



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**ANÁLISIS DE LA EROSIÓN GENERAL EN RÍOS CON ESCURRIMIENTO SUB Y
SUPERCRÍTICO: CASO DEL RÍO LAJA**

POR

Gustavo Javier Herrera Torres

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Óscar Link Lazo

Septiembre 2022
Concepción (Chile)

© 2022 Gustavo Herrera Torres

© 2022 Gustavo Herrera Torres

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

RESUMEN

La socavación general en el lecho de un cauce ocurre producto de un desbalance entre la capacidad del transporte de sedimentos del río y la disponibilidad de material, en respuesta a alteraciones del cauce o por la propia dinámica fluvial. Determinar la profundidad de erosión general es relevante en ingeniería de ríos para lograr un buen diseño de obras hidráulicas.

En la literatura existen varias metodologías para calcular la erosión general, siendo todas empíricas o semiempíricas y aplicables en condiciones de régimen permanente. El historial de caudales, tipo de escurrimiento (sub y supercrítico) y duración de la crecida no se consideran explícitamente en las ecuaciones existentes. Introducir este tipo de variables en el cálculo ayudaría a tener estimaciones más cercanas a la física del problema.

Se propone una metodología basada en las fórmulas existentes para el cálculo de la erosión pero introduciendo la variable de la sedimentación con la formulación propuesta por Link et al. (2020), realizando el cálculo de forma no estacionaria usando el hidrograma del río Laja en Puente Perales entre los años 1970-2020 para el análisis y comparando los resultados obtenidos con las mediciones disponibles.

Los resultados obtenidos evidencian que la erosión general presenta una alta sensibilidad a un parámetro asociado a la sedimentación, el intervalo de tiempo utilizado y el diámetro medio de las partículas. También se observó que el método de Litschvan-Levediev fue el que tuvo mejor desempeño para el rango de sedimentos analizados. El formular un modelo de estas características permite realizar análisis forenses de distintos casos de estudio de ríos con escurrimiento subcrítico, siendo un instrumento útil para determinar causas de colapso en puentes o incluso ser usado en conjunto con simulaciones de caudales para calcular escenarios futuros del comportamiento de los ríos frente a cambios en las condiciones hidráulicas debido a construcción de obras o alteraciones del cauce.

ABSTRACT

General scour occurs as a result of an imbalance between the sediment transport capacity of the river and the availability of material, in response to alterations in the channel or due to fluvial dynamics. Determining the depth of general scour is relevant in river engineering to achieve a good design of hydraulic structures.

In the literature there are several methodologies to calculate general scour, all of them empirical or semi-empirical and applicable under steady-state conditions. Flow history, runoff type (subcritical and supercritical) and flood duration are not explicitly considered in the existing equations. Introducing this type of variables in the calculation would help to obtain estimates that are closer to the physics of the problem.

A methodology based on the existing formulas for calculating erosion is proposed, but introducing the sedimentation variable with the formulation proposed by Link et al. (2020), performing the calculation in a non-stationary way using the hydrograph of the Laja River in Puente Perales between the years 1970-2020 for the analysis and comparing the results obtained with the available measurements.

The results obtained show that general erosion presents a high sensitivity to a parameter associated with sedimentation, the time interval used and the average diameter of the particles. It was also observed that the Litschvan-Levediev method was the one that had the best performance for the range of sediments analyzed. Formulating a model with these characteristics allows forensic analysis of different case studies, being a useful instrument to determine causes of collapse in bridges or even be used in conjunction with flow simulations to calculate future scenarios of the behavior of rivers in the face of changes in the hydraulic conditions due to construction works or channel alterations.

DEDICATORIA

*A mi familia, Viviana, Jaime y Constanza por guiarme y aconsejarme;
a mi abuela Rosa por acogerme en su casa estos años;
a mi pareja Francisca, por su apoyo incondicional;
a mis amigos, por su constante apoyo y compañía durante esta etapa, en especial a Belén,
Cristóbal, Gonzalo, Wilson, Pedro, Maximiliano, Jorge y Cristian.*

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo, ANID, por el financiamiento otorgado a través del proyecto Fondecyt Regular Nr. 1221341: Scour at Bridge Piers in Supercritical Flows.

También a los ingenieros Jaime Cotroneo y Felipe Negrete del Instituto Nacional de Hidráulica que facilitaron la información hidráulica para poder realizar el trabajo y por integrar la comisión evaluadora.

A mi profesor guía Oscar Link por su apoyo y disposición. A la profesora Alejandra Stehr, quien formó parte de la comisión.

A Javier Riquelme, con quien trabajamos codo a codo en parte del trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Metodología.....	2
1.4 Principales resultados y conclusiones.....	2
1.5 Organización del documento	3
CAPÍTULO 2 EROSIÓN GENERAL	4
2.1 Introducción.....	4
2.2 Concepto	4
2.3 Estimación de erosión generalizada.....	5
2.3.1 Teoría del régimen	6
2.3.2 Teoría de velocidad crítica.....	6
2.4 Caso no estacionario	7
2.5 Conclusión.....	9
CAPÍTULO 3 MÉTODOS.....	10
3.1 Introducción.....	10
3.2 Metodologías de cálculo de erosión generalizada	10
3.2.1 Lacey (1930).....	10
3.2.2 Blench (1969).....	11
3.2.3 Laursen (1963).....	12
3.2.4 Maza Álvarez y Echeverría Alfaro (1973).....	12
3.2.5 Maza y García Flores (1978)	12

3.2.6 Neil (1980).....	13
3.2.7 Lischtvan-Lebediev (1984).....	14
3.2.8 Cálculo no estacionario.....	16
3.3 Caso de verificación del cálculo de erosión general.....	17
3.4 Caso de estudio: Río Laja en Puente Perales.....	19
3.4.1 Descripción general	19
3.5 Antecedentes topográficos.....	20
3.6 Antecedentes fluviométricos	22
3.6.1 Analisis hidrológico	22
3.7 Antecedentes sedimentológicos.....	24
3.8 Curvas de gasto.....	25
3.9 Modelación	27
3.10 Estimación de parámetros y evaluación de desempeño.....	28
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	29
4.1 Introducción.....	29
4.2 Resultados de la modelación utilizando la metodología propuesta.....	29
4.3 Análisis	34
4.4 Conclusiones.....	35
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.....	36
REFERENCIAS	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Valores de coeficiente según diámetro de la partícula	11
Tabla 3.2 Coeficientes de relación genérica	15
Tabla 3.3 Diámetros característicos de los sedimentos	25
Tabla 3.4 Valores de las curvas características	26
Tabla 4.1 Resultados de la modelación.....	30
Tabla 4.2 Tasas de erosión.....	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Balanza de Lane	4
Figura 2.2 Hidrograma y sedimentograma desfasados temporalmente en una crecida imaginaria(a) y los mismos diagramas en crecidas en los que se tienen medidas (b).	8
Figura 3.1 Esquema metodología de Neil (1980).	13
Figura 3.2 Perfil transversal en Sohag, río Nilo.	18
Figura 3.3 Perfil transversal en Bani-Sweif, río Nilo.	18
Figura 3.4 Ubicación de la zona de estudio	20
Figura 3.5 Perfil longitudinal del río Laja en Puente Perales	21
Figura 3.6 Perfil transversal del río Laja en Puente Perales.....	22
Figura 3.7 Hidrograma periodo 1970-2012.....	23
Figura 3.8 Hidrograma periodo 2013-2021.....	23
Figura 3.9 Curva granulométrica de la zona de estudio.....	24
Figura 3.10 Curva característica de caudal vs profundidad.....	26
Figura 3.11 Curva característica de caudal vs ancho	27
Figura 3.12 Curva característica de caudal vs velocidad	27
Figura 4.1 Resultados de la modelación con todas las fórmulas.....	29
Figura 4.2 Resultado modelación con Litschvan-Levediev	31
Figura 4.3 Análisis de sensibilidad del parámetro ξ	32
Figura 4.4 Modelo utilizando caudales medios diarios	32
Figura 4.5 Resultados del modelo utilizando caudales cada 8 y 12 horas.....	33
Figura 4.6 Sensibilidad del modelo variando d_{50}.....	34

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

La socavación general en el lecho de un cauce ocurre producto de un desbalance entre la capacidad del transporte de sedimentos que posee un río y la disponibilidad de material, en respuesta a alteraciones del cauce o por la propia dinámica fluvial.

Determinar la profundidad de socavación general es relevante en ingeniería de ríos para lograr un buen diseño de obras hidráulicas como puentes.

En la literatura existen varias metodologías para calcular la erosión general, siendo todas empíricas o semiempíricas y aplicables en condiciones de régimen permanente. El historial de caudales, tipo de escurrimiento (sub y supercrítico) y duración de la crecida no se consideran explícitamente en las ecuaciones existentes. Introducir este tipo de variables en el cálculo ayudaría a tener estimaciones más cercanas a la física del problema.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar la socavación en ríos con escurrimiento subcrítico y supercrítico y estudiar el caso del río Laja.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar comparativamente las fórmulas existentes para calcular la erosión general.
- Formular una metodología de cálculo no estacionaria para la erosión general y la sedimentación.
- Aplicar la metodología propuesta y evaluar su desempeño en el río Laja.

1.3 Metodología

El método aplicado en esta investigación consistió en la programación de un modelo en Matlab para calcular la socavación general y la depositación de sedimentos en el río Laja. En primer lugar, se realizó la revisión bibliográfica, luego se recopiló información de caudales diarios a través del banco de datos de la Dirección General de Aguas (DGA), información sedimentológica y otras variables hidráulicas relevantes que fueron proporcionadas del Instituto Nacional de Hidráulica (INH).

Se realizó el tratamiento de datos, y la modelación hidráulica 1D en el *software* Hec-Ras 6.2, de tal manera de obtener las ecuaciones de gasto del cauce y aplicar la metodología propuesta.

1.4 Principales resultados y conclusiones

Se compararon los registros batimétricos disponibles con los resultados obtenidos con la metodología de cálculo propuesta utilizando distintas fórmulas para el cálculo de la erosión considerando la depositación de sedimentos, dando como resultando que el método de Litshtvan-Lebediev es el que

tiene mejores aproximaciones y que las variables más sensibles son el caudal, la granulometría y el parámetro ξ asociado a la depositación.

1.5 Organización del documento

El presente documento está organizado en cinco capítulos. El primer capítulo presenta la motivación del problema junto a su objetivo general y sus objetivos específicos. El segundo capítulo presenta una breve descripción de la revisión bibliográfica de los distintos métodos de cálculo para estimar la socavación general en ríos, el método de depositación de sedimentos utilizado y experiencias previas en dichos cálculos. El tercer capítulo describe con mayor grado de detalle cada uno de las metodologías de cálculo para la estimación de la socavación general y depositación de sedimentos del río y la descripción del sitio de estudio. El cuarto capítulo presenta las estimaciones de la erosión general y depositación de sedimentos en el río de estudio, la comparación de dichos cálculos con mediciones reales y análisis de sensibilidad de parámetros. El capítulo cinco presenta las conclusiones y comentarios de esta investigación.

CAPÍTULO 2 EROSIÓN GENERAL

2.1 Introducción

En este capítulo se presentan antecedentes relevantes sobre la erosión generalizada, el fondo teórico, conceptos y experiencias previas en la aplicación de métodos de cálculo.

2.2 Concepto

Los sistemas fluviales tienden al equilibrio morfológico. De manera cualitativa Lane (1955) y como se muestra en la figura 2.1, plantea la existencia de un equilibrio entre el caudal de sedimentos (q_s) y el tipo de sedimentos (D) con el caudal líquido (q) y la pendiente del cauce (i), por lo que, si uno de estos parámetros varía, se producirán cambios para mantener este equilibrio.

En este caso, si aumenta el caudal líquido habrá un déficit de sedimentos y se producirá erosión general, por otra parte, si aumenta el caudal sólido generará un exceso de sedimentos y por consecuencia, agradación.

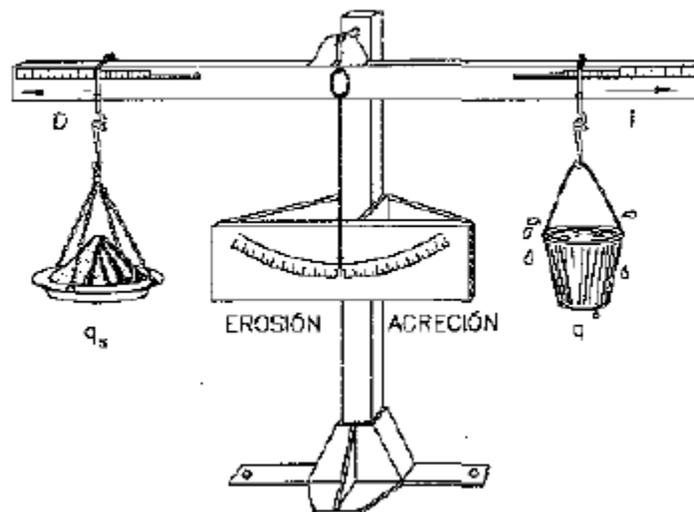


Figura 2.1 Balanza de Lane
Fuente: Martín (2002); Lane (1955).

