62	0	1.6E-03	2.17	2.93	1.28	1.70	2.29
143	1.49	1.49	4.91	1.40	0	3.2E-04	1.97	2.51	1.19	1.66	2.11
144	2.71	2.71	11.00	2.19	0	3.1E-04	3.52	4.99	2.50	1.41	2.00
145	4.50	4.50	18.80	1.84	0	2.5E-04	4.76	6.91	4.30	1.11	1.61
146	4.50	4.50	17.40	2.28	0	2.5E-04	5.11	7.50	2.99	1.71	2.51

Una vez determinadas tanto las socavaciones teóricas como las observadas en campo, se procedió a realizar el cálculo del error porcentual de cada una de las 146 muestras analizadas, tanto para la metodología del HEC-18 como para la metodología del FDOT. Dichos resultados fueron ordenados en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Error porcentual de las socavaciones calculadas mediante las metodologías del FDOT y del HEC-18 para cada una de las muestras de campo.

N°	FDOT	HEC-18	Campo	Error (%)		N°	FDOT	HEC-18	Campo	Error (%)	
	y _s (m)	y _s (m)	y _s (m)	FDOT	HEC-18		y _s (m)	y _s (m)	y _s (m)	FDOT	HEC-18
	7	8	9	10	11		7	8	9	10	11
1	0.98	0.91	0.76	28.95	19.74	33	4.94	5.54	2.68	84.33	106.72
2	1.48	1.34	0.30	393.33	346.67	34	5.34	6.09	1.62	229.63	275.93
3	1.69	1.67	0.30	463.33	456.67	35	1.36	1.89	0.82	65.85	130.49
4	1.71	1.72	0.30	470.00	473.33	36	1.79	1.93	0.49	265.31	293.88
5	2.36	2.67	1.83	28.96	45.90	37	1.91	1.88	0.40	377.50	370.00
6	2.35	2.65	1.37	71.53	93.43	38	1.66	1.95	0.30	453.33	550.00
7	2.41	2.78	1.22	97.54	127.87	39	5.67	7.72	4.75	19.37	62.53
8	2.36	2.75	1.07	120.56	157.01	40	5.27	7.14	4.39	20.05	62.64
9	2.30	2.51	0.91	152.75	175.82	41	5.65	7.75	4.54	24.45	70.70
10	2.15	2.35	0.61	252.46	285.25	42	5.27	7.15	3.93	34.10	81.93
11	2.17	2.35	0.61	255.74	285.25	43	0.93	1.10	0.40	132.50	175.00
12	2.02	1.92	0.76	165.79	152.63	44	2.11	2.32	0.73	189.04	217.81
13	2.10	2.08	0.76	176.32	173.68	45	5.84	7.87	5.52	5.80	42.57
14	1.71	1.73	0.61	180.33	183.61	46	5.82	7.91	5.15	13.01	53.59
15	2.13	2.13	0.61	249.18	249.18	47	5.34	7.14	3.29	62.31	117.02
16	1.70	1.71	0.46	269.57	271.74	48	5.33	7.18	2.07	157.49	246.86
17	1.95	1.97	0.46	323.91	328.26	49	5.67	7.42	5.64	0.53	31.56
18	2.02	2.00	0.46	339.13	334.78	50	4.98	6.43	4.18	19.14	53.83
19	1.49	1.80	1.22	22.13	47.54	51	4.98	6.44	3.84	29.69	67.71
20	2.59	2.91	1.92	34.90	51.56	52	5.67	7.42	3.75	51.20	97.87
21	5.05	5.23	1.77	185.31	195.48	53	1.17	1.07	0.76	53.95	40.79
22	5.63	6.51	1.28	339.84	408.59	54	1.45	1.96	1.52	4.61	28.95
23	5.46	6.10	1.37	298.54	345.26	55	1.33	1.24	0.98	35.71	26.53
24	5.18	5.71	3.05	69.84	87.21	56	1.34	1.32	0.91	47.25	45.05
25	1.26	1.21	0.30	320.00	303.33	57	0.99	1.25	0.43	130.23	190.70
26	1.26	1.21	0.30	320.00	303.33	58	1.14	1.07	0.76	50.00	40.79
27	1.89	2.12	1.31	44.27	61.83	59	0.71	0.65	0.15	373.33	333.33
28	1.89	2.12	0.46	310.87	360.87	60	0.79	0.64	0.73	8.22	12.33
29	1.50	1.54	0.34	341.18	352.94	61	0.78	0.63	0.40	95.00	57.50
30	1.50	1.54	0.30	400.00	413.33	62	1.01	0.97	0.37	172.97	162.16
31	0.55	0.56	0.49	12.24	14.29	63	0.99	0.92	0.21	371.43	338.10
32	1.00	0.94	0.40	150.00	135.00	64	1.42	2.08	1.07	32.71	94.39

Cuadro 7 (continuación). Error porcentual de las socavaciones calculadas mediante las metodologías del FDOT y del HEC-18 para cada una de las muestras de campo.

