



Estimación de socavación local en Puentes. Caso de Estudio, Río San Pedro, Valle de Sibundoy

Fredy Alejandro Galindo González¹

Francisco Ricardo Mafla Chamorro²

Dickson Arturo Burgos Bastidas³

Daniela Melissa Echeverría Ramírez⁴

Resumen

La estimación de la profundidad de socavación local asociada a un período de retorno de 50 y 100 años en un estudio de caso en el puente sobre el río San Pedro, parte de un análisis hidrológico, hidráulico y la aplicación de una simulación unidimensional con *Hydrological Engineering Center - River Analysis System*. Se valida en la necesidad de realizar un diagnóstico con relación a la presencia de falla hidráulica, considerando la hidrología, sedimentología e hidráulica perenne a la cuenca hidrográfica de la zona de influencia y las condiciones morfométricas actuales de los estribos, evaluando así la profundidad máxima de socavación y, verificando si las especificaciones de diseño hidráulico cumplen con la vigente norma colombiana de diseño de puentes.

La profundidad de socavación medida desde el suelo aledaño a la pata del estribo 2,41 m (estribo izquierdo) y 1,95 m (estribo derecho) mediante el método de Froehlich para un período de retorno $T_r=100$ años, permite concluir que, el empotramiento del estribo (1,5 m) no satisface los requerimientos mínimos de profundidad de 600 mm por debajo de la socavación potencial; por ende, la profundidad de desplante del estribo se encuentra por encima de la línea de socavación estimada que representaría una posible falla hidráulica.

Palabras clave: socavación local; falla hidráulica; estribo de puente; erosión; deposición.

¹ Universidad Mariana, Programa de Ingeniería Civil, Colombia. Correo: fagalindo@umariana.edu.co

² Universidad Mariana, Programa de Ingeniería Ambiental, Colombia. Correo: fmaffla@umariana.edu.co

³ Universidad Mariana, Programa de Ingeniería Civil, Colombia. Correo: dicburgos@umariana.edu.co

⁴ Universidad Mariana, Programa de Ingeniería Civil, Colombia. Correo: daecheverria@umariana.edu.co.



Introducción

En la historia, los puentes en el mundo evidencian que la socavación es estadísticamente la principal causa de fallas provocadas en las pilas y estribos, debido a que, gran parte de los diseños no están adecuados a la capacidad de los ríos aluviales, dando como resultado, la socavación de las fundaciones y cimientos en las estructuras hidráulicas (Martínez y Ramírez, 2000). Colombia no es la excepción y, según estudios realizados desde el año 1986, aproximadamente el 64 % de colapso de puentes se debe, principalmente, a problemas de socavación y sobrecarga hidráulica, como consecuencia del desbordamiento de cauces por inundación (Bedoya y Cerón, 2015). Actualmente, la tecnología disponible no se ha desarrollado suficientemente para proporcionar estimados de socavación confiables en condiciones tanto variables como complejas por espacio y tiempo, como sucede en la dinámica e incluso, en el entorno de los ríos. Así, se hace necesario estudiar este fenómeno usando modelos numéricos y computacionales que permitan caracterizar y predecir de manera aproximada la forma de la socavación local de acuerdo con la interacción entre el comportamiento del transporte sedimentológico, las particularidades del flujo (época de estiaje y creciente) y las características propias de las condiciones de la zona en estudio (Ochoa, 2017).

Bajo este planteamiento, se despliega una actividad investigativa pretenciosa que permite proponer una metodología para determinar la profundidad de socavación, como resultado de analizar la base del estribo del puente sobre el río San Pedro en el Valle de Sibundoy, junto a la influencia de los parámetros geomorfológicos, geotécnicos, hidráulicos y morfométricos en la modelación con HEC - RAS (*Hydrological Engineering Center - River Analysis System*), que permite simular flujos en cauces naturales o canales artificiales.

Para el desarrollo de la investigación se ha determinado aspectos claramente definidos y estructurados que se detalla a continuación: en la primera parte se desarrolla la metodología bajo la que se delimita el sistema, se define los indicadores de acuerdo con el Código Colombiano de Puentes (CCP, Instituto Nacional de Vías, INVÍAS, 2015), se recolecta los datos requeridos mediante muestreo e información contrastada por las autoridades autónomas regionales (Corpoamazonia) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM); posteriormente, se procesa meticulosamente los parámetros topográficos, hidrológicos, geotécnicos e hidráulicos obtenidos, se presenta la modelación hidráulica utilizando el software HEC - RAS y modelos empíricos. En la cuarta parte se oficializa las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

Desarrollo

La investigación es de tipo analítico - evaluativo con fase descriptiva, a partir de datos cuantitativos que permiten realizar la estimación y valoración de la profundidad de socavación existente en el caso de estudio. Inicialmente, se hace





una revisión bibliográfica con relación al tema de socavación y del estado actual del puente, desde su morfometría hasta el comportamiento estructural, con el fin de determinar aquellas variables de influencia que se debía tener en cuenta para poder alcanzar el objetivo general. Posteriormente, mediante actividades de campo se permite un reconocimiento de la zona, además de la recolección de datos topográficos mediante el uso de una estación topográfica a lo largo de, aproximadamente, 200 m en el tramo de estudio.

Por otra parte, se efectúa un análisis hidrológico, con el objetivo de identificar el caudal de diseño en función de tiempos de retorno de 50 y 100 años, basados en datos recolectados de la estación de climatología ordinaria Michoacán (Cod: 4701504). En esta etapa de la investigación se establece la precipitación máxima en 24 horas, datos a los cuales se aplica las pruebas de homogeneidad (Helmert (1), T Student (2), Cramer (3) e independencia (Wald-Wolfowitz (4), Anderson (5), para poder verificar su validez y luego, realizar el análisis estadístico correspondiente.