Las alteraciones pueden ser de origen geomorfológico, hidrológico, hidráulico o sedimentológico y provocados de manera natural por la dinámica fluvial o por acción antrópica como extracción de áridos y construcción de obras hidráulicas (Toapaxi *et al*, 2015).

La socavación de un puente se puede clasificar según su causa en socavación general, socavación por contracción y socavación local. La socavación general puede ocurrir como erosión a largo o corto plazo. Coleman y Melville (2001) sostienen que la erosión general a largo plazo tiene una escala de tiempo normalmente del orden de varios años o más e incluye degradación progresiva, mientras que la erosión general a corto plazo se desarrolla durante una o varias crecidas poco espaciadas en el tiempo.

La socavación general a largo plazo es causada por desastre naturales (por ejemplo, el levantamiento del lecho de un cauce debido a terremotos o al descenso del lecho producto de crecidas extremas) o por cambios graduales causados por el hombre en el suministro de sedimentos de a un río (Lane, 1995; Su y Lu, 2016). Son procesos que duran años, en algunos casos hasta décadas e incluye degradación progresiva y erosión de las orillas (Coleman y Melville, 2001).

La erosión general a corto plazo se produce un desequilibrio del transporte de sedimentos durante el desarrollo de una o varias crecidas poco espaciadas en el tiempo, donde se produce una máxima erosión que se atenúa debido a la depositación en la recesión de la crecida. Los factores que controlan la erosión general son los sedimentos, el suministro de sedimentos aguas arriba, duración de la crecida, cambios en la sección transversal del flujo y cambios en la descarga (Bettess, 2002). A esta escala de tiempo y producto de la suspensión del lecho, aumenta el riesgo de colapso de obras hidráulicas (Schreider *et al*, 2001).

2.3 Estimación de erosión generalizada

Los métodos existentes para estimar la profundidad de erosión se basan principalmente en ecuaciones empíricas y semiempíricas. Las expresiones empíricas se basan en la teoría del régimen y las semiempíricas en el equilibrio entre la velocidad del flujo y la velocidad crítica.

Diversos autores han desarrollado expresiones para determinar la socavación. Schreider et al (2001) realizaron una revisión de la aplicabilidad del método semiempírico Lischtván-Lebediev y una comparación con diversos métodos semiempíricos. Coleman y Melville (2001), analizó casos de estudio aplicando una metodología que superpone las estimaciones de erosión (generalizada, local y por contracción), considerando distintas formulaciones para el cálculo considerando una única crecida registrada, utilizando datos geométricos del cauce y el puente y el diámetro de los sedimentos.

A continuación, se presenta una descripción de la teoría del régimen y de la velocidad crítica con sus respectivas metodologías de erosión generalizada más conocidas.

2.3.1 Teoría del régimen

La teoría del régimen fue propuesta por Kenedy en 1895 a partir de observaciones y mediciones de canales no revestidos donde obtuvo que la velocidad del flujo de un cauce con dimensiones estables depende estrictamente de la profundidad de equilibrio de los canales.

Lacey entre 1929 y 1933 continuó con el análisis de Kenedy recabando información de distintas variables hidráulicas como el radio hidráulico, pendientes de fondo, perímetros mojado y descargas de una gran gama de canales que se creían que estaban en régimen. Así se obtuvieron las primeras ecuaciones para tener una orientación cuantitativa de la teoría.

El término régimen se emplea para definir el estado de equilibrio en que se encuentra un canal que presente una situación de equilibrio entre su ancho, profundidad y pendiente con el caudal líquido y sólido (Maza Álvarez & García Flores, 1996).

Los métodos más conocidos para el cálculo de la erosión general son los propuestos por Lacey (1930) y Blench (1969).

2.3.2 Teoría de velocidad crítica

La velocidad crítica se define como la velocidad necesaria para comenzar el movimiento de los sedimentos, utilizando como principales variables el diámetro de las partículas, caudal, profundidad

y ancho del cauce. Esta teoría se basa en el supuesto que la socavación ocurre cuando la velocidad media del flujo y la velocidad crítica se igualan, donde suele alcanzarse la máxima profundidad. Melville y Coleman (2000) mencionan que estos métodos suelen ser conservadores pues canales que transportan sedimentos en algunos casos se encuentran estables y no erosionan, ya que los canales se encuentran en equilibrio con el suministro de sedimentos, tal como lo establece la balanza de Lane.

Los métodos que estiman la socavación general a partir de esta teoría son: Laursen (1963), Maza Álvarez y Echeverría Alfaro (1973), Maza y García Flores (1978), Neil (1980) y Lischvan-Levediev (1984).

En el siguiente capítulo se analizarán comparativamente las ecuaciones que utilizan el concepto de teoría del régimen y de velocidad crítica mencionados anteriormente.

Comparaciones entre las fórmulas más utilizadas han sido analizadas por Bettess (2002) y Lauchlan y May (2002), donde se indica que los cálculos no son del todo confiables, no especifican casos en los que existe más de un canal o la crecida abarca la planicie de inundación y no se consideran aspectos de la dinámica fluvial como la variación de la profundidad o la erosión lateral cuando se desarrolla la crecida. En las publicaciones mencionadas anteriormente se evidencia que muchos métodos basados en la velocidad crítica tienen a sobre estimar la socavación porque el tiempo de la crecida no es suficientemente largo como para alcanzar la velocidad de equilibrio y con ello la profundidad máxima que se plantea en estas ecuaciones, además, luego del peak de la crecida se rellena parte del material removido del fondo, aumentando el nivel del lecho y buscando un nuevo equilibrio. En cambio, los métodos basados en la teoría del régimen tienden a sub estimar la socavación.

Schreider et al (2001) y Farias et al (2008), aplicaron el método Laursen (1963), Blench (1969), Maza y Echeverría Alfaro (1973), Maza y García Flores (1978) y Lischvan-Lebediev (1984) e indican que está última es la que se mejor aproxima a las mediciones realizadas en ríos de llanura.

2.4 Caso no estacionario

La figura 2.2 muestra que el transporte de sedimentos tiene un desfase con respecto al hidrograma, teniendo un descenso más lento, generando erosión durante el aumento de caudal debido a un déficit

de sedimentos y sedimentación luego del peak producto del superávit. También se han registrado el caso contrario, donde se produce sedimentación y luego socavación (Martín, 2002), esto es posible por la disponibilidad de sedimentos después de un periodo sin crecidas. Un estudio realizado por Dai y Lu (2010) en el río Yangtze evidenció que en eventos con mayor periodo de retorno había mayor disponibilidad de sedimentos en el flujo, generando más depositación en el lecho y la planicie de inundación que en años sin grandes crecidas.

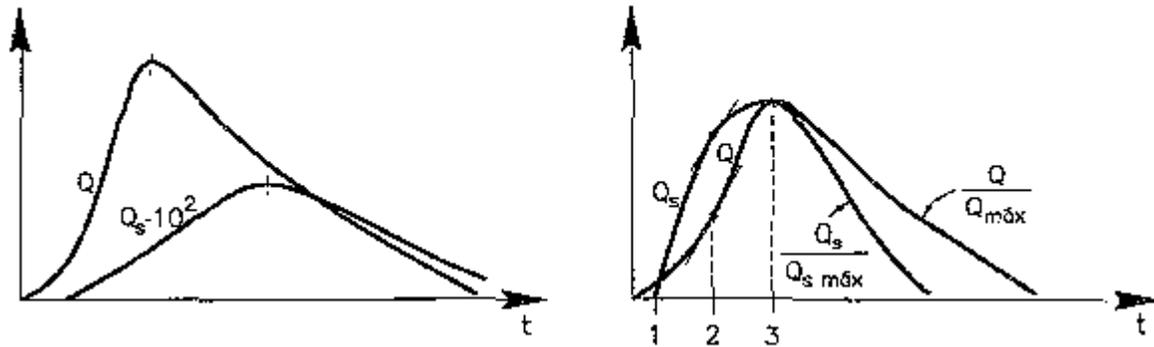


Figura 2.2 Hidrograma y sedimentograma desfasados temporalmente en una crecida imaginaria(a) y los mismos diagramas en crecidas en los que se tienen medidas (b).

Fuente: Martín Vide (2002)

Su y Lu (2012) propusieron una técnica de colocación de columnas de ladrillo numerados en el lecho de los ríos para medir la profundidad de socavación y la altura depositada durante una crecida determinada. Otra publicación de los mismos autores (Su y Lu, 2016) estudia la erosión generalizada a corto plazo durante una crecida determinada, donde compara el transporte de sedimentos y la socavación del lecho de los ríos Choshui y Dachia en Taiwan, evidenciando que el lecho del río descendía 6 m durante una crecida y que luego la sedimentación elevó el nivel del fondo hasta 1.6 m sobre el nivel original. Además proponen una ecuación que relaciona parámetros como la profundidad del cauce, el diámetro medio de las partículas, la viscosidad, la densidad del agua y de sólidos, y también parámetros del hidrograma como el caudal el tiempo al peak.

Martin *et al* (2019) estudió la erosión transitoria del río Pilcomayo en Bolivia, donde estima la erosión generalizada y la sedimentación en un perfil del río, utilizando datos de una serie de tiempo de años. En el estudio se utilizan ecuaciones a partir de la conservación de la masa, concluyendo que el flujo y la carga de sedimentos puede ser uno de los factores que contribuyen a la socavación transitoria.

2.5 Conclusión

Se presentó la teoría detrás de las fórmulas que se presentaran en el próximo capítulo, la experiencias previas respecto al uso de los métodos y como se ha considerado el régimen hidráulico y la estacionalidad del flujo, siendo la estacionalidad uno de las variables relevantes a incluir en el cálculo.

CAPÍTULO 3 MÉTODOS

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta los métodos utilizados para el análisis de la erosión y depositación en el tiempo, así como las características de la zona de estudio.

3.2 Metodologías de cálculo de erosión generalizada

En la literatura se encuentra disponible un gran número de relaciones empíricas para estimar la erosión generalizada. A continuación se presentan las ecuaciones de Lacey (1930), Laursen (1963), Blench (1969), Maza Álvarez y Echeverría Alfaro (1973), Maza y García Flores (1978), Neil (1980) y Lischtvan-Levediev (1984) para estimar la profundidad de socavación. Todos los métodos consideran caudal constante para su aplicabilidad.

3.2.1 Lacey (1930)

La fórmula de Lacey (1930) se basa en la teoría del régimen y en observaciones realizadas por Lindley (1919) en canales ubicados en India. Entrega una ecuación para evaluar el estado estable luego de ocurrir la erosión.

Para ríos en lechos aluviales, se tiene la siguiente expresión.

$$h_s = 1.34 \left(\frac{q}{1.76d^{0.5}} \right)^{1/3} \quad (3.1)$$

donde h_s es la profundidad de erosión generalizada en m, q es el caudal de diseño en m^3/s , d es el diámetro medio de las partículas más representativas en el fondo del lecho del río en m.

Para el caso de ríos semialuviales, con márgenes definidos por lechos erosionables se tiene la siguiente ecuación, que es válida para río con un ancho de cauce muy grande comparado con la profundidad del agua.

$$h_s = \frac{1.213Q^{0.63}}{f^{0.33}W^{0.6}} \quad (3.2)$$

donde Q es el caudal de diseño en m^3/s , W es el ancho superficial del cauce en m y f es el coeficiente de sedimentación de Lacey que es mostrado en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Valores de coeficiente según diámetro de la partícula

Material	Clase de material	Diámetro medio de la partícula (mm)	f
Limo	Muy fino	0.052	0.4
	Fino 1	0.081	0.5
	Fino 2	0.12	0.6
	Fino 3	0.158	0.7
	Medio	0.233	0.85
	Normal	0.323	1
Arena Fina	Media	0.505	1.25
	Gruesa	0.725	1.5
Arena más gruesa	Fina	0.988	1.75
	Media	1.290	2
	Gruesa	2.422	2.75
Grava	Media	7.280	4.75
	Pesada	26.1	9
Cantos rodados	Pequeño	50.1	12
	Medio	72.5	15
	Grande	188.8	24

3.2.2 Blench (1969)

La fórmula de Blench (1969) se basa en la teoría del régimen para plantear el método, diferenciando entre suelos cohesivos y no cohesivos.