N°	FDOT	HEC-18	Campo	Error (%)		N°	FDOT	HEC-18	Campo	Error (%)	
	y _s (m)	y _s (m)	y _s (m)	FDOT	HEC-18		y _s (m)	y _s (m)	y _s (m)	FDOT	HEC-18
	7	8	9	10	11		7	8	9	10	11
65	1.45	2.30	1.22	18.85	88.52	103	0.80	0.95	0.40	100.00	137.50
66	1.49	2.34	1.07	39.25	118.69	104	1.56	1.67	0.52	200.00	221.15
67	2.12	2.18	0.49	332.65	344.90	105	1.36	1.54	0.43	216.28	258.14
68	1.54	1.47	0.67	129.85	119.40	106	1.39	1.63	0.40	247.50	307.50
69	0.97	1.11	0.15	546.67	640.00	107	1.37	1.55	0.55	149.09	181.82
70	1.48	1.76	0.67	120.90	162.69	108	1.35	1.49	0.43	213.95	246.51
71	1.39	1.64	0.76	82.89	115.79	109	1.38	1.61	0.61	126.23	163.93
72	1.35	1.47	0.34	297.06	332.35	110	1.37	1.54	0.55	149.09	180.00
73	1.33	1.41	0.27	392.59	422.22	111	1.37	1.58	0.61	124.59	159.02
74	1.33	1.40	0.46	189.13	204.35	112	1.36	1.50	0.46	195.65	226.09
75	1.32	1.36	0.24	450.00	466.67	113	1.38	1.59	0.61	126.23	160.66
76	0.91	0.79	0.46	97.83	71.74	114	1.36	1.52	0.40	240.00	280.00
77	0.86	0.69	0.40	115.00	72.50	115	1.40	1.68	1.22	14.75	37.70
78	0.95	0.83	0.43	120.93	93.02	116	1.10	1.04	0.46	139.13	126.09
79	0.97	0.85	0.37	162.16	129.73	117	1.31	1.16	0.49	167.35	136.73
80	1.36	1.54	0.37	267.57	316.22	118	1.40	1.65	1.07	30.84	54.21
81	1.35	1.47	0.27	400.00	444.44	119	1.24	1.09	0.61	103.28	78.69
82	1.37	1.56	0.37	270.27	321.62	120	1.00	1.01	0.46	117.39	119.57
83	1.33	1.41	0.34	291.18	314.71	121	0.99	1.03	0.91	8.79	13.19
84	1.34	1.42	0.49	173.47	189.80	122	1.40	1.66	1.10	27.27	50.91
85	1.35	1.47	0.37	264.86	297.30	123	1.32	1.21	0.70	88.57	72.86
86	1.41	2.20	1.52	7.24	44.74	124	1.46	1.89	0.85	71.76	122.35
87	1.29	1.44	1.04	24.04	38.46	125	4.39	4.38	0.82	435.37	434.15
88	1.03	0.95	0.43	139.53	120.93	126	0.94	1.22	0.15	526.67	713.33
89	1.39	1.56	1.37	1.46	13.87	127	1.82	2.17	0.27	574.07	703.70
90	1.15	1.03	0.49	134.69	110.20	128	1.93	2.37	1.98	2.53	19.70
91	1.18	1.07	0.46	156.52	132.61	129	1.98	2.24	2.23	11.21	0.45
92	1.40	1.66	1.07	30.84	55.14	130	2.28	2.93	2.32	1.72	26.29
93	1.22	1.07	0.91	34.07	17.58	131	2.89	2.79	1.58	82.91	76.58
94	1.14	1.05	0.61	86.89	72.13	132	2.91	2.85	0.98	196.94	190.82
95	1.39	1.58	1.37	1.46	15.33	133	1.80	2.06	1.52	18.42	35.53
96	0.51	0.89	0.37	37.84	140.54	134	1.81	2.10	1.07	69.16	96.26
97	0.94	0.96	0.61	54.10	57.38	135	1.75	2.51	1.95	10.26	28.72
98	1.38	1.54	1.55	10.97	0.65	136	1.74	2.47	1.80	3.33	37.22
99	0.83	0.92	0.55	50.91	67.27	137	1.74	2.49	1.74	0.00	43.10
100	1.00	0.99	0.46	117.39	115.22	138	1.74	2.47	1.74	0.00	41.95
101	0.93	0.95	0.91	2.20	4.40	139	1.74	2.45	1.46	19.18	67.81
102	1.39	1.60	1.28	8.59	25.00	140	2.15	2.93	2.01	6.97	45.77

Cuadro 7 (continuación). Error porcentual de las socavaciones calculadas mediante las metodologías del FDOT y del HEC-18 para cada una de las muestras de campo.

N°	FDOT	HEC-18	Campo	Error (%)	
	y_s (m)	y_s (m)	y_s (m)	FDOT	HEC-18
	7	8	9	10	11
141	2.17	2.93	1.55	40.00	89.03
142	2.17	2.93	1.28	69.53	128.91
143	1.97	2.51	1.19	65.55	110.92
144	3.52	4.99	2.50	40.80	99.60
145	4.76	6.91	4.30	10.70	60.70
146	5.11	7.50	2.99	70.90	150.84
\bar{x}				145.71	168.18
s				139.03	146.27

\bar{x} = Media aritmética de los errores porcentuales
 s = Desviación estándar muestral de los errores porcentuales

Del Cuadro 7 se observa que todos los parámetros estadísticos calculados para ambas metodologías son relativamente altos, esto debido a que ambas metodologías fueron desarrolladas con métodos de curvas envolventes; es decir, que las ecuaciones se obtienen de los valores máximos que se determinan tanto en laboratorio como en mediciones de campo. Pero comparando los parámetros estadísticos entre ambas metodologías vistas; se puede ver que tanto la media aritmética y la desviación estándar muestral son menores para el caso del FDOT, lo que implica que el error que arroja esta metodología es menor al error que arroja la metodología del HEC-18. Con esto se concluye que al ser el error de la metodología del FDOT menor, esta es la más recomendable para ser empleada en el cálculo de socavación alrededor de pilares circulares cimentados sobre lechos arenosos.

