OBJETO: "CONTRATACIÓN QUE TIENE COMO OBJETO LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS Y DISEÑOS QUEBRADA SAN JOSÉ, EN CONCORDANCIA CON EL CONTRATO INTERADMINISTRATIVO CONTI-SI-025-2025, CELEBRADO ENTRE EN MUNICIPIO DE YARUMAL Y EDENORTE".

ESTUDIO DE SOCAVACIÓN PARA LA CONTRATACIÓN QUE TIENE COMO OBJETO LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS Y DISEÑOS QUEBRADA SAN JOSÉ, EN CONCORDANCIA CON EL CONTRATO INTERADMINISTRATIVO CONTI-SI-025-2025, CELEBRADO ENTRE EN MUNICIPIO DE YARUMAL Y EDENORTE

2026

MUNICIPIO DE YARUMAL

PRODUCTO:

"CONTRATACIÓN QUE TIENE COMO OBJETO LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS Y DISEÑOS QUEBRADA SAN JOSÉ, EN CONCORDANCIA CON EL CONTRATO INTERADMINISTRATIVO CONTI-SI-025-2025, CELEBRADO ENTRE EN MUNICIPIO DE YARUMAL Y EDENORTE".

Control de versiones

Versión	Fecha	Descripción de Modificaciones	Folios
V0		Primera Emisión	

MUNICIPIO DE YARUMAL ANTIOQUIA

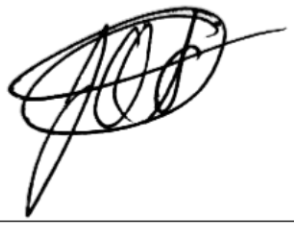
REALIZADO POR	REVISADO POR	APROBADO POR
John Fredy Quintero Hernández		
		
Formato: Carta		Folios:27

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN 6
2. OBJETIVOS 7
2.1 OBJETIVO GENERAL 7
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 7
3. MARCO TEÓRICO 8
3.1 LA SOCAVACIÓN Y SU MITIGACIÓN EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA 8
3.1.1 Socavación en quebradas 8
3.1.2 Impacto de la socavación en infraestructuras 8
3.1.3 Medidas de mitigación ante la socavación 8
3.2 ESTUDIO DE SOCAVACIÓN 9
3.2.1 Socavación (método de Lacey) 9
3.2.2 Factor de corrección Ksa 10
3.2.3 Profundidad de socavación ajustada por el método de Lacey (Dsa): 10
3.2.4 Profundidad de socavación por debajo del lecho “dsa” (método de Lacey) 11
3.3 SOCAVACIÓN AL PIE DE LOS ESTRIBOS (MÉTODO DE K. F. ARTAMONOV) 11
4. ANÁLISIS DE SOCAVACIÓN DE LA QUEBRADA “SAN JOSÉ” 14
4.1 ESTUDIO DE SOCAVACIÓN (MÉTODO DE LACEY) 14
4.1.1 Factor de corrección Ksa 15
4.1.2 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE LA FUENTE (HEC-RAS) 16
4.2 SOCAVACIÓN AL PIE DE LOS ESTRIBOS (MÉTODO K. F. ARTAMONOV) 19
4.3 RESULTADOS GRÁFICOS 21
5. DETALLES Y DISEÑOS 23
5.1 DESCOLE OBRA DE CANALIZACIÓN EXISTENTE (BOX CULVERT) 23
5.1.1 SOCAVACIÓN VERTICAL 23
5.1.2 SOCAVACIÓN LATERAL 23
6. CONCLUSIONES 25

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores para factor de Lacey "f" 10
Tabla 2. Valores de Ksa según la forma de la quebrada 10
Tabla 3. Valores del coeficiente correctivo P_α en función de α 13
Tabla 4. Valores del coeficiente correctivo P_q en función de Q1/Q 13
Tabla 5. Valores del coeficiente correctivo P_R 13
Tabla 6. Material seleccionado para valor de f en la fórmula de socavación por el método de Lacey 14
Tabla 7. Tipo de alineamiento de la quebrada según las características del tramo de estudio para elección del valor de Ksa 15
Tabla 8. Características dinámicas de la fuente (HEC-RAS) 16
Tabla 9. Determinación de profundidad de socavación vertical 18
Tabla 10. Información de entrada para el método de socavación de Artamonov .. 20
Tabla 11. Resumen de estudio de socavación en la quebrada con la intervención propuesta 21

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Variables que componen la fórmula de la profundidad de socavación por debajo del lecho 11
Ilustración 2. Variables para el método de socavación de K.F. Artamonov 12
Ilustración 3. Condiciones de diseño para la obtención de los coeficientes correctivos que componen la fórmula de K. F. Artamonov 12
Ilustración 4. Material predominante en el lecho de la quebrada 14
Ilustración 5. Tipo de alineamiento de la quebrada para la selección del valor de Ksa 16
Ilustración 6. Vista en perfil de obra de descole existente después de la adecuación 23
Ilustración 7. Vista en perfil del detalle de la llave de confinamiento para la socavación vertical 23
Ilustración 8. Vista en planta de adecuación de obra de descole de canalización en box culvert existente (color magenta) 24

1. INTRODUCCIÓN

El presente informe tiene como objetivo analizar y evaluar los aspectos relacionados con la socavación en una obra planificada sobre la quebrada “San José”, de importancia estratégica para el municipio de Yarumal. Las obras de socavación buscan mejorar la funcionalidad del sistema existente, así como garantizar su estabilidad a largo plazo frente a eventos hidrológicos extremos.