Seguidamente, se aplica las funciones de distribución de probabilidad de Gumbel (6) y Log Pearson III (7), que permitieron efectuar la proyección de precipitación máxima para diferentes períodos de retorno, datos que fueron debidamente validados mediante una prueba de bondad de Kolmogorov-Smirnov (8) en donde se confirmó su confiabilidad, para continuar con el análisis. Finalmente, se estableció el tiempo de concentración a partir de la ecuación propuesta por Bransby-Williams (9) mediante la cual se puede generar las curvas IDF (intensidad - duración - frecuencia), aplicando la metodología de Gustavo Silva (10) y después, los hietogramas de diseño por el método de los bloques alternos.

Por último, se realiza la modelación de la socavación en el caso de estudio, haciendo uso del software HEC-HMS y HEC- RAS a partir de los datos recopilados, los análisis hidrológico e hidráulico de los mismos y, la confirmación o discusión de los resultados, considerando la norma colombiana vigente e investigaciones similares.

Ecuaciones prueba de homogeneidad

- Helmert

$$-\sqrt{n_j - 1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n_j - 1} \quad (1)$$

- T de Student

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 \cdot s_1^2 + n_2 \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} * \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \quad (2)$$

\bar{x}_1, S_1^2 : son la media y la varianza de la primera parte del registro de tamaño n_1

...donde: \bar{x}_2, S_2^2 : son la media y la varianza de la segunda parte del registro de tamaño n_2

- Cramer

$$\bar{Q}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{Q_i^j}{n_j} \quad (3)$$

Ecuaciones Prueba de independencia

- Wald-Wolfowitz

$$Z = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R^2} \quad (4.1)$$

...donde: R corresponde al número total de corridas observadas; el valor medio de R está dado por la siguiente expresión:

$$\mu_R = \frac{2 * n_1 * n_2}{n} + 1 \quad (4.2)$$

La desviación estándar de R está dada por la expresión:

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{(\mu_R - 1)(\mu_R - 2)}{n - 1}} \quad (4.3)$$

- Anderson

$$r_{kj} = \sum_{i=1}^{n_j} Q_{ij} - Q_j * Q_i + k_j - Q_j i = \sum_{i=1}^{n_j} Q_{ij} - Q_j^2 \quad (5.1)$$



Para: $k = 1, 2, \dots, \frac{n_j}{3}$

$$\bar{Q}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{Q_i^j}{n_j} \quad (5.2)$$

- Gumbel

$$Y_i = a(X_i - X_f) \quad (6.1)$$

$$a = \frac{S_n}{S} \quad (6.2)$$

$$X_f = \bar{X} - S \frac{Y_n}{S_n} \quad (6.3)$$

...donde: \bar{X} : Promedio aritmético de la muestra.

S : Desviación estándar o típica de los datos de la muestra.

X_i : Datos de la muestra, desde "i" igual a uno (1) hasta "n".

Y_n, S_n : Media y desviación estándar de la variable reducida "y".
Dependen del número de años de registros de la muestra "n".

X_f, a : Parámetros que dependen del número de años de la muestra y de Y_n, S_n, \bar{X} y S

- Log Pearson III

Se transforma las n magnitudes de los valores máximos anuales hidrológicos a sus valores logarítmicos (base 10) Y_i :

$$y_i = \text{Log} X_i, \text{ para } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7.1)$$

Se calcula la media de los logaritmos, \bar{Y} :

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad (7.2)$$



Se calcula la desviación típica de los logaritmos, S_y :

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n - 1}} \quad (7.3)$$

$$C_s = \frac{n \sum_{i=0}^n (y_i - \bar{Y})^3}{(n - 1)(n - 2)S_y^3} \quad (7.4)$$

Se calcula el valor de la variable transformada y para un período de retorno (T):

$$Y_T = \bar{Y} + S_y K_T \quad (7.5)$$

...en donde el factor de frecuencia (K_T) se obtiene con el coeficiente de asimetría (C_s) y el período de retorno (T) (o la probabilidad de excedencia) conocidos (INVÍAS, 2013)

Se calcula el valor de la variable original con un período de retorno T:

$$X_T = \text{Antilog } Y_T \quad (7.6)$$

- Kolmogorov- Smirnov

$$D = \sup_{1 \leq i \leq n} |F_n(x_i) - F_o(x_i)| \quad (8)$$

...donde: x_i : valor i-ésimo observado en la muestra (ordenada de mayor a menor)

$F_i(x_i)$: función de probabilidad estimada

$F_o(x_i)$: función de probabilidad observada

- Bransby -Williams

$$Tc = 14,6 \times L \times A^{-0,1} \times S^{-0,2} \quad (9)$$

...donde: A área de la cuenca (km^2)

L es la longitud del cauce principal (km)

S es pendiente media del cauce (%)

- Gustavo Silva

(10)

$$I = \frac{K}{(t + b)^n}$$

...donde: K: Constante (relación precipitación máxima en 24 horas)
 t: tiempo (min)
 b y n: Constantes (10 y 0,5 respectivamente)