Sin embargo, para una mejor observación de la conclusión a la que se llegó con el análisis estadístico de los errores porcentuales, también se elaboró la siguiente gráfica donde se plasman tanto las socavaciones teóricas como las observadas en campo, ordenándose los resultados convenientemente para poder tener una mejor visión de la comparación hecha entre las metodologías; observándose que la metodología del FDOT suele dar mejores aproximaciones de socavación, puesto que sus resultados están usualmente entre los determinados mediante HEC-18 y los observados en la realidad.

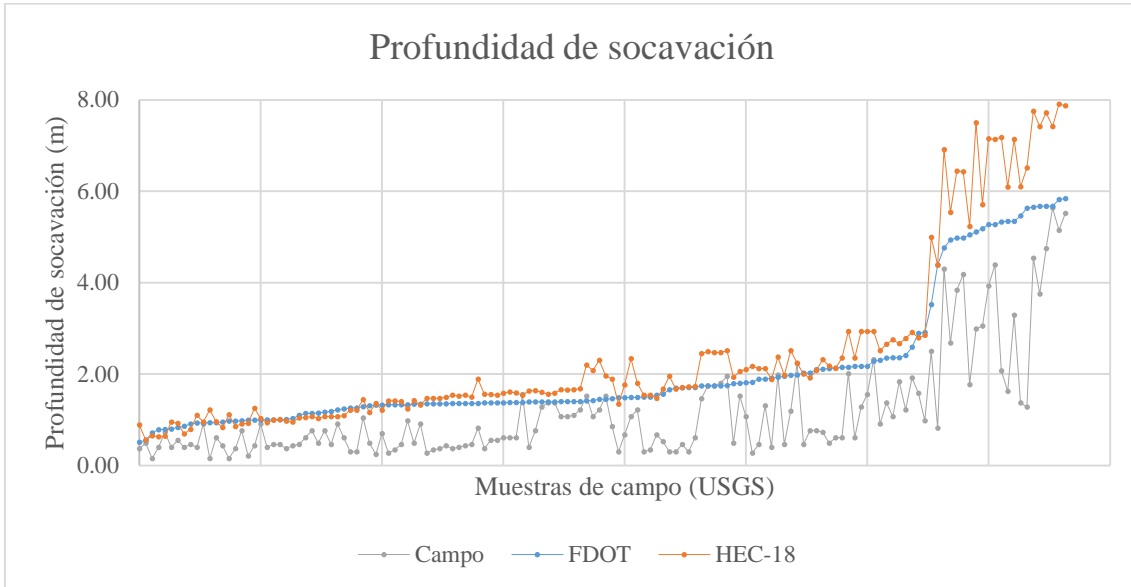


Figura 9. Comparación entre las socavaciones observadas y las determinadas teóricamente.

La tercera forma de comparar las metodologías estudiadas se hizo tomando del Cuadro 6 las columnas 10 = (7)/(9) y 11 = (8)/(9), las cuales son el resultado de dividir las socavaciones determinadas teóricamente entre las socavaciones observadas; es decir, el factor que muestra que tanto sobreestiman (o subestiman) las metodologías comparadas. Con dicha información se elaboró la Figura 10, donde se han ordenado de forma ascendente los datos correspondientes a la metodología del FDOT, para una mejor visualización de los resultados obtenidos, pudiéndose ver que las socavaciones determinadas mediante esta metodología sobreestiman en menor medida que las determinadas mediante el HEC-18.