En este documento se presenta el análisis de socavación realizado una vez se ejecutó la modelación hidráulica y estudio hidrológico. Para este último se contó con información pluviométrica proporcionada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), la cual cuenta con curvas IDF construidas a partir de los datos de precipitación de la zona de estudio.

Para los estudios de niveles de inundación de la fuente “San José”, se realizó en primera instancia el levantamiento topográfico de la zona de inundación de dicho afluente, tanto aguas arriba como aguas debajo de las obras proyectadas, y con base en los estimativos de crecientes según los caudales obtenidos con diferentes períodos de retorno (2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años), se calcularon los niveles de inundación asociados a los caudales máximos con dichos períodos de retorno o recurrencia, utilizando el modelo HEC-RAS, desarrollado por el Hydrologic Engineering Center de los Estados Unidos.

Los análisis y diseños de obras para controlar el fenómeno de la socavación en este sitio se adelantaron teniendo en consideración los niveles de inundación asociados a la creciente de diseño, con período de recurrencia de 100 años. Como herramientas proporcionadas por el presente estudio, los datos obtenidos se describen en tablas, además se presentan esquemas que permiten hacer un análisis más detallado. Al final se presentan las conclusiones y recomendaciones con respecto al tema central del presente estudio.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Determinar las acciones y obras necesarias a realizar para controlar los efectos asociados al fenómeno de la socavación sobre la quebrada “San José” en descole de canalización en box culvert existente en la zona urbana del municipio de Yarumal, teniendo en cuenta que se hará una intervención sobre dicho afluente.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar el método de Lacey para llevar a cabo el estudio de socavación general del cauce.
- Caracterizar correctamente la forma, materiales, tamaño y dinámica de la fuente hídrica.
- Analizar la información de salida referente a los tipos de socavación que se pueden presentar en la quebrada (socavación vertical y lateral).

3. MARCO TEÓRICO

3.1 LA SOCAVACIÓN Y SU MITIGACIÓN EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA

La **socavación** es el proceso de erosión localizado en el lecho y las márgenes de cursos de agua, provocado por el aumento de la velocidad y la energía del flujo. Este fenómeno, común en quebradas y ríos, puede comprometer la estabilidad estructural de obras hidráulicas y de infraestructura, como alcantarillas, puentes, y obras de protección. La socavación puede clasificarse en general, local y por contracción:

- **Socavación General**: Ocurre en el cauce por procesos naturales como erosión fluvial y transporte de sedimentos.
- **Socavación Local**: Se produce en las proximidades de estructuras hidráulicas, como pilas o estribos, debido a la alteración del patrón de flujo.
- **Socavación por Contracción**: Es causada por la reducción de la sección hidráulica debido a la presencia de estructuras, lo que incrementa la velocidad del flujo.

3.1.1 Socavación en quebradas

Las quebradas, caracterizadas por pendientes pronunciadas y flujos torrenciales, presentan un alto riesgo de socavación debido a la mayor energía cinética del flujo. En estos contextos, el transporte de sedimentos gruesos, como gravas y cantos rodados, aumenta la capacidad erosiva, afectando tanto el lecho como las estructuras construidas en ellas. Según Melville y Coleman (2000), la velocidad crítica del flujo en quebradas suele superar los valores umbral para el inicio del movimiento de partículas, incrementando los riesgos de socavación local y general.

3.1.2 Impacto de la socavación en infraestructuras

La socavación puede generar fallas estructurales catastróficas en obras como pilas de puentes y entradas de alcantarillas. Estudios como los de Richardson y Davis (1995) indican que hasta un 60% de las fallas de puentes en Estados Unidos están relacionadas con problemas de socavación. En el caso de obras en quebradas, estas fallas son exacerbadas por los flujos concentrados y la alta variabilidad de los caudales en eventos extremos.

3.1.3 Medidas de mitigación ante la socavación

El diseño y construcción de obras en quebradas requieren estrategias específicas para mitigar los efectos de la socavación. Estas estrategias incluyen:

- Protección del lecho y las márgenes por medio de revestimientos con enrocado y/o geotextiles.

- Diseño hidráulico optimizado, para el caso de culverts, construyendo cabezotes de encole con aletas. En el caso de puentes, se emplean pilotes colocados por debajo del nivel máximo de socavación estimado para garantizar la estabilidad estructural.
- Disipadores de energía ayudan a reducir la velocidad del flujo.
- Canalización controlada, permitiendo regular el flujo y evitar concentraciones de energía erosiva.

3.2 ESTUDIO DE SOCAVACIÓN

La socavación que se produce en un río no puede ser calculada con exactitud, solo estimada, muchos factores intervienen en la ocurrencia de este fenómeno, tales como:

- El caudal
- Tamaño y conformación del material del cauce
- Cantidad de transporte de sólidos

Las ecuaciones que se presentan a continuación son una guía para estimar la geometría hidráulica del cauce de un río. Las mismas están en función del material del cauce.