Resultados

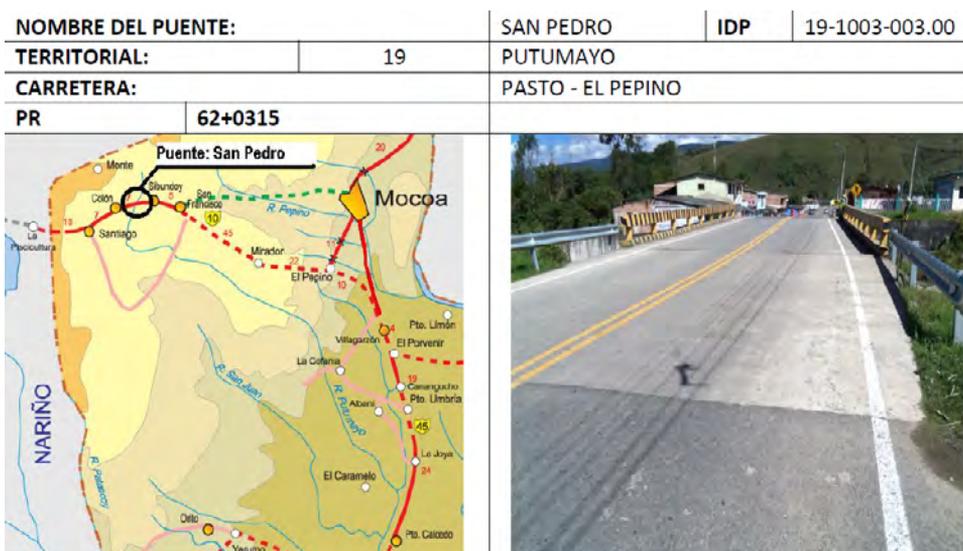
En el marco de este capítulo se describe los resultados y las predicciones obtenidas dentro de la línea metodológica para estimar la profundidad crítica de socavación en los estribos del puente sujeto a estudio.

Descripción del estado actual del puente. Se presenta a continuación, las características representativas actuales del puente sujeto a estudio, considerando la información recopilada y la visita de campo.

Identificación de la estructura vial. En la Figura 1 se muestra la información que permite identificar al puente sobre el río San Pedro, Valle de Sibundoy y los corredores de ruta dentro de la zona de influencia directa, en las bases de datos de Instituto Nacional de Vías.

Figura 1

Localización espacial de puente San Pedro



Fuente: INVÍAS (2020)



Características actuales del puente. El puente es de una luz y dos carriles, con una longitud y ancho de tablero de 20,60 m y 10,04 m, respectivamente; bordillos con un ancho de 0,30 m y altura de 0,20 m y cuatro vigas principales en concreto reforzado, simplemente, apoyadas con separación entre ejes de 2,50 m (sección de 0,40 m x 1,30 m).

Consideraciones de los estribos. En la visita de programa de campo se evidencia la tendencia en el estribo de salida (lado izquierdo) a presentar socavación ocasionada por el cauce. Según se aprecia en la Figura 2, la altura promedio de los estribos en concreto reforzado es de 2,75 m, con un ancho de 10,04 m. En la cimentación de los estribos se observa obras adicionales de protección en concreto ciclópeo con longitud de 6,0 m, altura de 1,50 m y espesor de 1,0 m para protección del cauce (ver Figura 2).

Figura 2

Inspección in situ de los estribos



Fuente: elaboración propia

Registro fotográfico. Para validar la inspección inicial y documentar adecuadamente la experiencia, se genera un registro fotográfico sobre los parámetros objeto de estudio y otras particularidades de la zona de influencia, desde la superestructura, la infraestructura y el cauce (ver Figura 3).



Figura 3

Inspección in situ de la superestructura, la infraestructura y el cauce



Fuente: elaboración propia

Análisis hidrológico de la cuenca hidrográfica. A continuación, se presenta la identificación y recopilación de la información de las estaciones climatológicas e hidrométricas del área aferente de la zona de estudio operadas por el IDEAM (ver Figura 4), obteniendo como información base, la precipitación máxima en 24 horas.

Figura 4

Delimitación cuenca alta río San Pedro - Estación meteorológica e hidrológica Michoacán



Fuente: Google Earth

Los valores medios de precipitación máxima en 24 horas para la estación ordinaria Michoacán (Cod: 4701504), corresponde a, que los mayores valores se encuentran en los meses de abril a agosto, presentando precipitaciones mayores a los 28 mm/día en promedio, mientras que el resto del año evidencia precipitaciones mayores a los 20 mm/día (ver Tabla 1).

**Tabla 1**

Valores medios de precipitación máxima en 24 horas (Estación de Michoacán)

Valores medios mensuales de precipitación en 24 horas													Estación: 47015040 Michoacán	
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Total		
21,4	22,3	24,4	29,3	30,7	30,4	31,1	28,9	21,2	23,6	23,9	22,4	46,8		

Fuente: elaboración propia

Se deduce que, en los meses de mayor intensidad de precipitación, existirá mayor susceptibilidad en promedio de presentarse alguna eventualidad de fenómenos de socavación.

Análisis estadísticos de datos hidrológicos. La validación y/o confirmación de una serie de datos se lleva cabo mediante pruebas estadísticas de homogeneidad (ver Tabla 2) e independencia (ver Tabla 3), tales como pruebas de Helmert, Cramer, T de Student, corridas de Wald-Wolfowitz y Anderson, entre otras, para lo cual estadísticamente se establece que, la serie de datos meteorológicos analizados para la zona de estudio es considerada homogénea e independiente y, por ende, es válida para ser empleada en el estudio de análisis de frecuencias.

Tabla 2

Análisis prueba de homogeneidad

Prueba de Homogeneidad					
Helmert		T Student		Cramer	
Precip. Promedio=	47,08	v =	39	tw=	0,68
S=	21	td =	0,10	t Student=	0,91
C=	19	T Student =	0,91		
Serie Homogénea					

Fuente: elaboración propia

**Tabla 3***Análisis prueba de independencia*

Prueba de Independencia						
Corridas		Anderson		Wald-Wolfowitz		
n=	41	V=	0,33	Alfa=	0,05	
Estadístico=	1,14	Vcrit=	-1,28	1,28	Estadístico=	0,15
Valor en tablas=	1,96	Alfa=	0,1	Valor en tablas=	1,96	
Serie independiente						

Fuente: elaboración propia

Análisis de frecuencias. Procede a desarrollarse para las precipitaciones registradas para la estación Michoacán (Cód: 47015040), con registro de datos de 41 años consecutivos, de tal manera que presenta un valor inferior a 0.2 en la prueba de bondad de Kolmogorov-Smirnov, lo que permite deducir que hay una confiabilidad del 99 % en el ajuste realizado (ver Tabla 4). Con base en lo anterior, es válido afirmar que, obtener una alta confiabilidad de los resultados permite que sean consideradas confiables, las proyecciones realizadas a través de funciones de distribución de probabilidad (FDP).