Para suelos no cohesivos, se propone la siguiente ecuación.

$$h_s = \left(\frac{q}{4.28d^{0.25}(1 + 0.012C)} \right)^{0.67} \quad (3.3)$$

donde q es el caudal unitario con respecto a su ancho efectivo en m^2/s y d es el diámetro de las partículas más representativas del fondo del lecho del río en m y C es una constante cuyo valor usualmente es 4.8 (Alcides et al 2018).

Para suelos cohesivos, se tiene la siguiente expresión.

$$h_s = \left(\frac{q}{4.28d^{0.25}} \right)^{0.67} \quad (3.4)$$

3.2.3 Laursen (1963)

La formula de Laursen (1963) es válida en condiciones de aguas claras y en partículas del lecho no cohesivos ($d > 0.075$ mm). Se argumenta que la socavación en una zona contraída llega al equilibrio cuando la tensión de corte que está actuando alcanza un valor crítico de resistencia del material erosionable.

$$h_s = \left(\frac{q}{6.32d^{0.33}} \right)^{0.857} \quad (3.5)$$

3.2.4 Maza Álvarez y Echeverría Alfaro (1973)

La fórmula de Maza Álvarez y Echeverría Alfaro (1973) es válida para sedimentos de tamaño menor a 6 mm, principalmente arenas y gravas:

$$h_s = 0.365 \left(\frac{q}{d^{0.2}} \right)^{0.784} \quad (3.6)$$

3.2.5 Maza y García Flores (1978)

La deducción de este método se basa en la relación de la expresión adimensional de la velocidad media y velocidad crítica en cauces no cohesivos e hidrodinámicamente rugosos. Se tiene la siguiente expresión que calcula la profundidad de socavación en el lecho.

$$h_s = \left(\frac{q}{6.05d^{0.35}}\right)^{0.87} \tag{3.7}$$

3.2.6 Neil (1980)

Como se muestra en la figura 3.1, la sección erosionada debe considerarse de manera detallada, en caso contrario, el cálculo resulta aproximado, por ello se debe dividir la sección en franjas o subsecciones para posteriormente determinar la altura máxima que iguala a la altura crítica de arrastre. Este método plantea diferentes formulaciones según el tipo de sedimentos del río.

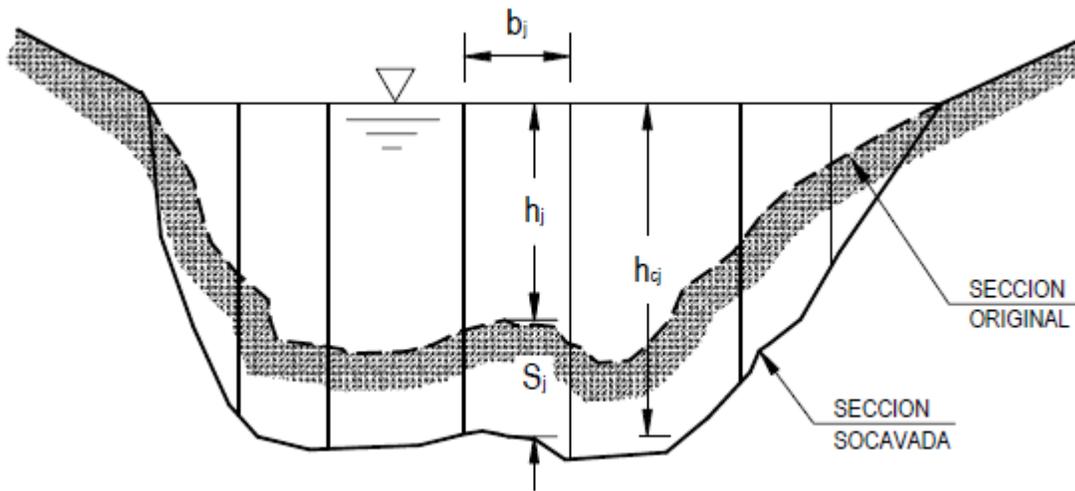


Figura 3.1 Esquema metodología de Neil (1980).

Fuente: Manual de carreteras N° 3 (2018).

Para el caso de sedimentos finos:

$$h_{cj} \ln \frac{12h_{cj}}{k_s} = \frac{q_j}{0.787\sqrt{gd}} \tag{3.8}$$

donde h_{cj} es la altura de escurrimiento para la condición de arrastre crítico en la franja j en m, k_s es la aspereza o rugosidad determinante de la pérdida de carga, q_j es el caudal unitario con respecto al ancho de una sección j y g es la aceleración de gravedad en m/s^2 .

Según el Manual de Carretera Volumen N°3 (2018), se utiliza $k_s = D_{65}$ y $d = D_{50}$, mientras que para sedimentos gruesos de granulometría extendida que presenta tendencia a acorazamiento, se utiliza $d = D_{84}, D_{90}$ o D_{95} .

Donde $D_{50}, D_{65}, D_{84}, D_{90}$ y D_{95} es el diámetro máximo de partícula correspondiente al 50 %, 65 %, 84 %, 90 % y 95 % más fino de la curva granulométrica respectivamente.

Para el caso de sedimentos finos:

$$h_{cj} = \left(\frac{q_j}{1.81\sqrt{gd}^{0.33}} \right)^{0.855} \quad (3.9)$$

La expresión que calcula la profundidad de socavación de la franja j , está definida por:

$$S_j = h_{cj} - h_j \quad (3.10)$$

donde S_j es la p y profundidad de socavación en la sección j de ancho b_j en m y h_j es la altura original sin socavar en m .

3.2.7 Lischvan-Lebediev (1984)

La hipótesis sobre la que se trabaja considera la distribución uniforme de caudal durante todo el proceso erosivo, que es válido para casos de transporte generalizado y aguas claras. Para evaluar la velocidad mínima a la que ocurre el movimiento, se considera el diámetro de las partículas (Moreno *et al*, 1998). La expresión para calcular la profundidad de socavación está dada a continuación.

$$h_s = \left(\frac{\gamma h_{oi}^{5/3}}{4.7d^{0.28}\beta} \right)^{0.71} \quad (3.11)$$

$$\gamma = \frac{Q}{h_m^{5/3} B_e} \quad (3.12)$$

$$\beta = 0.8416 + 0.03342\text{Ln}(T) \tag{3.13}$$

donde h_{oi} es la profundidad antes de la erosión en la vertical de la sección i en m, h_m es la profundidad media de la sección antes de la erosión en m, γ es un coeficiente y β es un coeficiente que depende del periodo de retorno que debe ser mayor a 15 años según Schreider *et al* (2001) y mayor a 2 años según el Manual de Carreteras (2018).

La Ecuación 3.14 también se puede expresar en función del caudal por unidad de ancho, donde se considera β igual a 1, el cual se corresponde a un periodo de retorno de 115 años aproximadamente (Schreider *et al*, 2001).

$$h_s = \left(\frac{q}{4.7 * d^{0.28}}\right)^{0.71} \tag{3.14}$$

Lauchlan y May (2002) resumieron todas las fórmulas presentadas en la Ecuación (3.15), cuyos coeficientes se presentan en la tabla 3.2.

$$h_s = c_0 \left(\frac{q}{c_1 * d^{c_2}}\right)^{c_3} \tag{3.15}$$

Tabla 3.2 Coeficientes de relación genérica

Ecuación	c₀	c₁	c₂	c₃
Lacey (1930)	1.34	1.76	0.5	1/3
Blench (1939)	1	4.28	0.25	0.67
Laursen (1963)	1	6.32	0.33	0.857
Maza y Echeverría (1973)	0.365	1	0.2	0.784
Maza y García (1978)	1	6.05	0.35	0.87
Neil (1980)	1	8.869	0.33	1
Lischtvan -Lebediev (1984)	1	4.7	0.28	0.71

De acuerdo con los antecedentes de las metodologías estas se utilizan para régimen permante, considerando el caudal y las propiedades geometricas del cauce como el ancho, la velocidad y la altura de escurrimiento constantes, sin embargo, se propone una metodología que considere que estas variables no sean constantes, para ello, se deben considerar estadísticas fluviométricas para un periodo de tiempo y estimar las curvas de gasto para cada una de las variables geométricas del cauce. Se espera

que con esta metodología se pueda conocer el comportamiento del lecho de un río durante un periodo de tiempo.

3.2.8 Cálculo no estacionario

En la práctica el cálculo de la erosión generalizada se hace mediante las formulaciones mostradas en el capítulo anterior considerando solo el caudal de diseño, excluyendo variables como la duración de la crecida, la variación de la cantidad de sedimentos y la depositación. La forma de incluirlas es posible gracias a modelos numéricos en una, dos y tres dimensiones como los incluidos en HEC-RAS y SRH-1D desarrollados por el U.S Army Corps of Engineers y Bereau of Reclamation respectivamente, que requieren de datos fluviométricos, granulométricos y batimétricos que no siempre están disponibles, sumado la dificultad de calibrar y validar estos modelos, proceso que tienen un costo computacional alto, especialmente si se tiene en cuenta que se necesita información de años para poder realizar esta tarea.

Poder calcular la erosión generalizada de una manera no estacionaria entrega la posibilidad de evaluar el comportamiento del lecho durante el desarrollo y recesión de una crecida además de la evaluación a largo plazo, pudiendo evaluar la erosión máxima durante el evento y la depositación posterior. Considerar este aspecto puede resultar útil para diseñar de una forma más físicamente basada respecto a la condición propia del río y no sobre estimar o subestimar la erosión, que se traduce en una inversión mayor o un diseño deficiente.

La dinámica de relleno de la fosa de socavación provocada por la erosión local desarrollada por Link et al. (2020) y está dada matemáticamente por:

$$z_{d[i]} = \begin{cases} 0, & \xi g_{s[i-1,j]}^* \leq g_{s[i,j]}^* \\ \frac{\alpha}{\rho_s(1-p)} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\xi g_{s[i-1,j]}^* - g_{s[i,j]}^*}{z_{i-1}} \right) \Delta t, & \xi g_{s[i-1,j]}^* > g_{s[i,j]}^* \end{cases} \quad (3.16)$$

donde $z_{d[i]}$ es la profundidad de relleno de la fosa de socavación, j e i son contadores para el tamaño del sedimento en la curva granulométrica e instante discreto de tiempo, respectivamente, p es la porosidad, g^* es la capacidad del flujo de transportar sedimentos que se estima a través de la

formulación del transporte fraccional propuesta por Dey (2014) utilizando los datos sedimentológicos y el transporte de fondo se calcula con Meyer-Peter y Müller (1948). ξg^* es la disponibilidad del sedimento en la fosa de socavación, y α y ξ son parámetros del modelo, donde ξ representa la fracción de sedimentos del instante de tiempo anterior que está disponible en el flujo. Su valor será mayor a 1 cuando hay una mayor cantidad de sedimentos disponibles como en crecidas, mientras que será menor a 1 en caso de haber un déficit.

La forma numérica de calcular el relleno mencionado anteriormente fue desarrollada por Pizarro *et al* (2021) en Matlab y es la herramienta que se utilizó como base para desarrollar el método.

La formulación para el cálculo no estacionario se realiza calculando la erosión con los métodos descritos en el apartado 3.2 sumado al cálculo de la depositación con la ecuación 3.16 para un intervalo de tiempo. Matemáticamente está dada como:

$$h_{t[i]} = h_{s[i]} - z_{a[i]} \quad (3.17)$$

Donde $h_{t[i]}$ es la profundidad total para el intervalo de tiempo i .

3.3 Caso de verificación del cálculo de erosión general

La comprobación del modelo propuesto se hizo comparando los cálculos con mediciones de Abdel – Fattah *et al* (2004), usando dos perfiles transversales en Sohag y Bani-Sweif sobre el río Nilo en Egipto.

La comprobación consistió en graficar en conjunto las mediciones realizadas por Abdel – Fattah *et al* (2004), la estimación realizada por Farias *et al* (2008) utilizando la metodología de Lischtvan – Lebediev (ecuación 3.14) y la estimaciones realizadas con el mismo método pero en el modelo con el fin de corroborar que lo modelado no tiene error al implementarse.

En las figuras 3.2 y 3.3 se muestra los perfiles transversales en Sohag y Bani-Sweif sobre el río Nilo, Egipto. Se puede observar que el modelo formula correctamente la ecuación de Lishtvan – Lebediev ya que lo calculado con el modelo en Matlab se superpone en la gráfica con lo hecho por

Farias *et al* (2008), sin embargo, Abdel – Fattah et al (2004) menciona que el comportamiento predictivo de las formulaciones van mejorando aguas abajo, donde el perfil transversal en Bani-Sweif presenta un mejor comportamiento, eso es explicado a partir de que las primeras secciones se ven influenciadas por la operación de la presa de Aswan, Egipto donde se presenta un deficit de sedimentos que son retenidos por el embalse produciendo el efecto de aguas claras aguas debajo de la presa.