3.2.1 Socavación (método de Lacey)

Es aquella que se produce a todo lo ancho del cauce cuando ocurre una crecida debido al efecto hidráulico de un estrechamiento de la sección; la degradación del fondo de cauce se detiene cuando se alcanzan nuevas condiciones de equilibrio por disminución de la velocidad, a causa del aumento de la sección transversal debido al proceso de erosión. Para la determinación de la socavación general se empleará el criterio de Lacey y está dada por las siguientes expresiones:

$$Ds = 1.35(\frac{q^2}{f})^{\frac{1}{3}}$$ (Ecuación 1)

Donde,
Ds = Profundidad de socavación por debajo de la superficie de agua para un TR de 100 años, medida en (m),
q = Caudal para un TR de 100 años unitario, medida en (m3 / seg / m),
f = Factor de Lacey de una muestra representativa de material del lecho. (Ver tabla nro. 1)
Para la determinación del caudal unitario q se debe emplear la siguiente ecuación:

$$q = (\frac{Q}{T})$$ (Ecuación 2)

Donde,
q = Caudal para un TR de 100 años unitario, medida en (m3 / seg / m),
Q = Caudal para un TR de 100 años, medida en (m3 / seg),

T = Ancho del espejo de la lámina de agua, medida en (m).

A continuación, se muestra la tabla que asigna un valor de f según la muestra representativa para emplear el método:

Tabla 1. Valores para factor de Lacey "f"

Material	Valor de f
Rocas Masivas (Diámetro 70 cm)	40
Rocas	38
Pedrones y lajas	20
Piedras y lajas	6
Piedras pequeñas y gravas gruesas	4.7
Arenas gruesas	1.52
Arenas medianas	1.3
Limos estandar	1
Limos finos	0.85

3.2.2 Factor de corrección Ksa

La profundidad de socavación Ds debe ser ajustada a las condiciones específicas del tipo de estructura, su ubicación y el flujo del agua; por esto se debe tener en cuenta el factor de ajuste de socavación Ksa.

Para determinar el valor de Ksa se debe tener en cuenta la siguiente tabla:

Tabla 2. Valores de Ksa según la forma de la quebrada

Descripción	Valor de Ksa
Tramo recto / curva moderada	1.5
Ángulos rectos / Curvas pronunciadas	2
Agua arriba de la obra	2
Agua arriba de deflectores	2.5

3.2.3 Profundidad de socavación ajustada por el método de Lacey (Dsa):

Para la determinación de la profundidad de socavación ajustada Dsa se debe emplear la siguiente ecuación:

$$Dsa = Ksa * Ds$$ (Ecuación 3)

Donde,

Dsa = Profundidad de socavación ajustada, medida desde la superficie de agua con TR 100 años, medida en (m),
Ksa = Factor de ajuste a Ds, medida en (m),
Ds = Profundidad de socavación por debajo de la superficie de agua para un TR de 100 años, medida en (m).

3.2.4 Profundidad de socavación por debajo del lecho "dsa" (método de Lacey)

Para la determinación de la socavación por debajo del lecho, se estima sustrayendo el tirante de agua γmax del tirante de agua total Dsa:

$$dsa = Dsa - \gamma máx \text{ (Ecuación 4)}$$

Donde,

dsa = socavación por debajo del lecho, medida en (m),
Dsa = Profundidad de socavación ajustada, medida desde la superficie de agua con TR 100 años, medida en (m),
γmax = Tirante de agua total para un TR de 100 años, medida en (m).

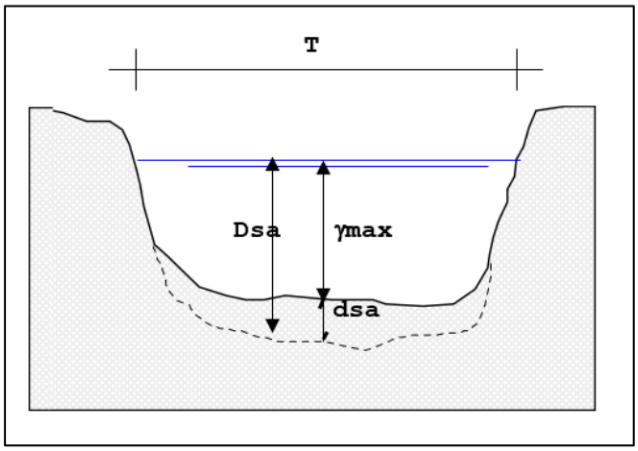


Ilustración 1. Variables que componen la fórmula de la profundidad de socavación por debajo del lecho

3.3 SOCAVACIÓN AL PIE DE LOS ESTRIBOS (MÉTODO DE K. F. ARTAMONOV)

El método que será expuesto se debe a K. F. Artamonov y permite estimar no solo la profundidad de socavación al pie de estribos, sino además al pie de espigones. Esta erosión depende del gasto que teóricamente es interceptado por el espigón, relacionando con el gasto total que escurre por el río, del talud que tienen los lados del estribo y del ángulo que el eje longitudinal de la obra

forma con la corriente. El tirante incrementado al pie de un estribo medido desde la superficie libre de la corriente está dado por:

$$St = P_{\propto} P_q P_R H_o \text{ (Ecuación 5)}$$

Donde,
St = tirante incrementado al pie del estribo debido a la socavación, medido en (m),
Pα = coeficiente que depende del ángulo α que forma el eje del puente con la corriente, como se indica en la figura nro. 3. El valor de Pα puede encontrarse en la tabla nro. 3.
Pq = coeficiente que depende de la relación Q1/Q, en que Q1 es el gasto que teóricamente pasaría por el lugar ocupado por el estribo si este no existiera, y Q, es el gasto total que escurre por el río. El valor de Pq puede encontrarse en la tabla nro. 4
PR = coeficiente que depende del talud que tienen los lados del estribo, su valor puede obtenerse en la tabla nro. 5.
Ho = tirante que se tiene en la zona cercana al estribo antes de la erosión.
La información previamente descrita se ilustra en las siguientes imágenes.