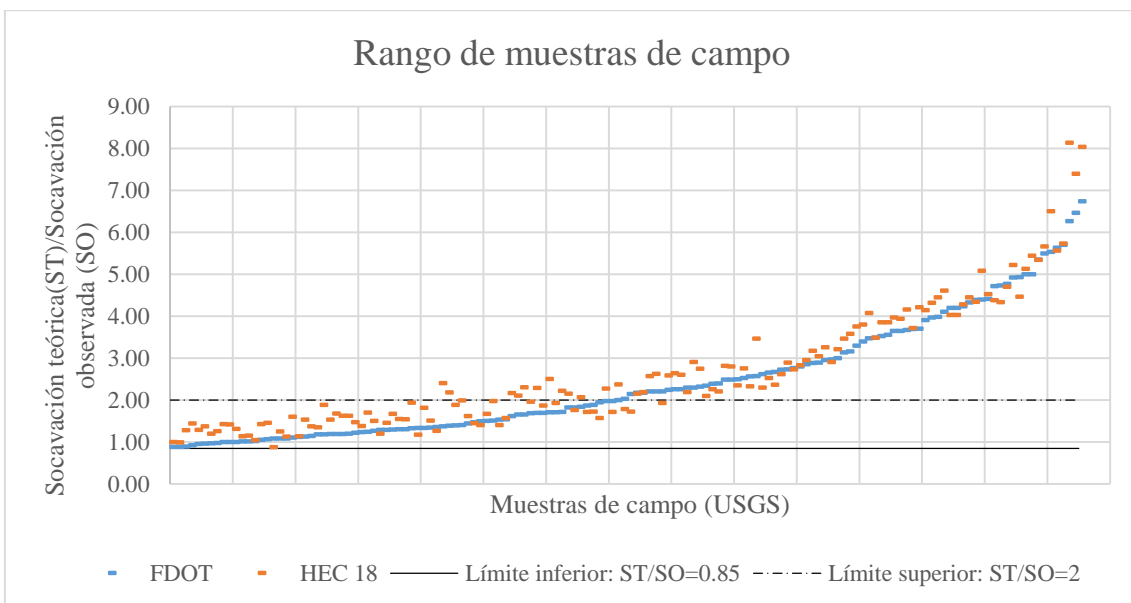


Figura 10. Resultados de dividir las socavaciones determinadas teóricamente entre sus respectivas socavaciones observadas.

Además pueden observarse dos límites, uno inferior donde la socavación determinada teóricamente es igual a 0.85 veces la socavación observada, y uno superior donde la socavación determinada teóricamente es igual a 2 veces la socavación observada. Utilizando esta forma de comparación, se observó que la metodología que mejor desempeño tuvo fue la del FDOT al presentar más resultados dentro de aquel límite, los cuales fueron un 49.3 % del total, frente al 43.2 % que obtuvo la metodología del HEC-18. Esto ha sido plasmado en el Cuadro 7.

Cuadro 8. Porcentaje de muestras que caen dentro y fuera del rango visto.

Límites	FDOT	HEC
85%-200 %	49.3	43.2
>200 %	50.7	56.8
Total	100.0	100.0

4.2 Influencia de la Velocidad Crítica (Vc)

La Velocidad Crítica (Vc) es aquella que permite determinar qué forma de socavación se presenta; es decir socavación de lecho móvil o socavación de agua clara. Si la velocidad crítica es menor a la velocidad del flujo entonces existirá socavación de lecho móvil, en caso contrario estaremos frente a un caso de socavación de agua clara. Hay distintas formas de determinar la velocidad crítica; para el caso del presente trabajo de investigación se ha considerado la propuesta por el FDOT, la cual depende del diámetro medio (D₅₀) del lecho y de la profundidad del flujo (y₁).

Si bien se observó que la metodología que tendía a dar mejores aproximaciones era la propuesta por el FDOT; no obstante, pudo verse también que existían algunos casos donde la metodología del HEC-18 era la que daba mejores resultados. Por tal motivo se analizaron los datos correspondientes a dichos casos, obteniéndose lo siguiente:

Cuadro 9. Muestras donde el HEC-18 presenta mejores resultados que el FDOT.

N°	Datos previos							Socavación		
								Calculada		Observada
	FDOT	HEC-18	FDOT	HEC-18	FDOT	HEC-18	HEC-18			
a (m)	L (m)	y ₁ (m)	V ₁ (m/s)	θ°	D ₅₀ (m)	V ₁ /V _c	y _s (m)	y _s (m)	y _s (m)	
1	2	3	4	5	6	6b	7	8	9	
1	1.52	1.52	0.46	0.27	0	5.8E-04	0.76	0.98	0.91	0.76
2	1.52	1.52	1.22	0.49	0	5.8E-04	1.20	1.48	1.34	0.30

Cuadro 9 (continuación). Muestras donde el HEC-18 presenta mejores resultados que el FDOT.