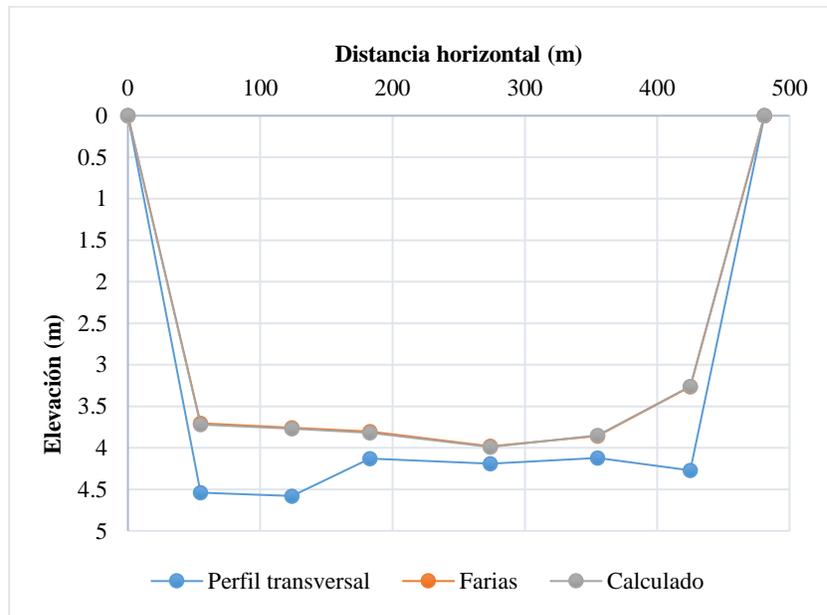


Figura 3.2 Perfil transversal en Sohag, río Nilo.

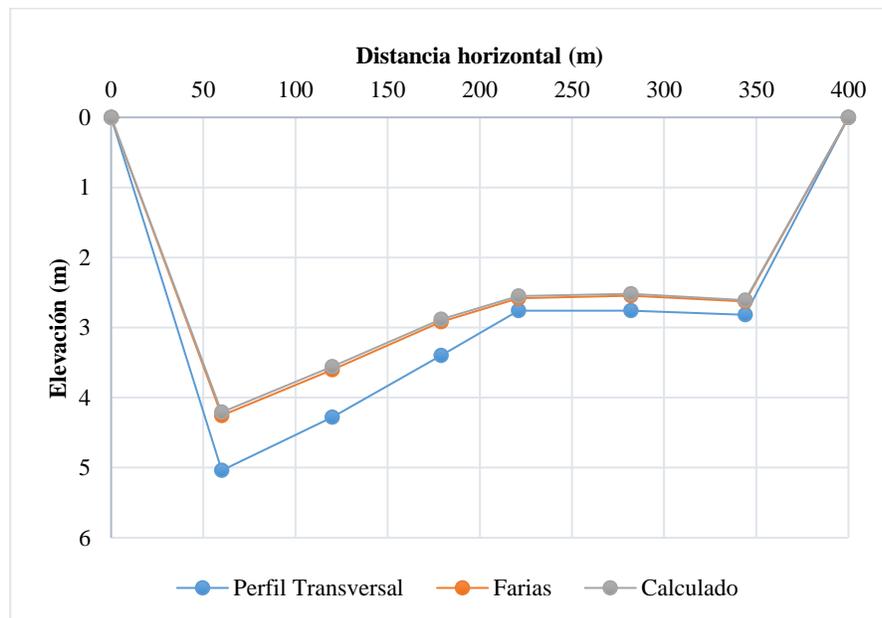


Figura 3.3 Perfil transversal en Bani-Sweif, río Nilo.

3.4 Caso de estudio: Río Laja en Puente Perales

3.4.1 Descripción general

El puente Perales está ubicado en la cuenca del río Laja (3500 km²) en la zona centro-sur de Chile (71°82'74'' E, 58°76'01''S). De acuerdo a la clasificación de Köppen, presenta un clima Csb2: Templado Cálido con Estaciones Seca y lluviosa Semejantes, con precipitaciones del orden de 1.000 mm (EULA, 2006) y un caudal medio anual de 158 m³/s.

La puesta en servicio del puente fue en la década de 1970, tiene un largo de 119.45 m y 4 cepas de sección rectangular con zapata poligonal. Aproximadamente 1500 metros aguas arriba del viaducto, opera la Central Hidroeléctrica Laja. Su construcción comenzó el año 2009 y su operación inició a finales de 2013.

Se define como un proyecto de pasada, aunque cuenta con un muro que genera un embalse de 11 km de longitud. En la zona de estudio, el río Laja presenta un escurrimiento subcrítico. El lecho se compone principalmente de arena gruesa y una pendiente media de 0.0053 (INH, 2021).

La figura 3.1 muestra la zona de estudio incluyendo la ubicación del Puente Perales, la estación fluviométrica y la Central hidroeléctrica Laja

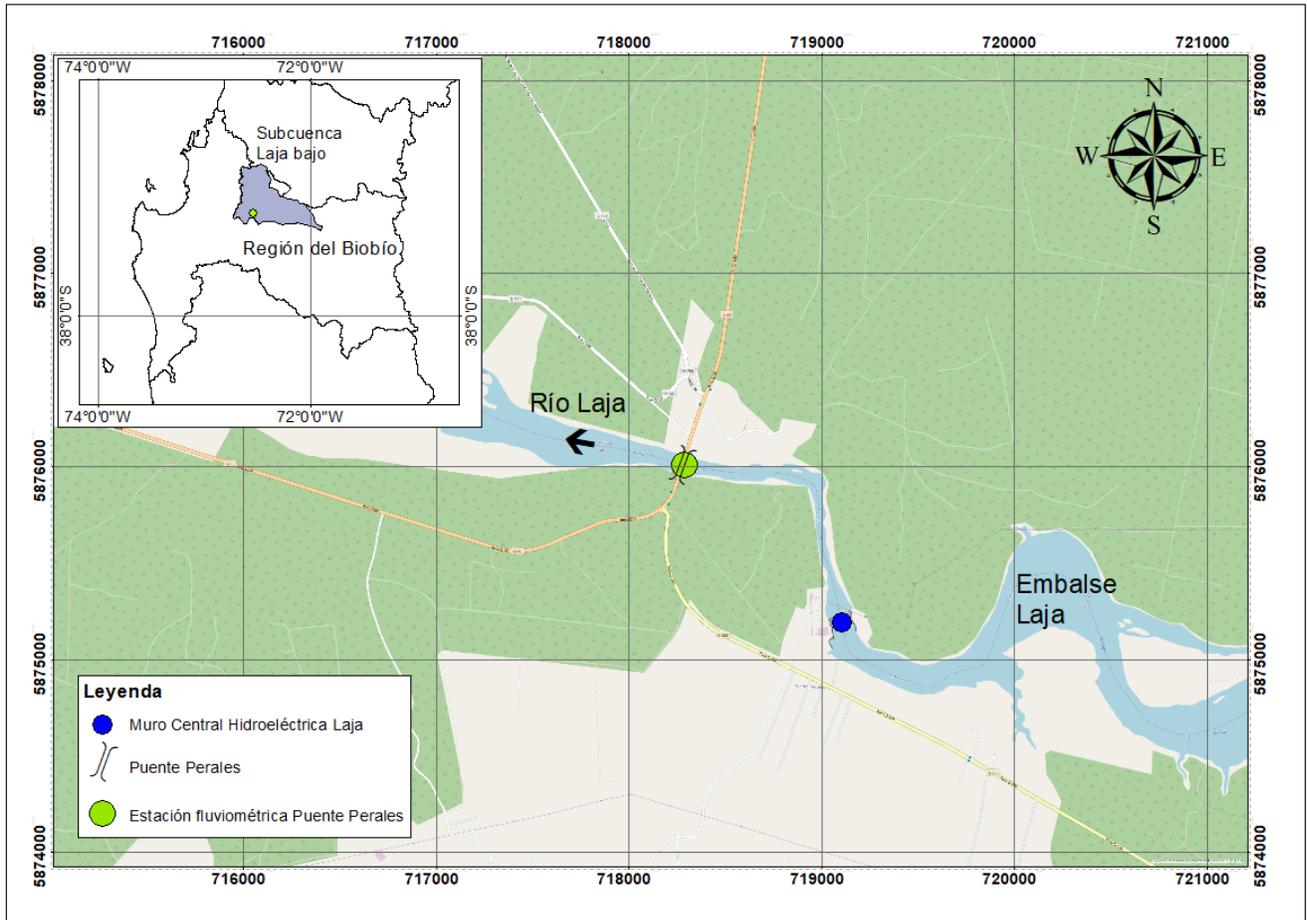


Figura 3.4 Ubicación de la zona de estudio

3.5 Antecedentes topográficos

Se cuenta con información batimétrica de distintas instancias que se ven representadas como un perfil longitudinal en la figura 3.5 y como un perfil transversal en la figura 3.6.

El primer dato corresponde a las cotas de la losa de las zapatas del puente. La cota superior se supone como la original del lecho en el año de construcción del puente, ya que no se cuentan con los planos originales.

El segundo dato es de 1990 y muestra la cota de fondo, este dato fue obtenido de los planos de reparaciones hechas ese año ya que los pilotes se encontraban a la vista.

El tercer grupo de datos se obtuvo del trabajo en terreno realizado por el equipo que participó en el estudio para el proyecto de la central hidroeléctrica y que está disponible en la página del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). Dicho estudio fue realizado entre febrero y marzo del año 2006. Estos datos abarcan una batimetría que muestra un perfil longitudinal desde el muro de la central hasta el Puente Perales.

El cuarto grupo de datos batimétricos fue obtenido por el INH, en una campaña realizada en terreno entre el 19 y 22 de Noviembre del año 2020 en el contexto de un estudio de diagnóstico de puentes en varias regiones de Chile, cuyo mandante fue la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas. El estudio se realizó desde 1 km aguas arriba del puente y hasta cerca de 400 m aguas abajo, obteniendo un perfil longitudinal y varios perfiles transversales.