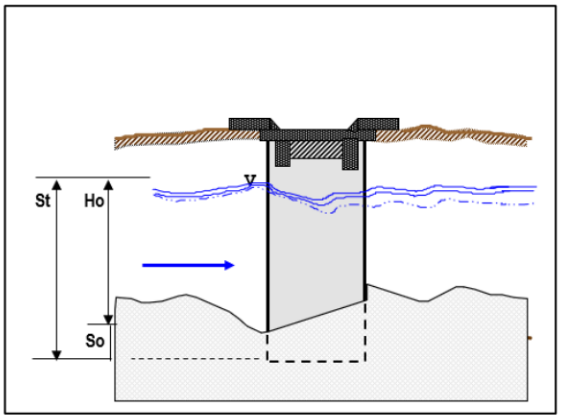


Ilustración 2. Variables para el método de socavación de K.F. Artamonov

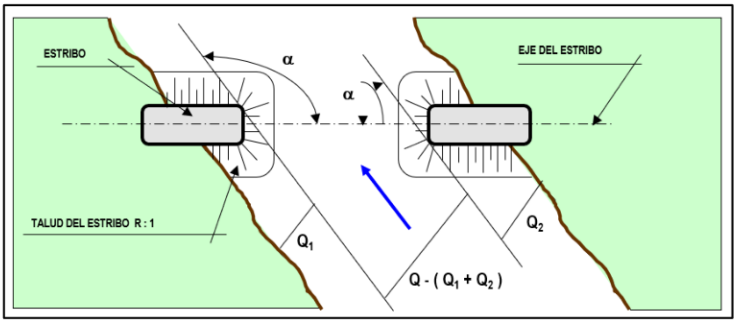


Ilustración 3. Condiciones de diseño para la obtención de los coeficientes correctivos que componen la fórmula de K. F. Artamonov

A continuación, se muestran las tablas para obtener los coeficientes correctivos de la fórmula de K. F. Artamonov en función de las condiciones de diseño.

Tabla 3. Valores del coeficiente correctivo P_α en función de α

α	30º	60º	90º	120º	150º
P_α	0.84	0.94	1.00	1.07	1.19

Tabla 4. Valores del coeficiente correctivo P_q en función de Q1/Q

Q1/Q	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Pq	2.00	2.65	3.22	3.45	3.67	3.87	4.06	4.20

Tabla 5. Valores del coeficiente correctivo P_R

TALUD R	0	0.50	1.00	1.50	2.00	3.00
PR	1.00	0.91	0.85	0.83	0.61	0.50

4. ANÁLISIS DE SOCAVACIÓN DE LA QUEBRADA "SAN JOSÉ"

4.1 ESTUDIO DE SOCAVACIÓN (MÉTODO DE LACEY)

De acuerdo con la ecuación 1, se menciona sobre la socavación general empleando el método de Lacey, en cuya fórmula se habla sobre el factor de Lacey "f" según una muestra representativa del material del lecho. La tabla nro. 1 comprende varios tipos de material, del cual la selección para el presente estudio fue el siguiente:

Tabla 6. Material seleccionado para valor de f en la fórmula de socavación por el método de Lacey

Material	Valor de f
Rocas Masivas (Diámetro 70 cm)	40
Rocas	38
Pedrones y lajas	20
Piedras y lajas	6
Piedras pequeñas y gravas gruesas	4.7
Arenas gruesas	1.52
Arenas medianas	1.3
Limos estandar	1
Limos finos	0.85

Material seleccionado	Rocas Masivas (Diámetro 70 cm)
Valor de f seleccionado	40

La selección anterior se evidencia con las siguientes imágenes en donde se observa el material predominante:

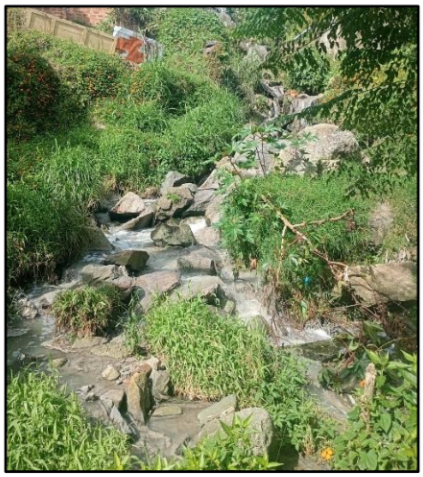


Ilustración 4. Material predominante en el lecho de la quebrada

4.1.1 Factor de corrección Ksa

Como se observó anteriormente en la tabla 2, el Ds debe ser ajustada según las condiciones específicas del sitio. Por esta razón se tiene en cuenta el factor de ajuste de socavación Ksa, que para este caso se determinó lo siguiente:

Tabla 7. Tipo de alineamiento de la quebrada según las características del tramo de estudio para elección del valor de Ksa

Descripción	Valor de Ksa
Tramo recto / curva moderada	1.5
Ángulos rectos / Curvas pronunciadas	2
Agua arriba de la obra	2
Agua arriba de deflectores	2.5

Descripción seleccionada	Tramo recto / curva moderada
Valor de Ksa seleccionado	1.5

Lo anterior se evidencia gracias al levantamiento topográfico de la fuente en el tramo de interés, representado en la siguiente imagen:

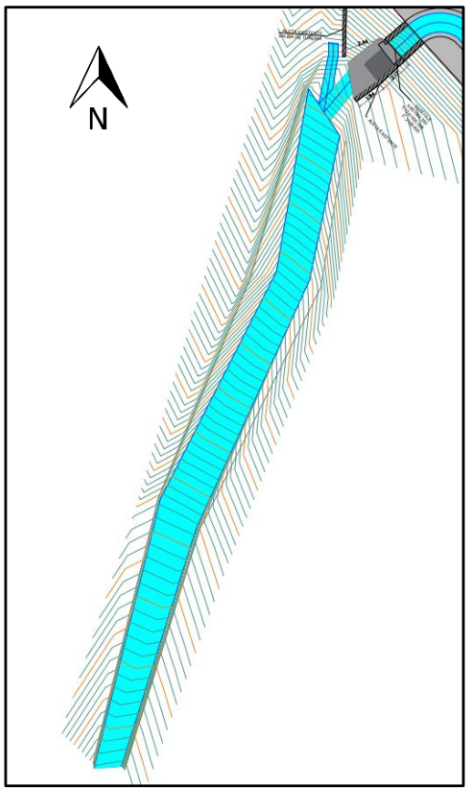


Ilustración 5. Tipo de alineamiento de la quebrada para la selección del valor de Ksa

4.1.2 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE LA FUENTE (HEC-RAS)

A continuación, por medio del aplicativo HEC-RAS, se extraen las características dinámicas de la fuente con intervención y por medio de esta se pone en práctica cada una de las ecuaciones expuestas en los ítems anteriores:

Tabla 8. Características dinámicas de la fuente (HEC-RAS)

	CUADRO RESUMEN CON ESTRUCTURA					
	Progresiva	Fuente	Q Total Tr=100 años	Máxima profundidad	Cota lámina agua (a. s. n. m.)	Espejo de agua
	(K0+000.00)		(m^3/s)	(m)	(m)	(m)
Canal abierto escalonado 1.50×1.80	454	San José	13.04	1.78	2261.42	7.04
	446	San José	13.04	0.91	2259.91	4.89
	438	San José	13.04	0.9	2259.53	5.75
Box culvert nuevo 1.50×1.70	430.69	San José	13.04	1.68	2259.36	1.5
	420	San José	13.04	1.34	2258.17	1.5
	410	San José	13.04	1.23	2257.27	1.5
	400	San José	13.04	1.17	2256.42	1.5

	CUADRO RESUMEN CON ESTRUCTURA					
	Progresiva	Fuente	Q Total Tr=100 años	Máxima profundidad	Cota lámina agua (a. s. n. m.)	Espejo de agua
	(K0+000.00)		(m^3/s)	(m)	(m)	(m)
Box culvert nuevo 1.20×1.70	389.67	San José	13.04	1.24	2255.68	1.4
	375	San José	13.04	1.21	2253.2	1.2
	360	San José	13.04	1.11	2250.59	1.2
	345	San José	13.04	1.1	2248.51	1.2
	330	San José	13.04	1.09	2246.28	1.2
	315	San José	13.04	1.07	2243.96	1.2
	300	San José	13.04	1.07	2241.71	1.2
	285	San José	13.04	1.07	2239.47	1.2
	270	San José	13.04	1.07	2237.23	1.2
	255	San José	13.04	1.07	2235.08	1.2
	240	San José	13.04	1.1	2233.18	1.2
	225	San José	13.04	1.1	2231.16	1.2
	210	San José	13.04	1.08	2228.86	1.2
	195	San José	13.04	0.97	2225.13	1.2
	180	San José	13.04	1.02	2223.12	1.2
Box culvert existente 1.20×1.70	165	San José	13.04	1.04	2220.93	1.2
	150	San José	13.04	0.98	2217.68	1.2
	135	San José	13.04	0.95	2214.36	1.2
	120	San José	13.04	0.91	2210.61	1.2
	105	San José	13.04	0.89	2206.82	1.2
	90	San José	13.04	0.87	2202.82	1.2
	80	San José	13.04	0.85	2200.01	1.2
	72.07	San José	13.04	0.9	2198.82	1.2
	60	San José	13.04	1.08	2198.97	1.2
	53.47	San José	13.04	1.19	2199.07	1.2
	47.93	San José	13.04	1.13	2197.98	1.2
	45	San José	13.04	0.55	2196.06	3.56
	35	San José	13.04	0.72	2192.77	3.58
	25	San José	13.04	0.63	2189.63	3.53
	15	San José	13.04	0.63	2186.58	3.86

CUADRO RESUMEN CON ESTRUCTURA					
Progresiva	Fuente	Q Total Tr=100 años	Máxima profundidad	Cota lámina agua (a. s. n. m.)	Espejo de agua
(K0+000.00)		(m^3/s)	(m)	(m)	(m)
5	San José	13.04	0.88	2184.39	2.95