Tabla 4*Proyecciones de precipitación máxima - Estación Michoacán*

	Gumbel		Log-Pearson III	
	Tr (años)	Precipitación mm/día	Tr (años)	Precipitación mm/día
Michoacán (47015040)	2	44,64	2	43,00
	5	60,22	5	73,32
	10	70,54	10	67,94
	25	83,57	25	81,19
	50	93,24	50	91,00
	100	102,84	100	100,69
	Kolmogorov	0,11	Kolmogorov	0,12

Análisis de tiempo de concentración. Con el objetivo de obtener el análisis de lluvias y generar los hietogramas de diseño para diferentes tiempos de retorno, es pertinente estimar el valor del tiempo de concentración mediante la aplicación de la ecuación empírica propuesta por Bransby-Williams, la cual presenta un mejor ajuste en su resultado, con relación a las características que presenta la cuenca hidrográfica (ver Tabla 5).

**Tabla 5**

Caracterización dimensional de la zona de estudio

Cuenca hidrográfica		Cauce	
Área (ha)	Perímetro (Km)	Longitud (Km)	Pendiente media (%)
6038,6	36,91	16,32	9,29

Fuente: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y Corporación Vallecaucana de las Cuencas Hidrográficas y el Medio Ambiente (Corpocuenas), (2008); Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Corporación para el desarrollo sostenible del sur de la Amazonía, (2009)

$$T_c = 14,6 \times 16,32 \times 54,49^{-0,1} \times 9,29^{-0,2} = 102,323 \text{ min}$$

$$T_c = 1,7 \text{ horas}$$

Curvas IDF. Con el objetivo de identificar la intensidad de lluvia expresada en milímetros por hora para una determinada duración, considerando una probabilidad de ocurrencia expresada en años, que se denomina período de retorno, el estudio enfatiza en evaluar los resultados de la investigación para los períodos de retorno, comprendidos por 50 y 100 años, respectivamente (ver Tabla 6). Las curvas IDF, resultado de análisis, corresponden a la Figura 5, más adelante.

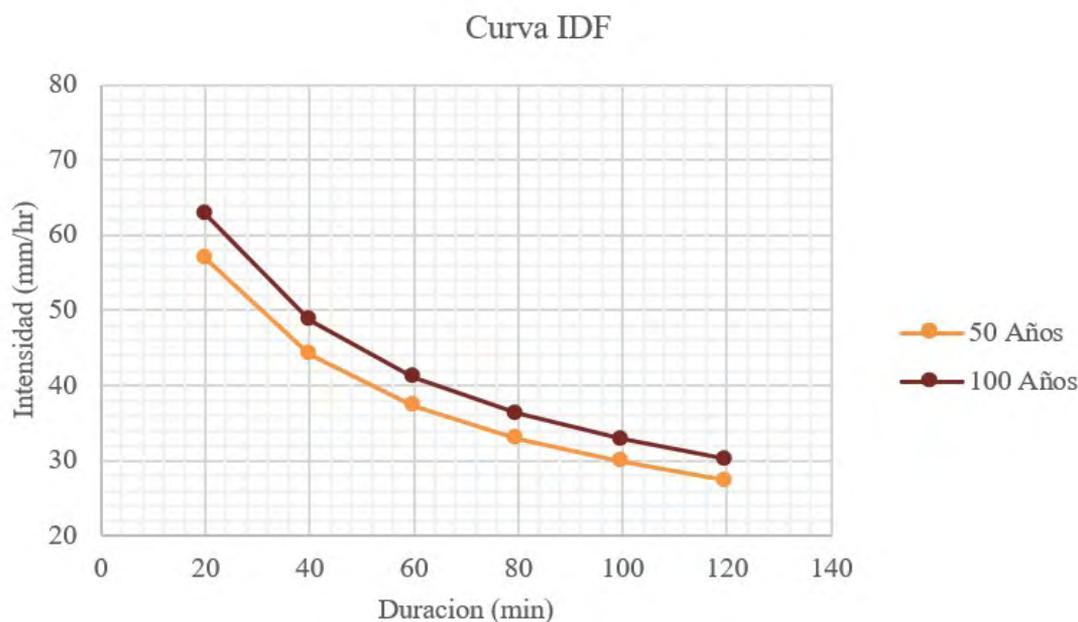
Tabla 6

Resultados intensidad de precipitación

Duración		Intensidad de Prec. (mm/24 horas) / Tr. (años)	
hr	min	50	100
0,3	20,00	56,970	62,835
0,7	40,00	44,129	48,671
1,0	60,00	37,296	41,135
1,3	80,00	32,892	36,278
1,7	100,00	29,752	32,814
2,0	120,00	27,367	30,185

**Figura 5**

Curva intensidad - duración - frecuencia



Hietograma de Diseño. Consiste en determinar la precipitación de caída en cada intervalo de tiempo establecido, a partir de la intensidad y la duración; para este caso, se realiza cada 20 minutos, hasta llegar al valor del tiempo de concentración calculado previamente, correspondiente a dos horas (ver Tablas 7 y 8; Figuras 6 y 7).