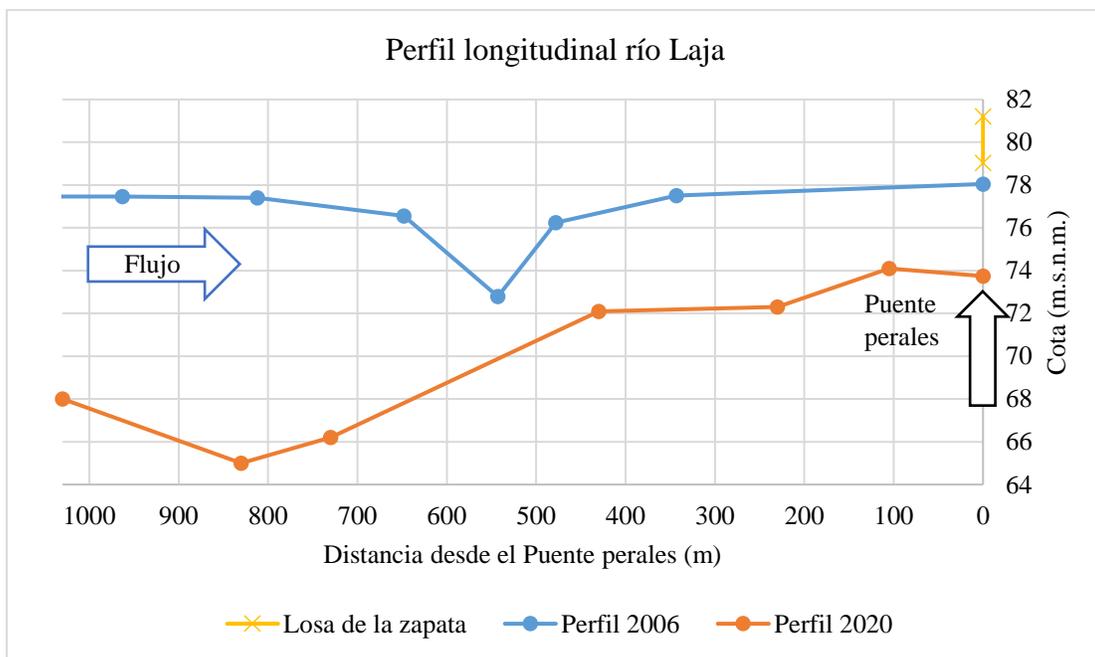


Figura 3.5 Perfil longitudinal del río Laja en Puente Perales

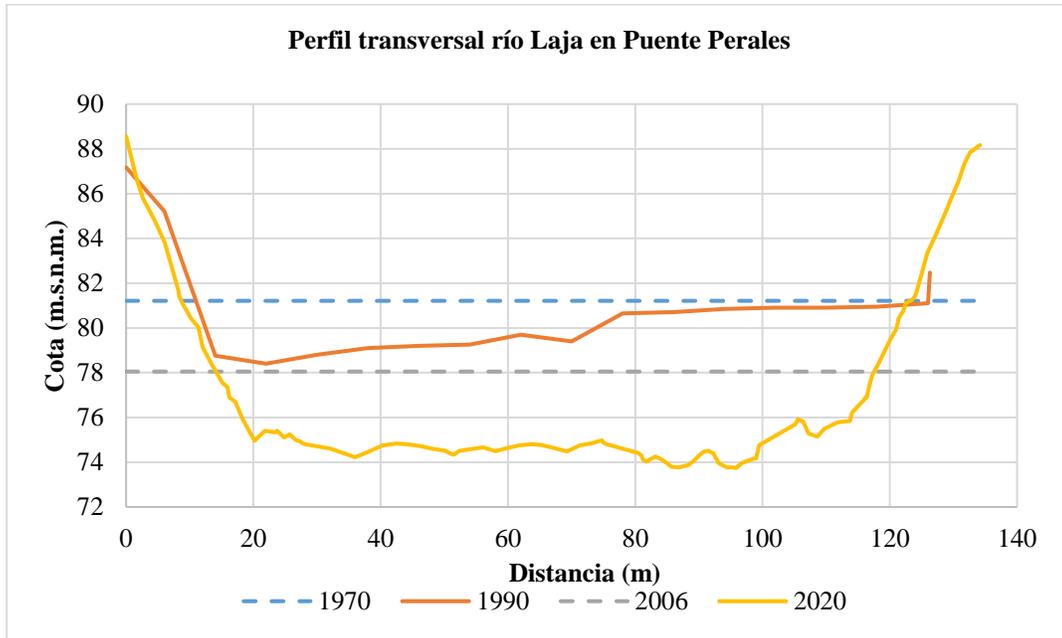


Figura 3.6 Perfil transversal del río Laja en Puente Perales

3.6 Antecedentes fluviométricos

En las cercanías del puente se encuentra la estación “Río Laja en puente Perales”, ubicada en las coordenadas 71°82’87’’ E, 58°76’00’’ S, perteneciente a la red hidrométrica de la Dirección General de Aguas (DGA), que cuenta con información fluviométrica de caudales medios diarios comienza el 1 de agosto de 1988 hasta el 31 de diciembre de 2020. También existen registros diarios en la plataforma CR2 que datan desde el 28 de agosto de 1957 hasta el 31 de marzo de 2019. Se interpolaron los datos existentes para modelar utilizando datos cada 24, 12 y 8 horas.

3.6.1 Análisis hidrológico

Para este análisis se consideró el año 1970 como la puesta en servicio del puente. En la figura 3.4 se muestra el hidrograma para el escenario antes de la central y en la figura 3.5 los caudales luego de la puesta en marcha.

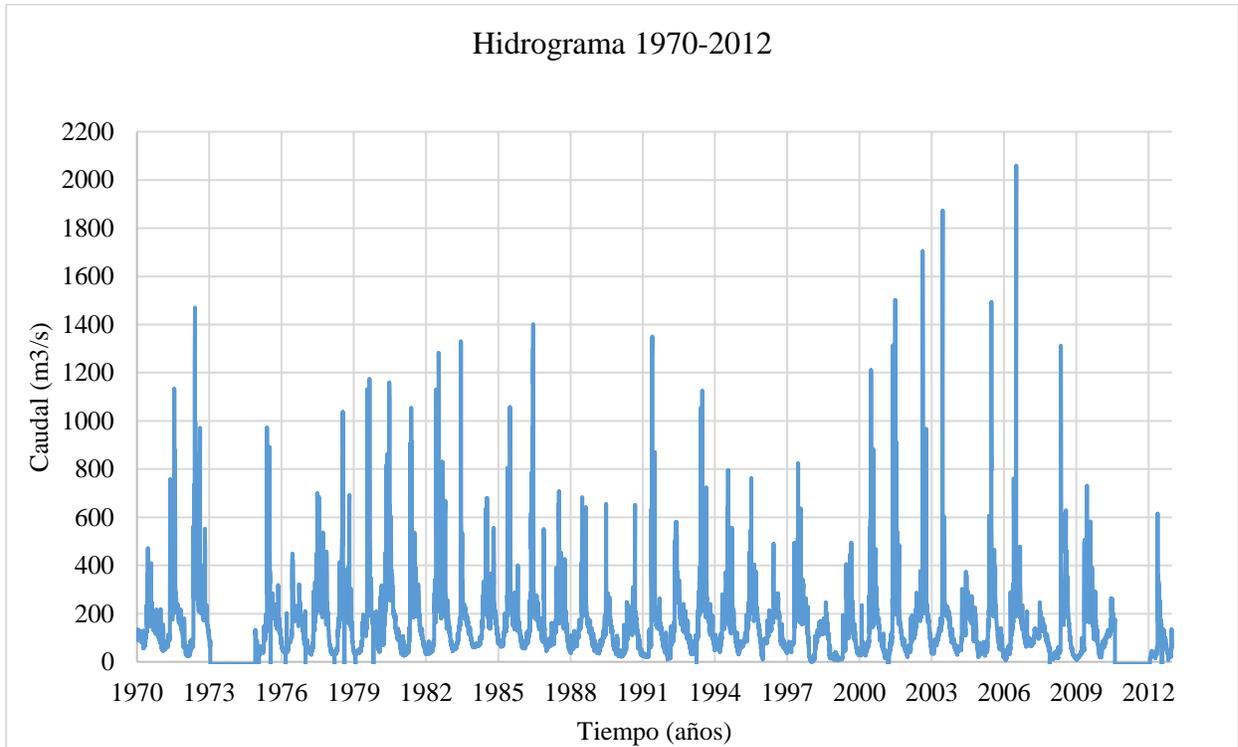


Figura 3.7 Hidrograma periodo 1970-2012

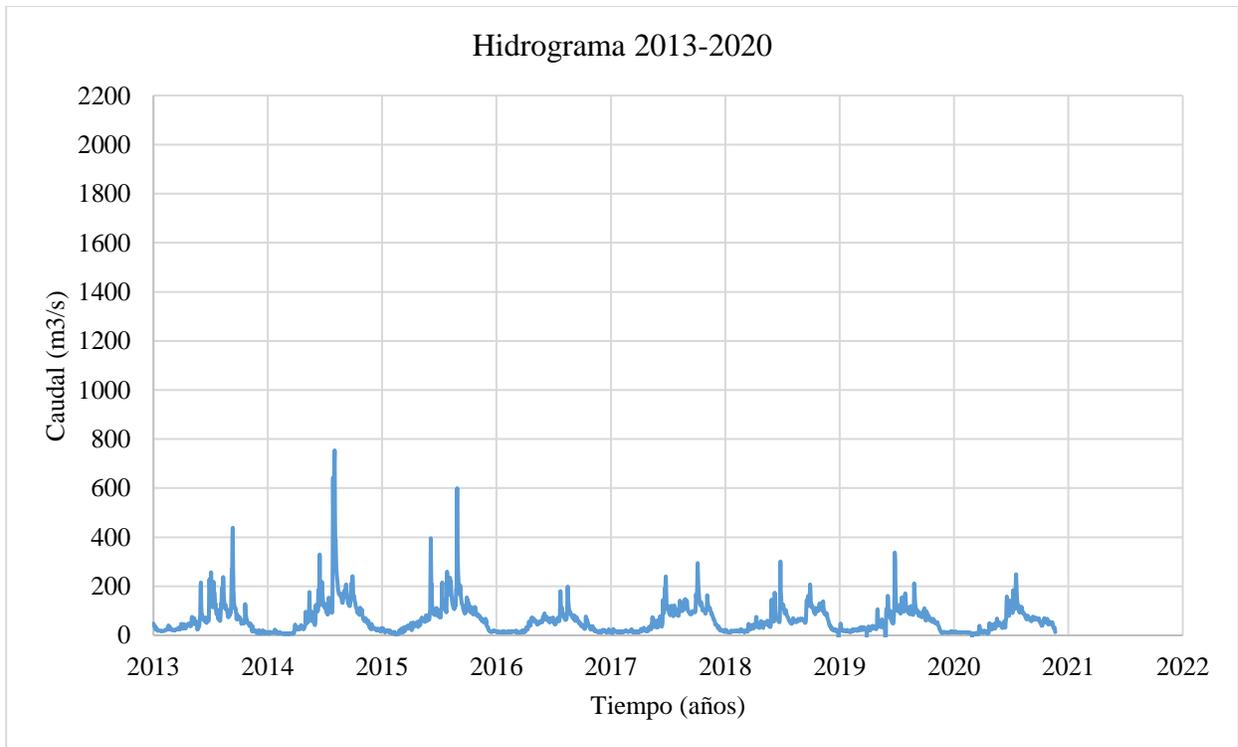


Figura 3.8 Hidrograma periodo 2013-2021

Se observa que en el escenario antes de la represa presenta caudales irregulares que van entre 0.64 y 2060 m³/s con una marcada estacionalidad con caudales bajos entre octubre-marzo y caudales altos entre junio-septiembre, evidenciando un régimen pluvial. Luego de la construcción del embalse se observa una menor variabilidad, con caudales entre 2.92 y 754 m³/s, con peaks diarios que representan el funcionamiento de la central.

Cabe recalcar que desde 1953 se han construido 3 centrales hidroeléctricas en la parte alta de la cuenca (Abanico, El Toro y Antuco), además de boca tomas correspondientes a canales de riego que también provocaban una alteración horaria en la época de estiaje.

3.7 Antecedentes sedimentológicos

Estos datos fueron obtenidos en la campaña realizada por el INH mencionada anteriormente. La caracterización realizada indica que cerca de un 90% de la muestra corresponde a arena media y que el diámetro característico (d₅₀) es 0.526 mm. Otro factor interesante para considerar para el análisis es que la desviación estándar de la muestra es menor a 3, lo que evidencia un lecho no acorazado que es susceptible a la erosión.

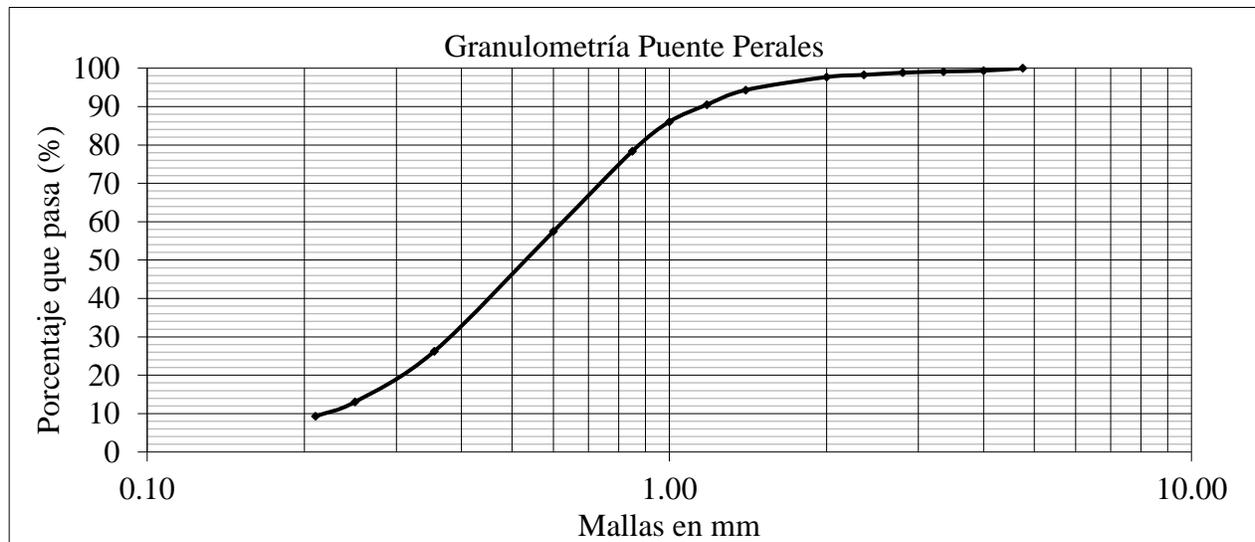


Figura 3.9 Curva granulométrica de la zona de estudio

Tabla 3.3 Diámetros característicos de los sedimentos

Diámetro	Valor	Unidad
d95	1.58	mm
d84	0.958	mm
d60	0.626	mm
d50	0.526	mm
d10	0.217	mm
Cu	2.884	
δg	1.82	

La velocidad a la que comienza el transporte de sedimentos propuesta por Zanke (1977), expresada como:

$$u_c = 1.4(\sqrt{\rho'gd_s} + 10.5v/d_s) \quad 3.18$$

Da como resultado que la velocidad crítica es 0.29 m/s, lo que implica que el transporte de sedimentos comienza a los 80 m³/s, que según el EULA (2006), corresponde a un caudal con cerca de un 70% de probabilidad de excedencia.