Tabla 9. Determinación de profundidad de socavación vertical

	Progresiva	q (m3/seg/m)	Ds (m)	Dsa (m)	dsa (m)
Canal abierto escalonado 1.50×1.80	454	1.852272727	0	1.78	0
	446	2.666666667	0	0.91	0
	438	2.267826087	0	0.9	0
Box culvert nuevo 1.50×1.70	430.69	8.693333333	0	1.68	0
	420	8.693333333	0	1.34	0
	410	8.693333333	0	1.23	0
	400	8.693333333	0	1.17	0
Box culvert nuevo 1.20×1.70	389.67	9.314285714	0	1.24	0
	375	10.86666667	0	1.21	0
	360	10.86666667	0	1.11	0
	345	10.86666667	0	1.1	0
	330	10.86666667	0	1.09	0
	315	10.86666667	0	1.07	0
	300	10.86666667	0	1.07	0
	285	10.86666667	0	1.07	0
	270	10.86666667	0	1.07	0
	255	10.86666667	0	1.07	0
	240	10.86666667	0	1.1	0
	225	10.86666667	0	1.1	0
	210	10.86666667	0	1.08	0
	195	10.86666667	0	0.97	0
	180	10.86666667	0	1.02	0
Box culvert existente 1.20×1.70	165	10.86666667	0	1.04	0
	150	10.86666667	0	0.98	0
	135	10.86666667	0	0.95	0

	Progresiva	q (m3/seg/m)	Ds (m)	Dsa (m)	dsa (m)
	120	10.86666667	0	0.91	0
	105	10.86666667	0	0.89	0
	90	10.86666667	0	0.87	0
	80	10.86666667	0	0.85	0
	72.07	10.86666667	0	0.9	0
	60	10.86666667	0	1.08	0
	53.47	10.86666667	0	1.19	0
	47.93	10.86666667	0	1.13	0
Lecho natural	45	3.662921348	0.937991351	1.406987026	0.856987026
	35	3.642458101	0.93449464	1.401741959	0.681741959
	25	3.694050992	0.94329825	1.414947375	0.784947375
	15	3.378238342	0.888738435	1.333107653	0.703107653
	5	4.420338983	1.06320617	1.594809255	0.714809255
			Prom	Prom	Prom
			0.95	1.43	0.75
					Próximo a obra
					0.86

En ese orden de ideas, el valor de socavación vertical dsa tomado es de 0.86 m por ser el valor mayor próximo a la obra.

4.2 SOCAVACIÓN AL PIE DE LOS ESTRIBOS (MÉTODO K. F. ARTAMONOV)

Se tiene en cuenta la información previamente descrita en el marco teórico para la determinación de la socavación lateral (So), haciendo uso inicialmente de la ecuación 5, obteniendo el tirante incrementado al pie del estribo debido a la socavación (St) como insumo del resultado final.

Según las características del tramo a evaluar, se obtiene la siguiente información consolidada en la siguiente tabla:

Tabla 10. Información de entrada para el método de socavación de Artamonov

Descripción	Valor	Unidad
Ho = tirante que se tiene en la zona cercana al estribo antes de la erosión	**0.86**	m
Q = caudal de diseño	**13.04**	m3/seg
Q1 = caudal que teóricamente pasaría por el lugar ocupado por el estribo de la margen derecha	**6.52**	m3/seg
Q1/Q = Relación de Q1 y Q	0.50	
Pq = coeficiente que depende de la relación Q1/Q. Ver tabla N° 4	**3.67**	
α = ángulo que forma el eje del estribo con la corriente	**90.00**	°
Pα = coeficiente que depende del ángulo α . Ver tabla N° 3	**1.00**	
R = talud que tiene el estribo	**1.00**	
P_R = Coeficiente que depende del talud que tiene el estribo. Ver tabla N° 5	**0.85**	

De acuerdo con dicha información, y haciendo uso de la ecuación 5, se obtiene:

St = 2.67 m

Valor del cual se obtiene finalmente la socavación lateral (So) restando a dicho valor de St la profundidad de socavación respecto al fondo del cauce (dsa):

So = 1.82 m

4.3 RESULTADOS GRÁFICOS

Tabla 11. Resumen de estudio de socavación en la quebrada con la intervención propuesta

	CUADRO RESUMEN CON ESTRUCTURA					
	Progresiva (K0+000.00)	Fuente	Q Total (m^3/s)	Cota lecho (m s. n. m.)	Cota lámina agua (m s. n. m.)	Cota socavación (m s. n. m.)
Canal abierto escalonado 1.50×1.80	454	San José	13.04	2259.64	2261.42	2259.64
	446	San José	13.04	2259	2259.91	2259
	438	San José	13.04	2258.63	2259.53	2258.63
Box culvert nuevo 1.50×1.70	430.69	San José	13.04	2257.68	2259.36	2257.68
	420	San José	13.04	2256.83	2258.17	2256.83
	410	San José	13.04	2256.04	2257.27	2256.04
	400	San José	13.04	2255.25	2256.42	2255.25
Box culvert nuevo 1.20×1.70	389.67	San José	13.04	2254.44	2255.68	2254.44
	375	San José	13.04	2251.99	2253.2	2251.99
	360	San José	13.04	2249.48	2250.59	2249.48
	345	San José	13.04	2247.41	2248.51	2247.41
	330	San José	13.04	2245.19	2246.28	2245.19
	315	San José	13.04	2242.89	2243.96	2242.89
	300	San José	13.04	2240.64	2241.71	2240.64
	285	San José	13.04	2238.4	2239.47	2238.4
	270	San José	13.04	2236.16	2237.23	2236.16
	255	San José	13.04	2234.01	2235.08	2234.01
	240	San José	13.04	2232.08	2233.18	2232.08
	225	San José	13.04	2230.06	2231.16	2230.06
	210	San José	13.04	2227.78	2228.86	2227.78
	195	San José	13.04	2224.16	2225.13	2224.16
	180	San José	13.04	2222.1	2223.12	2222.1
Box culvert existente 1.20×1.70	165	San José	13.04	2219.89	2220.93	2219.89
	150	San José	13.04	2216.7	2217.68	2216.7
	135	San José	13.04	2213.41	2214.36	2213.41
	120	San José	13.04	2209.7	2210.61	2209.7
	105	San José	13.04	2205.93	2206.82	2205.93
	90	San José	13.04	2201.95	2202.82	2201.95
	80	San José	13.04	2199.16	2200.01	2199.16