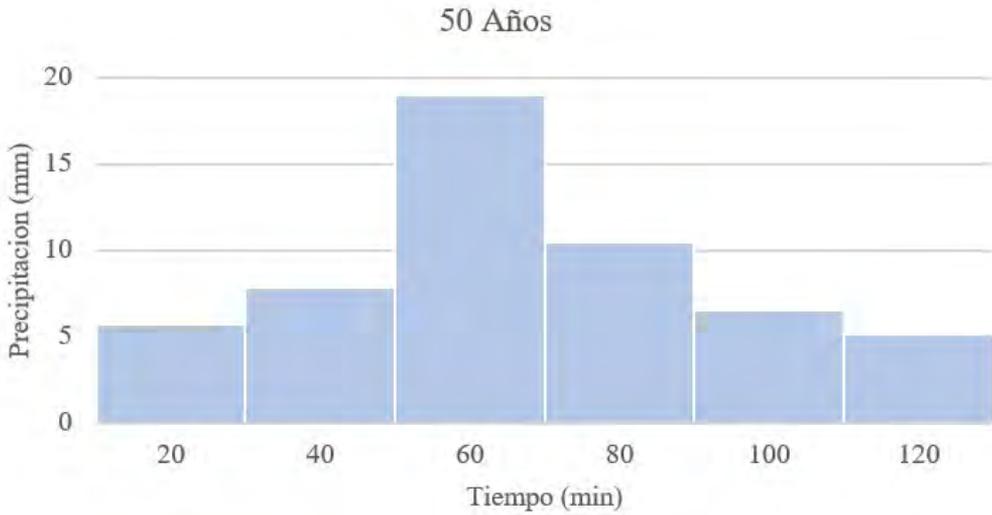
Tabla 7

Hietograma de precipitación Tr: 50 años

T=50 Años					
Tiempo (hr)	Tiempo (min)	Intensidad P (mm/hr)	P(mm)	ΔP (mm)	Met. BA
0,3	20,0	56,97	18,99	18,99	5,73
0,7	40,0	44,13	29,42	10,43	7,88
1,0	60,0	37,30	37,30	7,88	18,99
1,3	80,0	32,89	43,86	6,56	10,43
1,7	100,0	29,75	49,59	5,73	6,56
2,0	120,0	27,37	54,73	5,15	5,15

**Figura 6**

Hietograma de precipitación Tr: 50 años

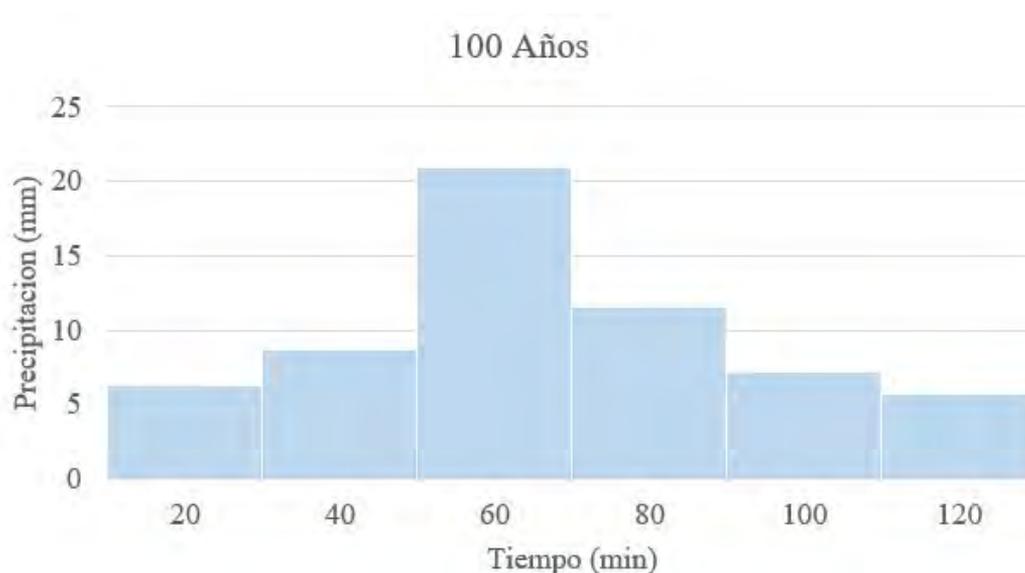
**Tabla 8**

Hietograma de precipitación Tr: 100 años

T=100 Años					
Tiempo (hr)	Tiempo (min)	Intensidad P (mm/hr)	P(mm)	ΔP (mm)	Met. BA
0,3	20,0	62,83	20,94	20,94	6,32
0,7	40,0	48,67	32,45	11,50	8,69
1,0	60,0	41,13	41,13	8,69	20,94
1,3	80,0	36,28	48,37	7,24	11,50
1,7	100,0	32,81	54,69	6,32	7,24
2,0	120,0	30,18	60,37	5,68	5,68

**Figura 7**

Hietograma de precipitación Tr: 100 años



Caudal de diseño. El caudal de diseño asociado a un período de retorno de 50 y 100 años se determina mediante el software computacional HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center's-Hydrologic Modeling System*), considerando las condiciones meteorológicas, morfométricas, curva, número, tiempo de medición, series de tiempo, los hietogramas de diseño, 50 y 100 años, respectivamente. A continuación, se presenta el caudal de diseño asociado a un período de retorno:

Tabla 9

Caudal de diseño

Período de retorno Tr (años)	Caudal de diseño (m ³ /s)
50	200
100	250

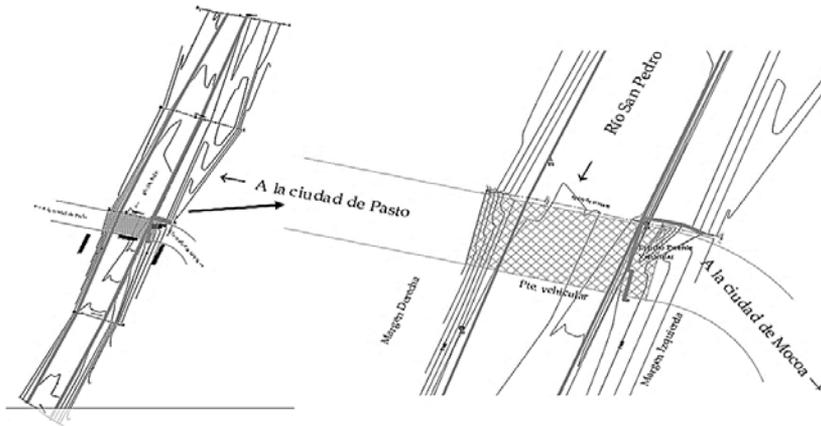
Análisis Hidráulico Área de Estudio. Seguidamente, se desarrolla un análisis hidráulico, considerando la velocidad de la corriente del caudal de diseño, la morfometría y el alineamiento de los estribos del puente sobre el río San Pedro. Su respectivo análisis se detalla mediante el software computacional HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center y River Analysis System*).