3.8 Curvas de gasto

En los anexos de la evaluación ambiental del proyecto Central Hidroeléctrica Laja se encuentran los datos de alturas de escurrimiento calibrados para distintos caudales que fueron mediante HEC-RAS utilizando un número de Manning de 0.03. Como en dichos anexos no se encuentran publicados, se utilizó una sección trapezoidal cuya cota de fondo se estableció en 78 m según las mediciones de 2006. A continuación se presentan los datos obtenidos y las funciones ajustadas a las características geométricas necesarias para el cálculo de erosión con los métodos seleccionados.

Tabla 3.4 Valores de las curvas características

Q (m3/s)	Cota (msnm)	agua h (m)	Velocidad (m/s)	Ancho superficial (m)
31.86	80.15	2.23	0.13	110.18
42.67	80.25	2.33	0.17	110.54
54.07	80.36	2.44	0.21	110.93
66.04	80.46	2.54	0.24	111.29
78.59	80.56	2.64	0.28	111.71
91.71	80.66	2.74	0.31	112.14
119.69	80.87	2.95	0.38	112.92
149.98	81.07	3.15	0.44	113.59
165.99	81.17	3.25	0.47	114.16
182.57	81.28	3.36	0.5	114.96
199.74	81.38	3.46	0.53	115.32
217.47	81.48	3.56	0.56	115.63
315	82	4.08	0.81	115.63
510	82.79	4.87	1.14	116.68
784	83.36	5.44	1.45	118.25
1043	83.78	5.86	1.71	119.4
1469	84.36	6.44	2.23	120.52
1752	84.72	6.80	2.4	122.36
2023	85.04	7.12	2.61	123.47
2109	85.15	7.23	2.59	124.53
2374	85.45	7.53	2.87	124.91
2637	85.75	7.83	3.05	125.92
3505	86.78	8.86	3.88	126.9
4372	87.78	9.86	4.22	129.54

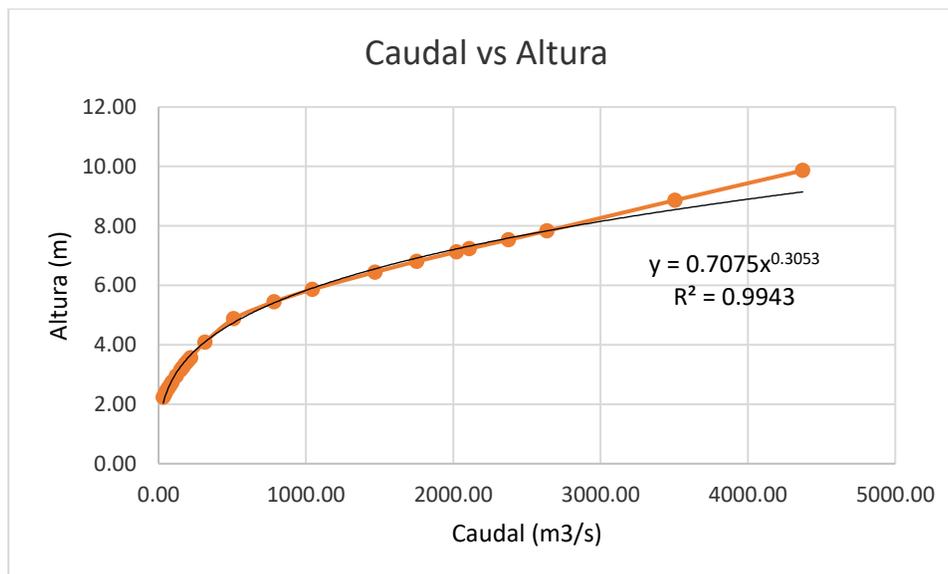


Figura 3.10 Curva característica de caudal vs profundidad

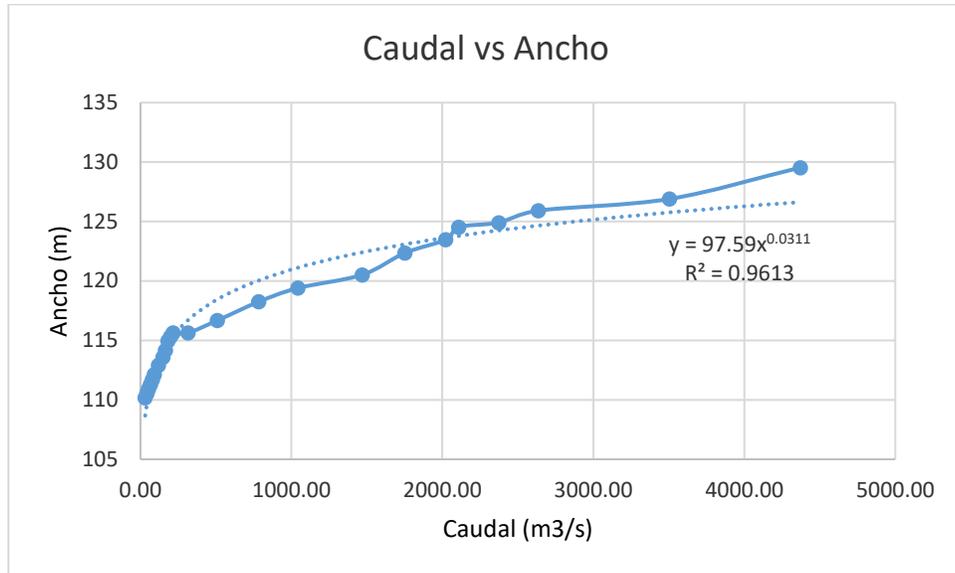


Figura 3.11 Curva característica de caudal vs ancho

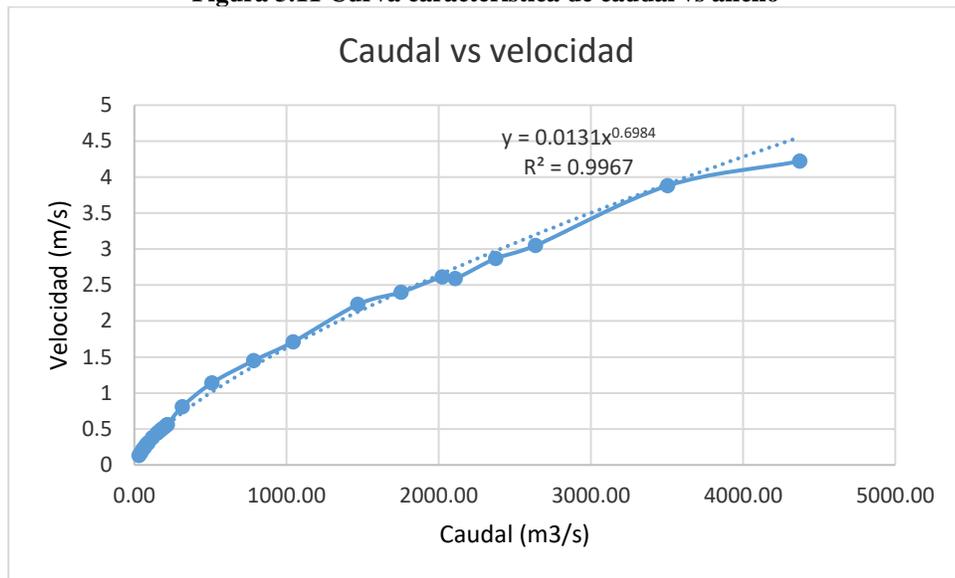


Figura 3.12 Curva característica de caudal vs velocidad

3.9 Modelación

El modelo en Matlab extrae los datos desde una planilla excel donde se organizaron cronologicamente los caudales registrados y se calculó la altura, ancho y velocidad para cada uno según el ajuste hecho para las curvas características. Junto a estos datos se introdujo la curva granulométrica y los parámetros que iban a utilizarse para la modelación.

Al no contar con los planos originales del puente ni su año de construcción, se consideró la cota superior de la losa de la zapata se estableció como el punto de partida para los cálculos y 1970 como el año de puesta en marcha. Para los registros de erosión, se considera la profundidad media y el thalweg. Es importante señalar que no se observa erosión local ni por contracción (INH, 2021).

3.10 Estimación de parámetros y evaluación de desempeño

La estimación del parámetro ξ que gobierna la depositación, se iteró hasta obtener un bajo error cuadrático medio (RMSE) y considerar que la depositación no fuera excesivamente alta.

Para la evaluación del desempeño del modelo se compararon la erosión calculada y la observada para los años 1990, 2006 y 2020 a través del RMSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{si}^{calc} - h_{si}^{obs})^2} \quad 3.19$$

donde h_{si}^{calc} es el i ésimo valor de la erosión calculada, h_{si}^{obs} es el i ésimo valor de la erosión observada y n es el número de registros.

3.11 Conclusiones

Se presentaron las fórmulas utilizadas para el cálculo, como se plantea el caso no estacionario con un modelo que incluya la depositación de sedimentos y los antecedentes del caso de estudio.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos.

4.2 Resultados de la modelación utilizando la metodología propuesta

En la figura 4.1 se muestra el modelo con todas las fórmulas calibradas con valor óptimo encontrado para el parámetro que gobierna la depositación, este valor es $\xi=0.73$ para los años 1970-2012, luego de la construcción del embalse se considera $\xi=0$ ya que teóricamente la cantidad de sedimentos provenientes de aguas arriba debería verse afectada por el eventual corte en el paso de estos por la presencia del muro. Se consideraron datos de caudales cada 8 horas para la modelación.

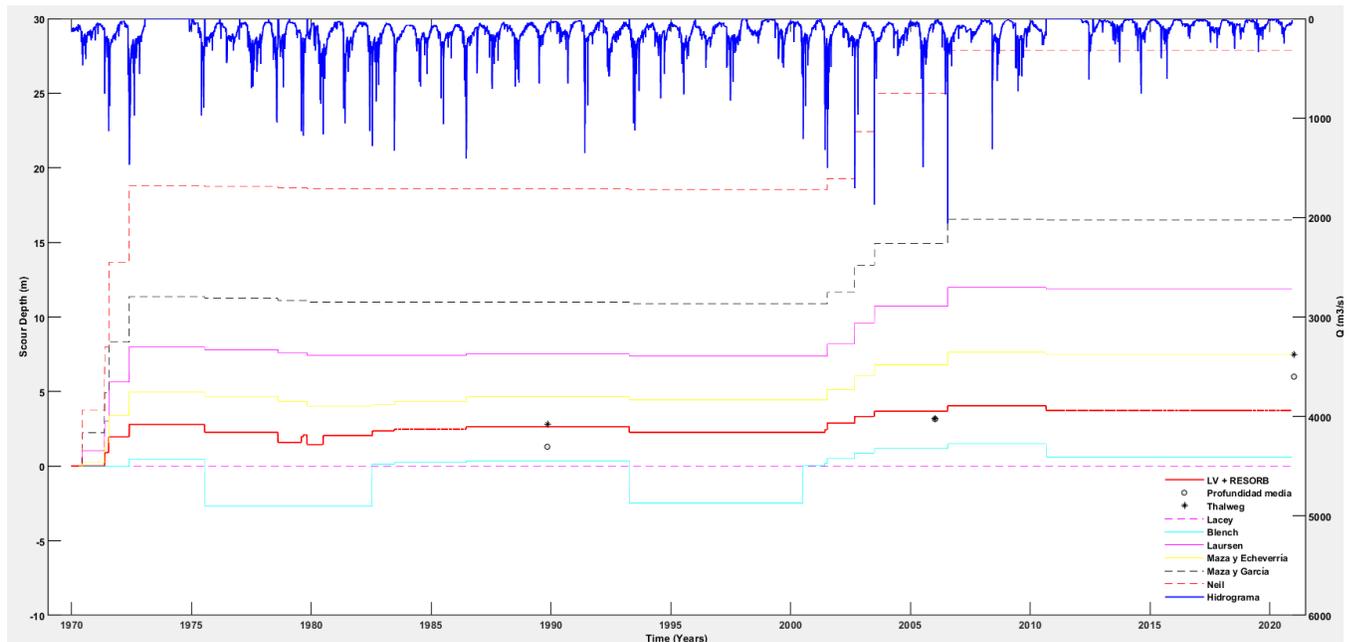


Figura 4.1 Resultados de la modelación con todas las fórmulas

Tabla 4.1 Resultados de la modelación

Año	h media (m)	Thalweg (m)	Litschvan-Levediev (m)	Lacey (m)	Blench (m)	Laursen (m)	Maza y Echeverría (m)	Maza y García (m)	Neil (m)
1990	1.3	2.8	2.7	0	0.4	7.5	4.7	11.0	18.6
2006	3.2	3.2	3.7	0	1.2	10.7	6.8	14.9	25.0
2020	6.1	7.5	3.7	0	0.6	11.9	7.4	16.5	27.9

En la tabla 4.1 se muestra la comparativa entre los resultados de la modelación y los datos existentes. Basandose en esto y en la figura 4.1 se observa que las fórmulas que mejor se adaptan a la modelación son Litschvan-Levediev para el periodo 1970-2006 y Maza y Echeverría para el 2020. Se observó que Maza y García, Maza y Echeverría, Neil, y Laursen sobre estiman, mientras que Maza y Echeverría, Blench y Lacey subestiman el valor de la erosión en comparación con Litschvan-Levediev, confirmado lo expuesto por Farías et al (2008) respecto al buen comportamiento de este método.