	CUADRO RESUMEN CON ESTRUCTURA					
	Progresiva (K0+000.00)	Fuente	Q Total (m^3/s)	Cota lecho (m s. n. m.)	Cota lámina agua (m s. n. m.)	Cota socavación (m s. n. m.)
	72.07	San José	13.04	2197.92	2198.82	2197.92
	60	San José	13.04	2197.89	2198.97	2197.89
	53.47	San José	13.04	2197.88	2199.07	2197.88
	47.93	San José	13.04	2196.85	2197.98	2196.85
Lecho natural	45	San José	13.04	2195.51	2196.06	2194.653013
	35	San José	13.04	2192.05	2192.77	2191.368258
	25	San José	13.04	2189	2189.63	2188.215053
	15	San José	13.04	2185.95	2186.58	2185.246892
	5	San José	13.04	2183.51	2184.39	2182.795191

Cuya representación se observa en la siguiente gráfica en el plano cartesiano:

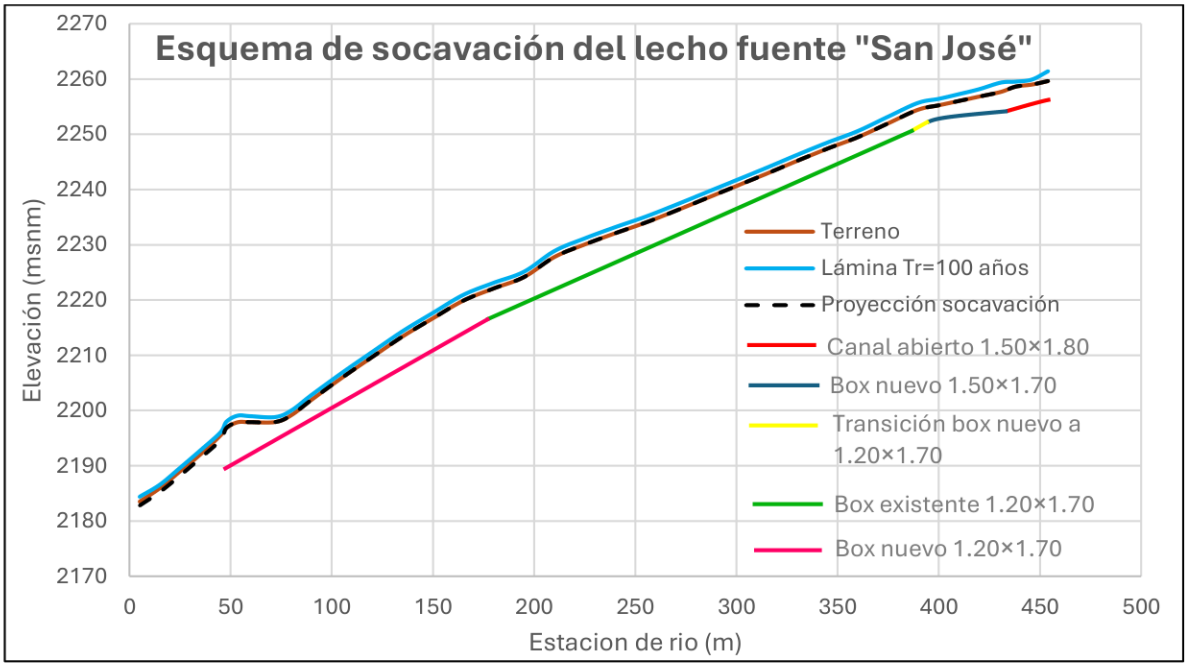


Ilustración 6. Esquema de socavación del lecho de la fuente "San José"

5. DETALLES Y DISEÑOS

5.1 DESCOLE OBRA DE CANALIZACIÓN EXISTENTE (BOX CULVERT)

5.1.1 SOCAVACIÓN VERTICAL

La socavación vertical se tiene en cuenta para la salida de la estructura hidráulica existente (en la abscisa K0+047.93) que es donde la fuente San José vuelve a fluir sobre lecho natural. Para dado caso, según la estimación de socavación vertical de dsa=0.86 m, se proyecta una llave de confinamiento de protección a una profundidad de 1.00 m para mitigar dicho fenómeno.

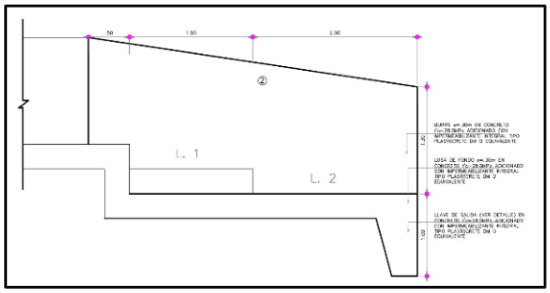


Ilustración 7. Vista en perfil de obra de descole existente después de la adecuación