N°	Datos previos							Socavación		
								Calculada		Observada
	FDOT	HEC-18	y _s (m)							
	a (m)	L (m)		y ₁ (m)	V ₁ (m/s)	θ°	D ₅₀ (m)	V ₁ /V _c	y _s (m)	y _s (m)
1	2	3	4	5	6	6b	7	8	9	
3	1.52	1.52	1.52	0.76	0	5.8E-04	1.84	1.69	1.67	0.30
12	1.52	1.52	1.98	0.98	0	1.8E-03	1.20	2.02	1.92	0.76
13	1.52	1.52	2.29	1.13	0	1.8E-03	1.37	2.10	2.08	0.76
15	1.52	1.52	2.44	1.16	0	1.8E-03	1.39	2.13	2.13	0.61
18	1.52	1.52	1.83	1.10	0	1.8E-03	1.36	2.02	2.00	0.46
25	1.22	1.22	0.64	0.67	0	1.2E-03	1.21	1.26	1.21	0.30
26	1.22	1.22	0.64	0.67	0	1.2E-03	1.21	1.26	1.21	0.30
32	0.69	0.69	1.71	0.66	0	6.9E-04	1.46	1.00	0.94	0.40
37	1.13	1.13	1.55	1.58	0	5.0E-03	1.27	1.91	1.88	0.40
53	0.76	0.76	2.71	0.64	0	9.2E-04	1.17	1.17	1.07	0.76
55	0.91	0.91	6.46	0.53	0	7.0E-04	1.02	1.33	1.24	0.98
56	0.91	0.91	8.02	0.57	0	7.0E-04	1.08	1.34	1.32	0.91
58	0.76	0.76	1.65	0.76	0	4.0E-03	0.67	1.14	1.07	0.76
59	0.76	0.76	1.49	0.24	0	2.5E-04	0.71	0.71	0.65	0.15
60	0.69	0.69	0.88	0.32	0	6.9E-04	0.77	0.79	0.64	0.73
61	0.69	0.69	0.79	0.32	0	6.9E-04	0.78	0.78	0.63	0.40
62	0.69	0.69	1.80	0.69	0	6.9E-04	1.52	1.01	0.97	0.37
63	0.69	0.69	1.55	0.64	0	6.9E-04	1.44	0.99	0.92	0.21
68	0.76	0.76	3.17	1.28	0	4.0E-03	1.03	1.54	1.47	0.67
76	0.69	0.69	1.07	0.50	0	6.9E-04	1.16	0.91	0.79	0.46
77	0.69	0.69	0.88	0.38	0	6.9E-04	0.92	0.86	0.69	0.40
78	0.69	0.69	1.40	0.52	0	6.9E-04	1.18	0.95	0.83	0.43
79	0.69	0.69	1.62	0.52	0	6.9E-04	1.17	0.97	0.85	0.37
88	0.91	0.91	5.12	0.31	0	5.0E-04	0.69	1.03	0.95	0.43
90	0.91	0.91	5.03	0.37	0	7.0E-04	0.73	1.15	1.03	0.49
91	0.91	0.91	5.94	0.38	0	7.0E-04	0.74	1.18	1.07	0.46
93	0.91	0.91	5.33	0.40	0	7.0E-04	0.78	1.22	1.07	0.91
94	0.91	0.91	6.10	0.37	0	7.0E-04	0.71	1.14	1.05	0.61
100	0.91	0.91	5.64	0.33	0	7.0E-04	0.64	1.00	0.99	0.46
116	0.91	0.91	6.34	0.35	0	7.0E-04	0.69	1.10	1.04	0.46
117	0.91	0.91	5.52	0.48	0	7.0E-04	0.93	1.31	1.16	0.49
119	0.91	0.91	5.61	0.41	0	7.0E-04	0.81	1.24	1.09	0.61
123	0.91	0.91	5.76	0.52	0	7.0E-04	1.01	1.32	1.21	0.70
125	4.57	4.57	1.01	1.55	0	3.6E-04	4.46	4.39	4.38	0.82
131	2.13	2.13	9.51	0.85	0	1.3E-03	1.08	2.89	2.79	1.58
132	2.13	2.13	9.85	0.88	0	1.3E-03	1.12	2.91	2.85	0.98

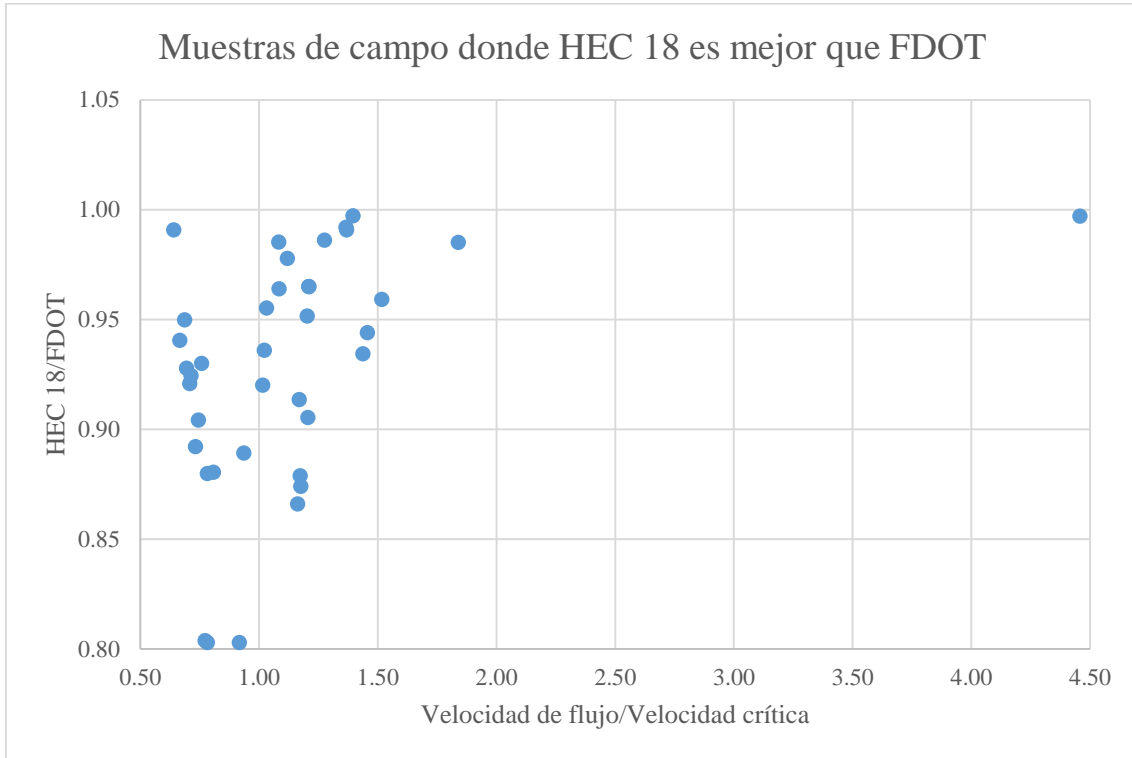


Figura 11. Muestras donde la metodología del HEC-18 da mejores resultados que la del FDOT.