Dado los resultados obtenidos con las diferentes fórmulas y la concordancia con los resultados obtenidos por Schreider et al (2001) y Farías et al (2008) se decide utilizar el método de Litschvan-Levediev para el análisis de sensibilidad de los parámetros y variables utilizadas.

Con Litschvan-Levediev para el caso de la profundidad media, el ajuste tiene un RMSE=1.6 m de manera global y si se consideran los años sin la central se obtiene un RMSE=1 m. Si se considera el thalweg el RMSE=2.2 m de manera global y considerando el periodo 1970-2006 el RMSE=0.4 m. Por lo que se considera que usando la profundidad media de manera global y el thalweg para el periodo 1970-2006 se obtienen los mejores resultados.

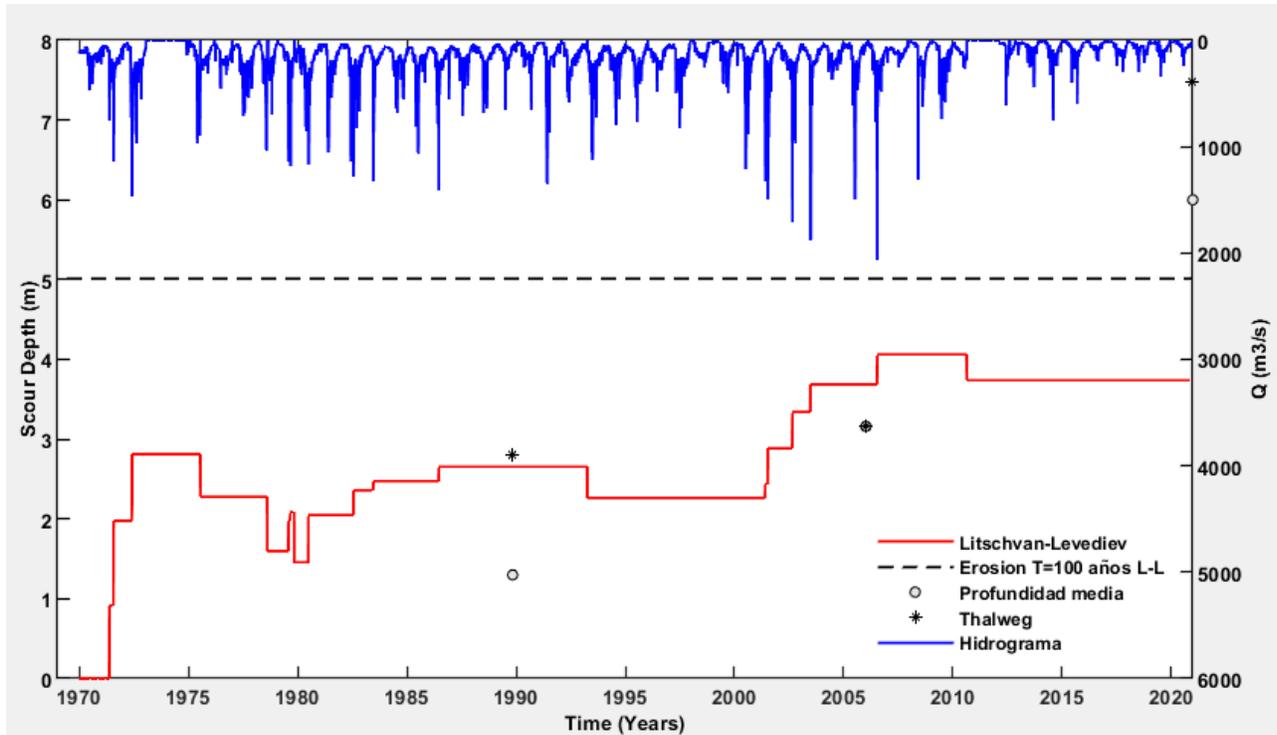


Figura 4.2 Resultado modelación con Litschvan-Levediev

En la figura 4.3 se muestra la sensibilidad al parámetro ξ , que con variaciones centecimales puede alterar la depositación obtenida en más de 7 m. El modelo también es sensible a la discretización del tiempo, por lo que al usar intervalos menores, la sedimentación se puede representar de forma más controlada, en la figura 4.4 se observa que el usar intervalos de tiempo muy grande (24 horas) puede llevar a sobre estimar en exceso la sedimentación, llegando a más de 160 metros, lo que no tiene sentido físico. En la figura 4.5 se evidencia que a menores pasos de tiempo la sedimentación va disminuyendo.

Se consideró la interpolación de caudales hasta 8 horas por la limitación de cantidad de datos capaz de registrar excel.