Levantamiento topográfico. Se detalla el dimensionamiento del tramo de estudio mediante levantamiento topográfico, identificando la morfometría y el diseño principal del puente, contemplando como medición, cinco secciones transversales cada 50 metros (dos secciones aguas arriba, dos secciones aguas abajo y una sección en el puente objeto de estudio):



Figura 8

Topografía área de estudio

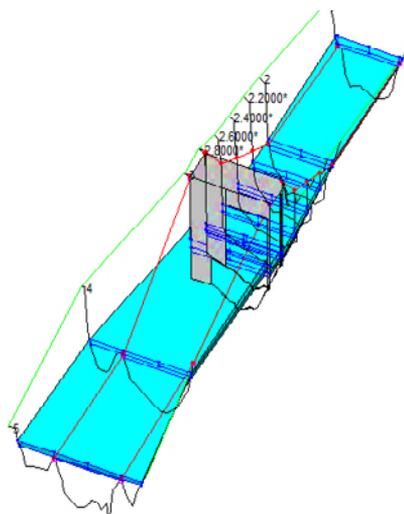


Análisis de sedimentos. Se realiza una toma de muestras en campo mediante apiques en zonas representativas del cauce, que permiten conocer las propiedades físicas de los sólidos transportados y sedimentados por la corriente. En el presente estudio, el agua fluye por el cauce, el cual se contempla como punto estratégico para la toma de muestras; el material disponible está en la capa superficial del lecho, a una distancia de 30 cm en proximidades del estribo y a una profundidad de 50 cm. Una vez llevado a cabo el análisis granulométrico mediante la norma INV E 123-13 (Universidad de La Salle, 2013), se determina que, por medio del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.S.C.) se tiene una arena mal graduada con limo, con grava SP SM, mientras que, mediante la clasificación AASHTO “A-2-7”, se tiene grava y arena arcillosa o limosa.

Modelación HEC-RAS Unidimensional. Como se muestra en la Figura 9, la configuración corresponde al río San Pedro para el tramo de estudio, que cuenta con una longitud total de 200 m. Se evalúa el comportamiento hidráulico en las secciones correspondientes, entre las cuales se ubica el puente objeto de estudio.

Figura 9

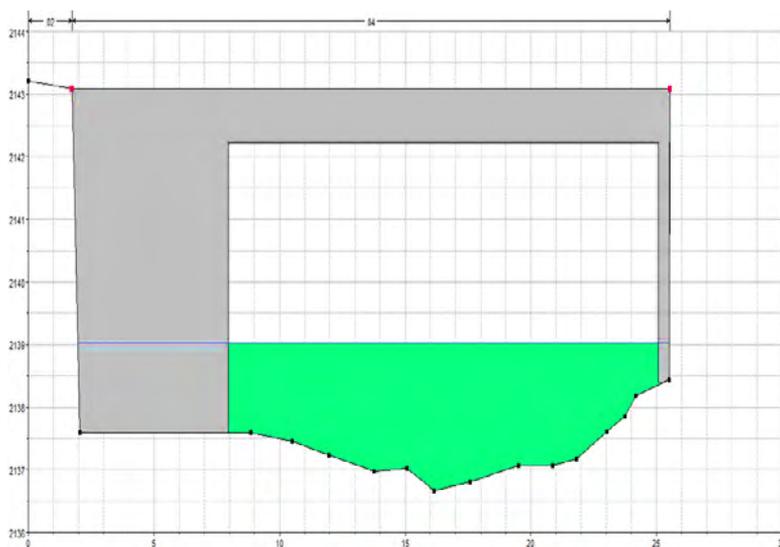
Modelación unidimensional (1D) tramo de estudio



Para el tramo de estudio, el perfil hidráulico evaluado a un período de retorno de 50 años, al cual le corresponde un caudal de $115,90 \text{ m}^3/\text{s}$, se observa que no presenta desbordamiento en toda la sección, con una condición de flujo subcrítico para las secciones 100 y 50 m aguas arriba y en la sección de la estructura, dado que hay velocidades bajas, mientras que, para las secciones 50 y 100 m aguas abajo, se presenta un flujo crítico, considerando una velocidad total de flujo de $3,94 \text{ m/s}$ y una profundidad de $1,44 \text{ m}$ (ver Figura 10).