Se puede observar que 34 de los 38 casos corresponden al intervalo $V_1/V_c = [0.65-1.50]$, por lo que este rango es determinante en aquellos casos donde la metodología del HEC-18 suele dar mejores resultados que FDOT.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Con 146 muestras de campo recopiladas en la Base de Datos de Socavación en Pilares de 2014 del USGS correspondientes a pilares circulares emplazados sobre lechos arenosos, se determinó la profundidad de socavación teórica para cada una de ellas, empleando tanto la metodología del HEC-18 como la del FDOT. En el cuadro 10 y en las gráficas 18 y 19, se observa un resumen de los resultados obtenidos:

Cuadro 10. Resumen de los resultados obtenidos de las muestras de campo.

Rango	Pilar		Características del flujo y río				Lecho	Socavación observada
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Ancho a (m)	Forma de la nariz	Profundidad del flujo y_1 (m)	Velocidad media V_1 (m/s)	Número de Froude F	Pendiente del cauce S (%)	Diámetro medio D_{50} (mm)	Profundidad máxima de socavación y_s (m)
Máximo	7.01	Circular	18.80	3.17	0.49	0.20	5.00	5.64
Mínimo	0.69	Circular	0.46	0.24	0.03	0.01	0.15	0.15

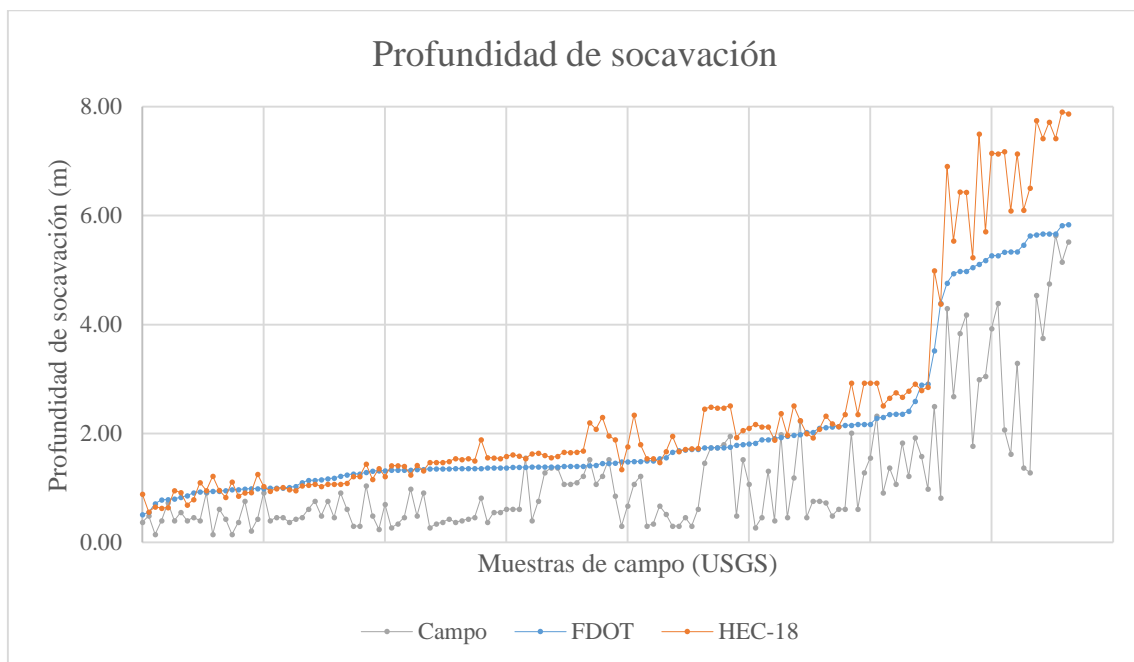


Figura 12. Comparación entre las socavaciones observadas y las determinadas teóricamente.