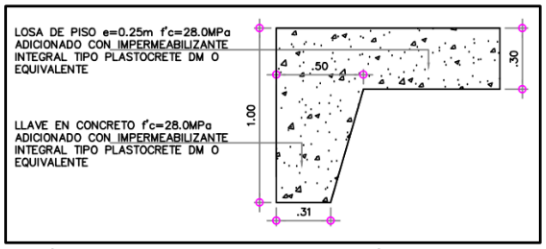


Ilustración 8. Vista en perfil del detalle de la llave de confinamiento para la socavación vertical

5.1.2 SOCAVACIÓN LATERAL

Para el caso de la socavación lateral en la fuente a la altura de la salida del box culvert existente (abscisa K0+047.93), el valor de socavación estimado de 1.82 m se protege con las aletas de descole, con una longitud por el lado izquierdo (sentido del flujo) de 4.00 m, y se proyecta por el lado derecho la construcción de una aleta de longitud 2.44 m para que el terreno no quede expuesto a los efectos de la dinámica fluvial teniendo en cuenta una longitud mayor a la socavación lateral estimada.

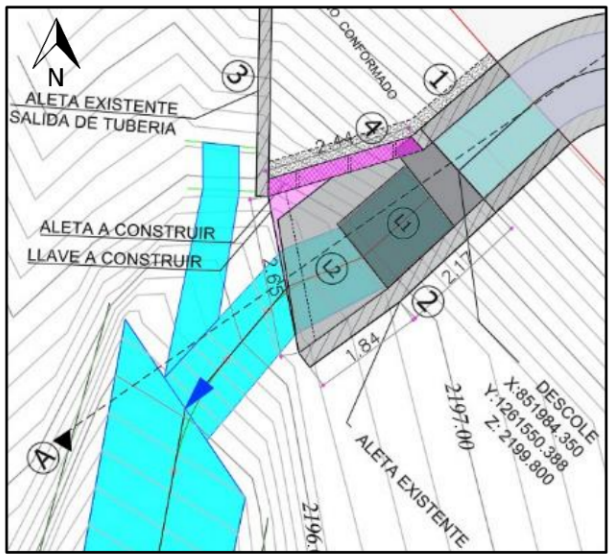


Ilustración 9. Vista en planta de adecuación de obra de descole de canalización en box culvert existente (color magenta)

6. CONCLUSIONES

La comprensión de los procesos de socavación y la implementación de medidas efectivas de mitigación son esenciales para garantizar la seguridad y durabilidad de las obras sobre quebradas. El diseño basado en modelos hidráulicos y geotécnicos, junto con estrategias de protección física, representan herramientas clave para combatir este fenómeno y preservar la funcionalidad de las estructuras.

Un estudio hidrológico detallado es fundamental para identificar los caudales máximos esperados y los regímenes de flujo de la quebrada, permitiendo prever condiciones críticas que puedan exacerbar la socavación. Esto garantiza que las obras diseñadas sean capaces de soportar escenarios extremos sin comprometer su estabilidad.

Las herramientas de modelación, como HEC-RAS, son esenciales para simular la interacción entre las estructuras y el flujo, permitiendo predecir zonas de alta turbulencia o riesgo de socavación. Esto facilita la optimización de diseños y la evaluación de soluciones de mitigación.

Las obras de socavación propuestas permiten dar protección a las obras principales y así garantizar la seguridad y durabilidad de estas, reduciendo los riesgos asociados a la erosión y otros procesos que puedan comprometer su estabilidad estructural. Además, estas medidas contribuyen a preservar las condiciones hidráulicas óptimas, promoviendo un mejor desarrollo, funcionamiento y sostenibilidad de la infraestructura a largo plazo.

La decisión de conservar las obras existentes contra la socavación refleja un enfoque práctico y fundamentado en la experiencia del desempeño estructural. La estabilidad y efectividad demostradas por estas obras a lo largo del tiempo justifican su continuidad, destacando la importancia de evaluar periódicamente su condición para garantizar su funcionalidad frente a posibles cambios en las condiciones hidráulicas.

La socavación vertical estimada en el descole del box culvert existente en la abscisa K0+047.93 es de 0.86 m, por lo que se profundiza por debajo del terreno una llave de confinamiento vertical a una longitud de 1.00 m, protegiendo adecuadamente ante la socavación vertical.

Para el caso de la socavación lateral en la fuente sobre el mismo punto, el valor de socavación estimado de 1.82 m se protege por medio de unas aletas con una longitud mayor a dicha estimación. Por un lado (el izquierdo en el sentido del flujo) está una aleta existente de 4.00 m de longitud, mientras que por el otro

lado se proyecta la construcción de una aleta con una longitud de 2.44 m, la cual también protege de la socavación lateral estimada.

En el tramo de canalización donde la superficie de contacto es el concreto (canal abierto y box culvert) que va desde la abscisa K0+047.93 hasta la K0+459.36, no se registra socavación en el terreno debido a la dinámica fluvial, debido a que el caudal transportado es precisamente por medio de las estructuras proyectadas y existentes, en donde no se registra este fenómeno.

7. REFERENCIAS

Lacey, G. (1930). "Stable Channels in Alluvium." Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London.

Artamonov, K. F. (1977). "Calculation of Scour at the Foot of Piers and Abutments." Translated from Russian, Gidrometeoizdat, Leningrad.

Melville, B. W., & Coleman, S. E. (2000). Bridge Scour. Water Resources Publications.

Richardson, E. V., & Davis, S. R. (1995). Evaluating Scour at Bridges (HEC-18). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
Melville, B. W., & Chiew, Y. M. (1999). "Time scale for local scour at bridge piers." Journal of Hydraulic Engineering, 125(1), 59-65.