Figura 10

Modelación unidimensional (1D) - Tr 50 años

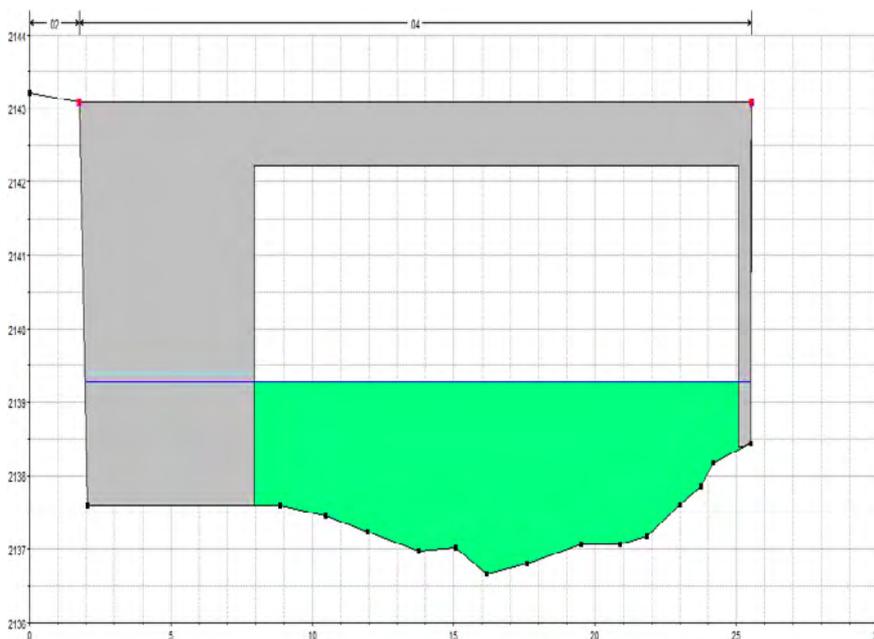




En cuanto al perfil hidráulico correspondiente a un período de retorno de 100 años, al cual le concierne un caudal de $137,10 \text{ m}^3/\text{s}$, se evidencia desbordamiento en toda la sección, con una condición de flujo subcrítica para las secciones 50 y 100 m aguas arriba, sección de estructura de puente, debido a que se registra velocidades pequeñas y, una condición de flujo supercrítico para las secciones 50 y 100 m aguas abajo, donde se registra velocidades grandes, considerando una velocidad total de flujo a lo largo del tramo de estudio de $4,14 \text{ m/s}$ y una profundidad de $1,69 \text{ m}$ en la sección de la estructura (estribo). Con base en lo anterior, se precisa la eventualidad del arrastre de material portante en el estribo del puente, ocasionando socavación local, lo que conduce a desestabilizar la estructura (ver Figura 11).

Figura 11

Modelación unidimensional (1D) - Tr 100 años



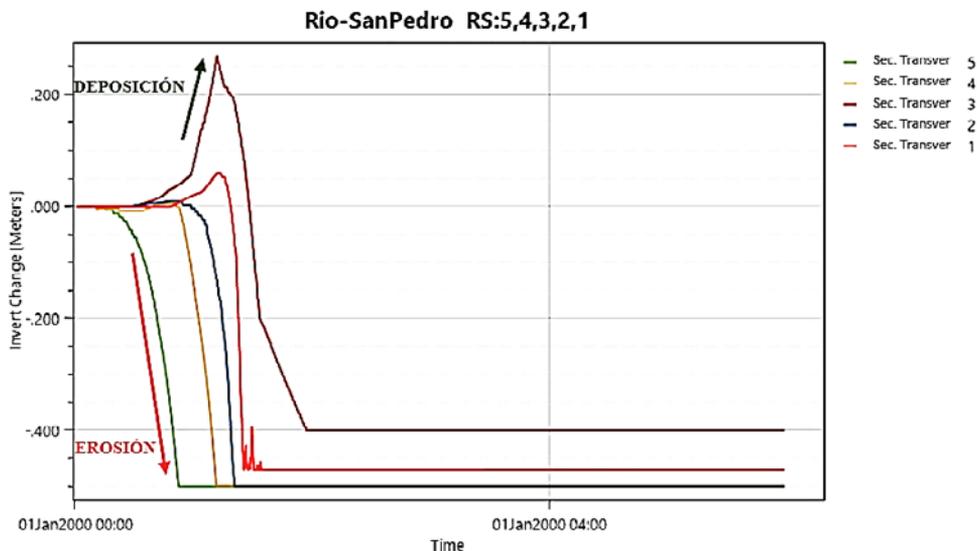
Análisis de transporte de sedimentos. Se desarrolla mediante la simulación de los procesos de socavación, transporte y sedimentación en el tramo de estudio, evaluado a través de la ecuación empírica de Laursen en el software computacional HEC-RAS, debido a que sus condiciones y especificaciones de aplicación se ajustan a las características de la zona de influencia. Se hace una representación del cambio de masa del material de fondo, lo que representa una degradación y arrastre del material en el período evaluado (6 horas), afirmando que, el tramo en estudio comprende un lecho móvil.

Simulación del transporte de sedimentos para un período de retorno de 100 años con una duración de seis horas, cuyo fin es evaluar el comportamiento del lecho del río, en donde se puede evidenciar las cinco secciones transversales que abarcan los 200 metros del tramo de estudio (ver Figura 12). Conviene precisar

que, un comportamiento descendente hace referencia a la existencia de erosión del material de fondo, mientras que, un comportamiento ascendente significa que se presenta deposición de material en el lecho del río.

Figura 12

Modelación - Análisis de transporte de sedimentos



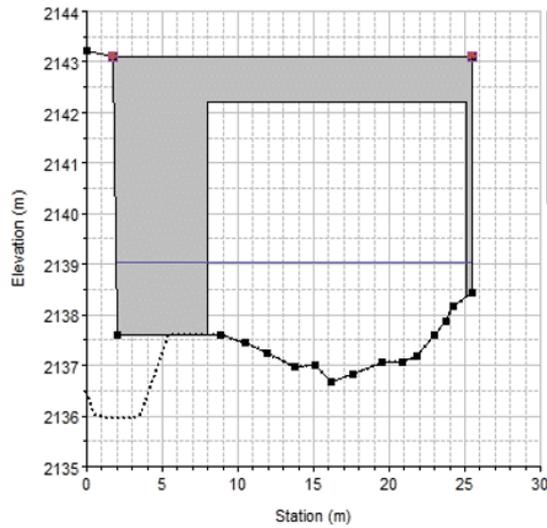
En la sección transversal No. 5 (100 m aguas arriba) y en la sección transversal No. 4 (50 m aguas arriba) se presenta una erosión máxima de 0,5 m en tan solo una hora, en tanto que, para la sección transversal No. 3 (sección de estructura hidráulica - puente) se da una deposición de material de 0,23 m en el lecho del río, en un lapso de tiempo de 1,30 horas, debido a la existencia de la estructura (estribo), lo cual obstruye el paso normal del flujo, ocasionando acumulación de material de arrastre. Por otra parte, debido a condiciones hidráulicas (velocidad), hay erosión de 0,68 m, eliminando el material de apoyo de la estructura y ocasionando socavación local, que conlleva un posible riesgo, produciendo liberación de material en la base de cimentación.