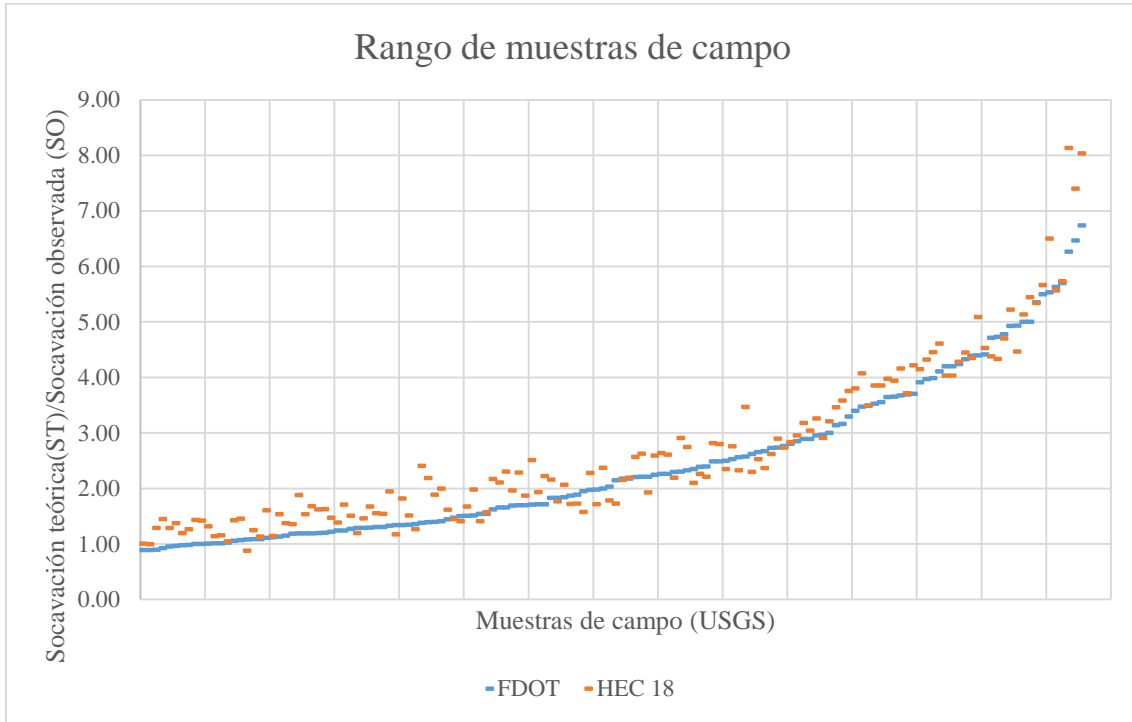


Figura 13. Resultados de dividir las socavaciones determinadas teóricamente entre sus respectivas socavaciones observadas.

- Se hizo un análisis comparativo estadístico, gráfico y tabular, de los resultados obtenidos mediante la aplicación de las metodologías del HEC-18 y del FDOT para el cálculo de socavación alrededor de pilares de puentes, viéndose que para la mayoría de casos la metodología del FDOT fue la que mejores resultados dio, debido a que estos estuvieron más cerca de los observados en la realidad.
- También pudo observarse algunos casos donde la metodología del HEC-18 dio mejores resultados que la del FDOT; estando la mayoría de aquellos casos dentro del rango comprendido entre $V_1=0.65V_c$ y $V_1=1.50V_c$. Lo cual puede observarse en las gráficas 22 y 23.

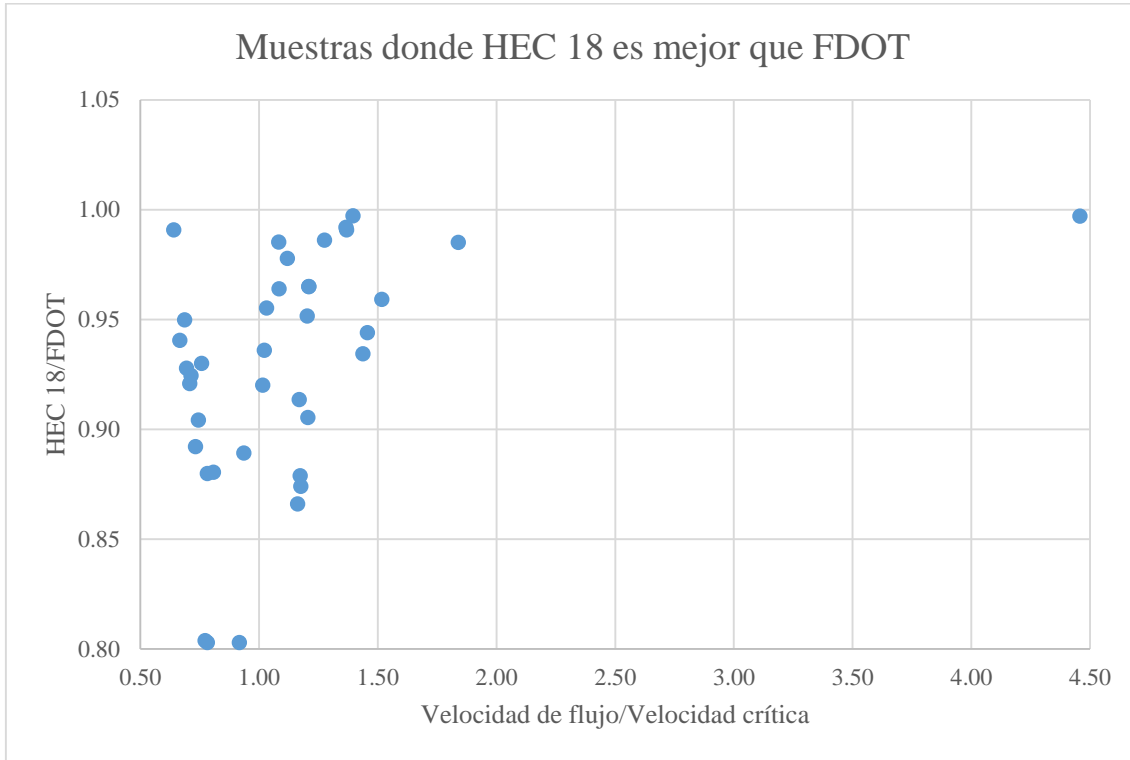


Figura 14. Muestras donde HEC-18 dio mejores resultados que los dados por FDOT.