Profundidad de socavación – Modelación HEC–RAS Unidimensional. El software determina la profundidad de socavación mediante la ecuación de Froehlich (1989), método empleado en el análisis para Tr 50 años (ver Figura 13), alcanzando una profundidad de socavación de 1,65.



Figura 13

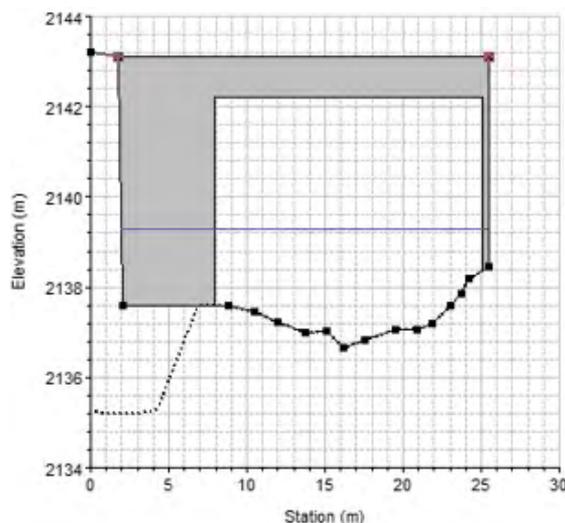
Profundidad de socavación – Tr 50 años



En lo correspondiente al Tr 100 años (ver Figura 14), se determina una profundidad de socavación de 2,41m. De otro lado, empleando modelos matemáticos de estimación de profundidad de socavación, se determina que las metodologías con valores más cercanos entre sí, son las de Liu et al. (citados por Esteves, 2019), siendo los datos más representativos para el análisis de la profundidad de socavación en el estribo; no obstante, después de realizar una revisión bibliográfica con relación a investigaciones similares de socavación, se plantea que, la veracidad de los resultados de dichas ecuaciones o la elección del método a aplicar dependerá, finalmente, del buen criterio del investigador, en función del conocimiento y las limitaciones del caso de estudio.

Figura 14

Profundidad de socavación – Tr 100 años





Conclusiones

El empotramiento del estribo del puente del río San Pedro en el Valle de Sibundoy (1,5 m) no satisface los requerimientos mínimos de profundidad de 600 mm por debajo de la socavación potencial.

La intensidad de flujo determina la capacidad de arrastre del material de fondo; así, a mayor intensidad de flujo, se obtendrá mayor socavación y, viceversa. Para el desarrollo del presente estudio se considera importante el caudal (factor de transporte), tamaño de sedimento (características del lecho) y el ancho del cauce (factor geomorfológico).

Para futuros estudios, se recomienda examinar la influencia de las diferentes formas de estribos de puentes, puesto que solo se analiza la forma rectangular.

La mayoría de los métodos disponibles para determinar la profundidad de socavación están basados en estudios y análisis desarrollados que emplean como material de fondo, el material granular sin cohesión, lo que lleva a sobredimensionar los resultados obtenidos, dando una interpretación desenfocada al verdadero fenómeno de socavación.

Referencias

- Anónimo. (s.f.). Plan de ordenación y manejo ambiental de la cuenca del río San Pedro. Cartilla para la orientación y actuación comunitaria. https://es.scribd.com/doc/16048666/Plan-de-Ordenacion-y-manejo-ambiental-de-la-cuenca-del-rio-san-Pedro?secret_password=nqlrq1gyujb12l56n7w
- Bedoya, J. S. y Cerón, S. (2015). *Modelación numérica de la socavación local en los estribos del puente sobre el río Sunuba según las características hidrodinámicas de la zona* [Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Javeriana]. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/21400>
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y Corporación Vallecaucana de las Cuencas Hidrográficas y el Medio Ambiente (Corpocuenas). (2008). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica de la Quebrada San Pedro*. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC y Corporación Vallecaucana de las Cuencas Hidrográficas y el Medio Ambiente - CORPOCUENCAS.
- Esteves, M. Á. (2019). *Evaluación de métodos para el cálculo de la socavación en puentes. caso del puente sobre el río Shanusi en el distrito de Yurimaguas, provincia de Alto Amazonas, 2018* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Trujillo, UNT]. <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/12026?show=full>
- Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). (2013). Manual de drenaje para carreteras. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/984-manual-de-drenaje-para-carreteras>



- Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). (2015). Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP14. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/3709-norma-colombiana-de-diseno-de-puentes-ccp14>
- Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). (2020). Inventario de puentes. Red Nacional de Carreteras. <https://www.invias.gov.co/index.php/inventario-de-puentes-red-nacional-de-carreteras>.
- Martínez, L. Y. y Ramírez, J. A. (2000). *Estudio del comportamiento de la socavación en la vecindad de los espolones en el río Magdalena en el sector Puerto Carmelitas - Puerto Casabe* [Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander]. <https://es.slideshare.net/MIGUELDELAPEATRIANA/2-112666>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Corporación para el desarrollo sostenible del sur de la Amazonía. (2009). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca alta del río Putumayo*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Corpoamazonia.
- Ochoa, T. (2017). *Hidrología, hidráulica y socavación en puentes*. Ecoe Ediciones Ltda.
- Universidad de La Salle. (2013). Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos. INV E - 123 - 13. <https://www.studocu.com/co/document/universidad-de-la-salle-colombia/mecanica-de-materiales/363328885-inv-e-123-13-pdf/5446638>.