- Finalmente, en resumen, la conclusión principal fue que para la mayoría de casos la metodología del FDOT es la que mejores resultados da al momento de realizar el cálculo de la profundidad máxima de socavación en un pilar circular cimentado sobre lecho arenoso. No obstante pudo verse también que hubo algunos casos, en los que la velocidad de flujo estaba comprendida entre 0.65 y 1.50 de la velocidad crítica, donde la metodología del HEC-18 fue la que arrojó resultados más precisos. Por lo anterior, se propone una unificación de las metodologías comparadas, siendo ésta la siguiente.

$$\frac{y_s}{a} = 2.5f_1f_2f_3 \quad \text{para } 0.4 \leq \frac{V_1}{V_c} \leq 0.65 \quad (20)$$

$$\frac{y_s}{a} = 2.0 K_3 \left(\frac{y_1}{a}\right)^{0.35} Fr_1^{0.43} \quad \text{para } 0.65 < \frac{V_1}{V_c} < 1.50 \quad (21)$$

$$\frac{y_s}{a} = f_1 \left[2.2 \left(\frac{\frac{V_1-1}{V_c}}{\frac{V_{lp}-1}{V_c}} \right) + 2.5f_3 \left(\frac{\frac{V_{lp}-V_1}{V_c}}{\frac{V_{lp}-1}{V_c}} \right) \right] \quad \text{para } 1.50 \leq \frac{V_1}{V_c} \leq \frac{V_{lp}}{V_c} \quad (22)$$

$$\frac{y_s}{a} = 2.2f_1 \quad \text{para } \frac{V_1}{V_c} > \frac{V_{lp}}{V_c} \quad (23)$$

$$f_1 = \tanh \left[\left(\frac{y_1}{a} \right)^{0.4} \right] \quad (24)$$

$$f_2 = \left\{ 1 - 1.2 \left[\ln \left(\frac{V_1}{V_c} \right) \right]^2 \right\} \quad (25)$$

$$f_3 = \left[\frac{\left(\frac{a}{D_{50}} \right)^{1.13}}{10.6 + 0.4 \left(\frac{a}{D_{50}} \right)^{1.33}} \right] \quad (26)$$

Donde:

y_s = profundidad de socavación (m)

a = ancho del pilar (m)

V_1 = velocidad media de flujo inmediatamente aguas arriba del pilar (m/s)

V_{lp} = velocidad pico de socavación en lecho móvil (m/s)

V_c = velocidad crítica para mover partículas del diámetro medio (m/s)

D_{50} = tamaño medio de las partículas de material del lecho

Fr_1 = número de Froude inmediatamente aguas arriba del pilar = $V_1/(gy_1)^{1/2}$

Cuadro 11. Factor de corrección K3, por condiciones de lecho.

Factor de corrección K3		
Condiciones de lecho	Altura de duna (m)	K3
Socavación en agua clara	N/A	1.1
Lecho plano	N/A	1.1
Dunas pequeñas	$3 > H \geq 0.6$	1.1
Dunas medias	$9 > H \geq 3$	1.1 a 1.2
Dunas grandes	$H \geq 9$	1.3

$$V_{lp} = 5V_c \quad \text{o} \quad 0.6\sqrt{gy_1} \quad (\text{se elige el mayor}) \quad (27)$$

$$V_c = 5.75u_c^* \log \left(5.53 \frac{y_1}{D_{50}} \right) \quad (28)$$

$$u_c^* = K_u (0.0377 + 0.041D_{50}^{1.4}) \quad \text{para} \quad 0.1 \text{ mm} < D_{50} \leq 1 \text{ mm} \quad (29)$$

$$u_c^* = K_u (0.1D_{50}^{0.5} - 0.0213/D_{50}) \quad \text{para} \quad 1 \text{ mm} \leq D_{50} < 20 \text{ mm} \quad (30)$$

$$K_u = 0.3048$$

5.2 Recomendaciones

- Para investigaciones futuras se sugiere hacer el modelamiento de ríos de nuestra realidad nacional para de esa forma poder obtener data que confirme las conclusiones a las que se llegaron con la presente tesis, pero aplicado a la realidad peruana.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Arriagada, E.; Peralta, V. (2008). Error Absoluto y Error Relativo. Santiago de Chile CL, INACAP. 23 p.
2. Aquino Vásquez, DA. (2004). Manual de Construcción de Puentes de Concreto: Componentes Principales del Puente de Concreto. Tesis Ing. Civ. San Salvador, Universidad de El Salvador. 519 p.
3. Arneson, LA; et al. (2012). Evaluating scour at bridges: Pier scour. 5 ed. Fort Collins, US, FHWA (Federal Highway Administration). 340 p.
4. Benedict, ST; Caldwell, AW. (2014). The 2014 USGS Pier-scour database. South Carolina US. USGS (United States Geological Services)
5. Córdova Zamora, M. (2003). Estadística Descriptiva e Inferencial. 5 ed. Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú. 495 p.
6. Gaudio, R; et al. (2010). Comparison of formulae for the prediction of scour depth at piers. Universita della Calabria, IT
7. Guevara, ME. (2003). Socavación en puentes: Formas de socavación. Popayán, CO, Universidad del Cauca.
8. MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, PE). (2016). Manual de ensayo de materiales: Análisis granulométrico de suelos por tamizado. Lima. 1268 p.
9. MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, PE). (2011). Manual de hidrología, hidráulica y drenaje: Parámetros hidráulicos para el diseño de puentes. Lima. 222 p.
10. MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, PE). (2016). Manual de puentes: Estudios de hidrología e hidráulica. Lima. 698 p.
11. Zevenbergen, LW. (2010). Scour and erosion: Comparison of the HEC-18, Melville and Sheppard Pier Scour Equations. Fort Collins, US. 1074-1081