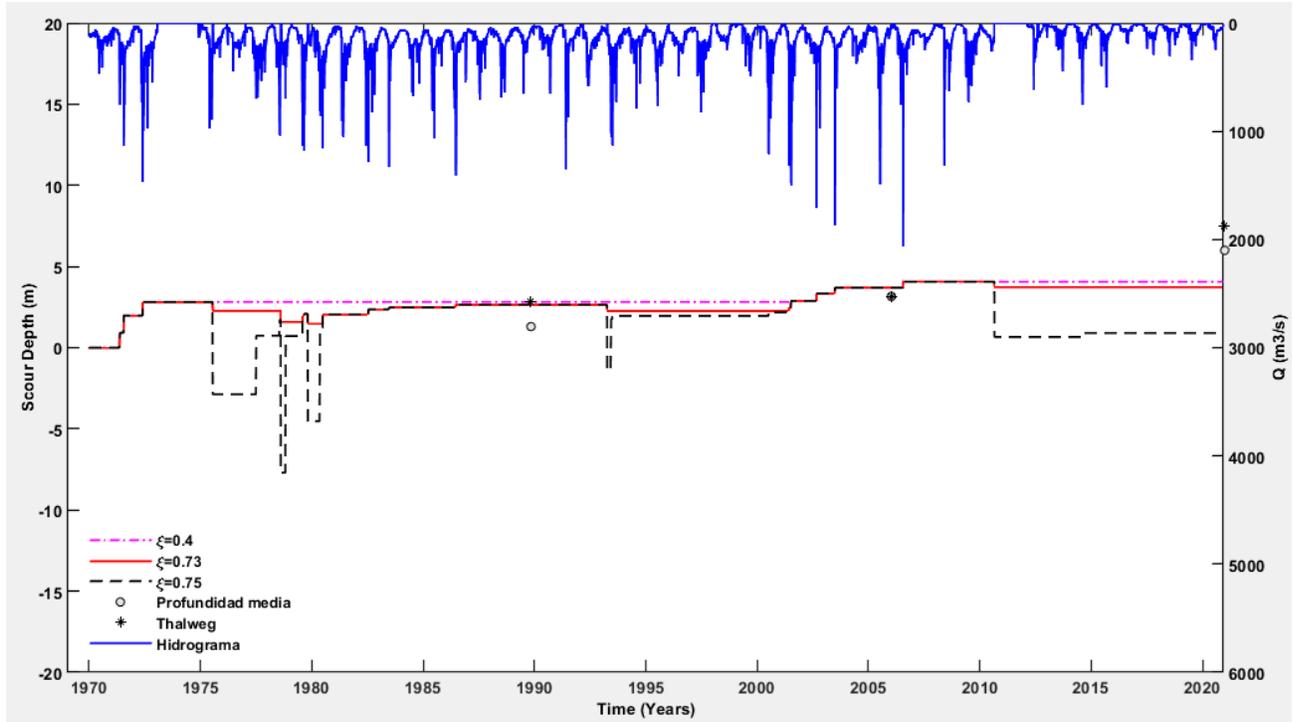


Figura 4.3 Análisis de sensibilidad del parámetro ξ

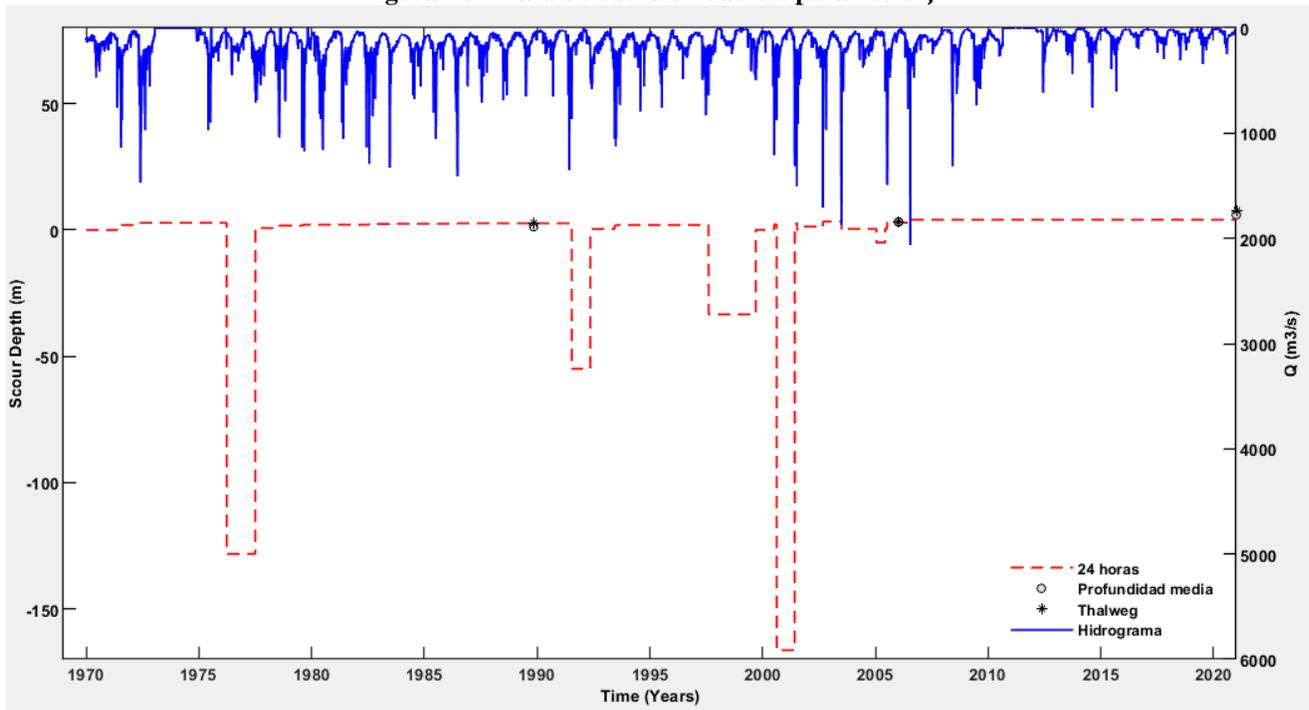


Figura 4.4 Modelo utilizando caudales medios diarios

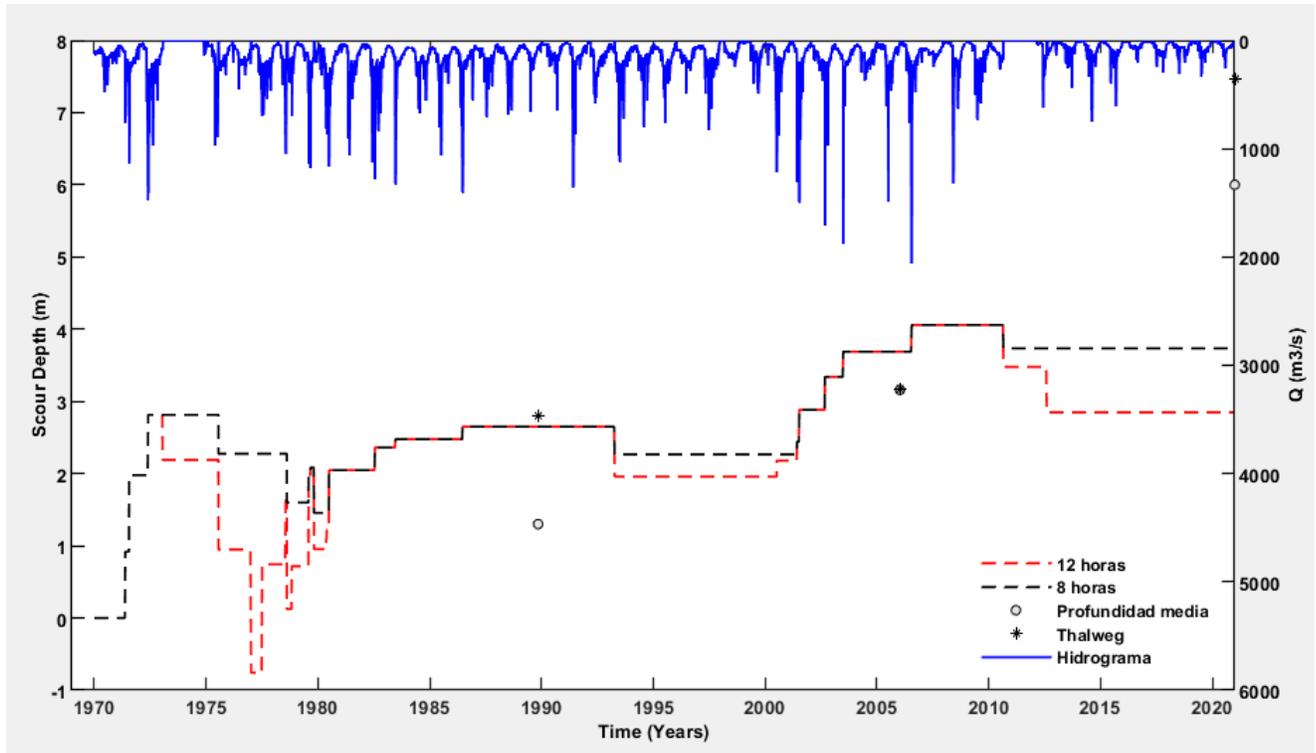


Figura 4.5 Resultados del modelo utilizando caudales cada 8 y 12 horas

Otra variable importante a tener en cuenta tiene que ver con los datos sedimentológicos, por lo visto en el Capítulo 3, todas las fórmulas de cálculo de erosión consideran el d_{50} . En la figura 4.6 se observa que variar -0.14 mm y $+0.26$ mm el diámetro medio de las partículas provoca cambios de 0.75 m y -0.93 m respectivamente. Por lo que es importante caracterizar bien el lecho a la hora de aplicar estos métodos.

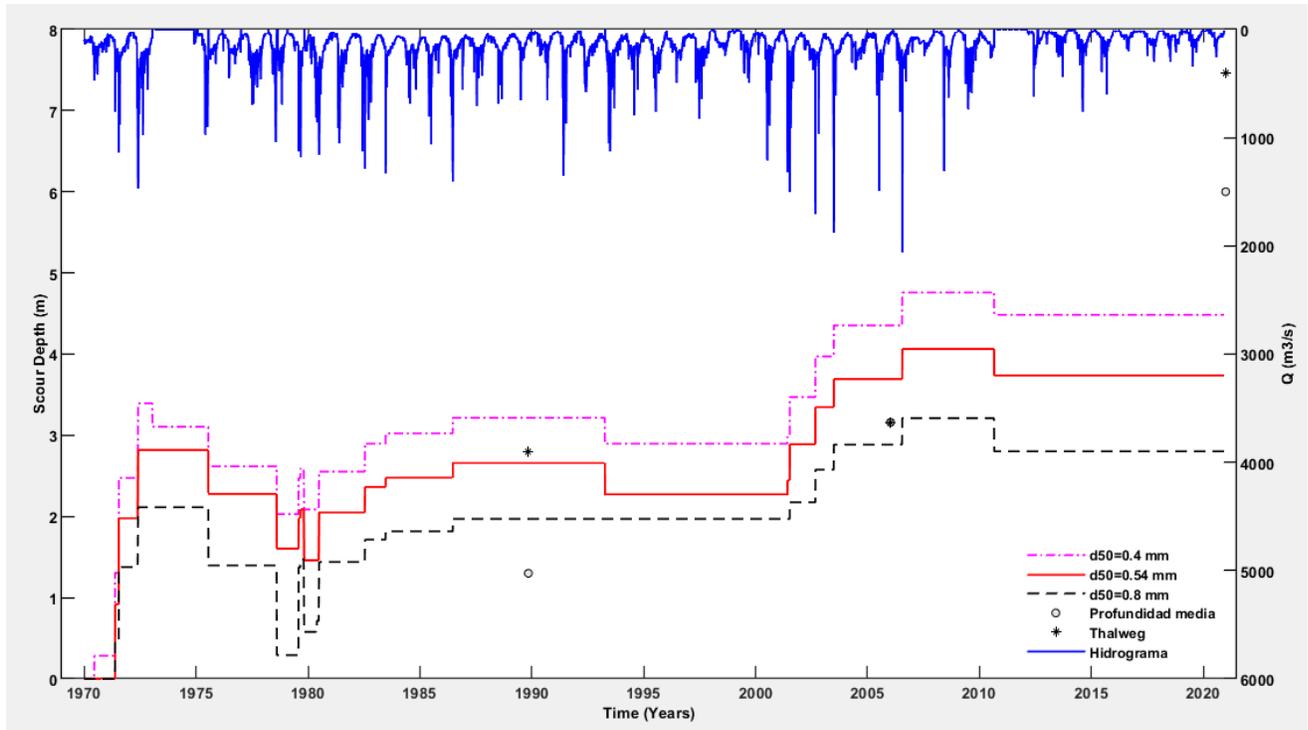


Figura 4.6 Sensibilidad del modelo variando d_{50}

4.3 Análisis

La tasa de erosión en el cauce ha ido en aumento, lo que se puede justificar porque las crecidas alcanzan un máximo mayor en el segundo periodo respecto al primero.

Tabla 4.2 Tasas de erosión

Periodo	Tasa de erosión h media (m/año)	Tasa de erosión Thalweg (m/año)
1970-1990	0.06	0.14
1990-2006	0.12	0.02
2006-2020	0.21	0.31

La diferencia entre el resultado del modelo con las mediciones para el año 2020 y el aumento de la tasa de erosión para el tercer periodo pueden explicarse por dos factores. El primero de ellos es la ocurrencia de una crecida centenaria el año 2006 luego de la medición que se tiene para ese año, que pudo erosionar más de lo que se estimó.

El segundo factor y más evidente, es la presencia de la central hidroeléctrica Laja, que puede estar operando sin hacer purga de sedimentos y por ende generando un déficit de aguas abajo. Un caso

ampliamente estudiado es el caso de la cuenca del río Yangtsé, China, donde se ubica la presa de las Tres gargantas, que ha tenido impactos en el régimen de caudales y de sedimentos. Una investigación realizada por Quiongfang *et al* (2011), evaluó el cambio en la cantidad de sedimentos de manera diaria, mensual, estacional y diaria, evidenciando que a medida que se construían embalses en la cuenca, la carga de sedimentos iba disminuyendo, encontrándose una tendencia de menores concentraciones a medida que pasaba el tiempo, y que, mientras más cerca de las presas se hacían las mediciones, menores eran las concentraciones, produciéndose el fenómeno que se conoce como “*Hungry Waters*” (Kondolf, 1997) o aguas hambrientas por su traducción al español, que hace referencia a la erosión generalizada del lecho aguas abajo del muro. Otro de los estudios realizados en el Yangtsé desarrollado por Huang *et al* (2018), indicaba que la erosión generalizada ocurría principalmente en el periodo de estiaje, alcanzando valores de un 91% de la erosión total.

4.4 Conclusiones

Se presentaron los resultados del modelo calibrado para el análisis del Puente Perales desde su año de construcción hasta el año 2020, encontrándose una alta sensibilidad en el parámetro ξ , en la escala de tiempo utilizada y el d_{50} . También se obtuvo un buen ajuste para los años antes de la construcción de la Central Hidroeléctrica Laja.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Se propuso una forma de calcular la erosión generalizada en una serie de tiempo usando métodos para estimar la profundidad máxima de erosión en conjunto con la depositación según Link *et al* (2018) y utilizando el *script* en Matlab de Pizarro *et al* (2021) como base.

El modelo utilizado presenta una buena estimación de la erosión máxima para dos de las tres mediciones de erosión disponibles, siendo los resultados de 1990 y 2006 los más cercanos con una diferencia de -0.15 y 0.52 m respectivamente si se considera el thalweg como la profundidad gobernante. En contraparte, para el 2020 se tuvo una diferencia de -3.20 m considerando una profundidad media, que se podría explicar por la presencia de la Central Hidroeléctrica Laja y la falta de sedimentos que provoca aguas abajo.

Es interesante ver que en el escenario antes de la central los caudales tienen una variabilidad mayor, con crecidas más fuertes y variaciones estacionales más marcadas que en el escenario post central, pero que la erosión en los años con la presencia del embalse aún así es mayor que en los años anteriores. Esto puede ser explicado por el déficit de sedimentos generado por la central o por la excesiva erosión generada por la crecida centenaria de 2006.

El parámetro ξ que gobierna la sedimentación en el modelo tiene un efecto notable sobre la erosión general, cambiando en hasta en decenas de metros los resultados con variaciones centesimales de su valor, por lo que un buen ajuste del transporte de sedimentos es esencial para el cálculo de la depositación. Además, los intervalos de tiempo utilizados y una correcta caracterización granulométrica tienen un papel relevante al momento de implementar el modelo.

Las variaciones en torno al cálculo con los distintos métodos vistos en la literatura tienen el comportamiento predicho por otros autores, con sobre y sub estimaciones importantes a la hora de calcular la erosión máxima, siendo el método de Litschvan-Levediev el que más se asemeja a los resultados obtenidos.

Frente a la falta de mediciones de erosión general se hace necesario el poder realizar un exámen periódico para tener puntos de comparación para analizar diversos casos de estudio, para determinar las causas que han llevado a erosiones de grandes magnitudes.

REFERENCIAS

- Alcides, L., González, Y. y Janer, J. (2018). *Hidráulica de puentes*. Cuba: Centro de Investigaciones Hidráulicas, (p.129-142).
- Aldana, J., Ordóñez, J.I. (2003). Comparación de Fórmulas para calcular la Socavación General en Cauces Aluviales, *Primer Simposio Regional de Hidráulica de Ríos*. Buenos Aires, Argentina, Noviembre, 2003.
- Arneson, L. A., Zevenbergen, L. W., Lagasse, P. F., y Clopper, P.E. (2012). *Evaluating Scour at Bridges*. Federal Highway Administration, Hydraulic Engineering Circular No. 18, Fifth edition, HIFFHWA-HIF-12-003.
- Bettess, R., (2002). A review of predictive methods for general scour. *First International Conference on Scour of Foundations, ICSF-1*. Texas A&M University, College Station, Texas, USA.
- Centro EULA. (2006). *Línea base “Central Hidroeléctrica Laja”*. Capítulo 5. Chile.
- Coleman, S. y Melville, B. (2001). Case Study: New Zealand Bridge Scour Experiences. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, 535 – 546. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:7\(535\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:7(535))
- Dai, S.B., Lu, X.X. (2010). Sediment deposition and erosion during the extreme flood events in the middle and lower reaches of the Yangtze River, *Quaternary International*, Vol. 226, Issues 1–2, Pag. 4-11, ISSN 1040-6182, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2010.01.026>.

- Dey, S. (2014) *Fluvial Hydrodynamics: Hydrodynamic and Sediment Transport Phenomena*. Springer. Berlin.
- Farias, H. D., Pilán, M. T., Olmos, L. A., y Pece, F. J. (2008). *Erosión general en ríos aluviales*. *Ingeniería Del Agua*, 15(2), 107–122. <https://doi.org/10.4995/ia.2008.2930>
- Huang Y., Wang J. y Yang M. (2019), Unexpected sedimentation patterns upstream and downstream of the Three Gorges Reservoir: Future risks, *International Journal of Sediment Research*, Vol. 34, N° 2, pp. 108-117. doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.05.004
- Instituto Nacional de Hidráulica (2021). *Diagnóstico estudio hidráulico de puentes, varias regiones. Chile*. Informe de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas.
- Kondolf, G. (1997). Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels. *Environmental Management*. Vol. 21, No. 4, pp. 533–551.
- Lane, E. W., (1955). The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. *Proceedings, American Society of Civil Engineers, Volumen 81, Artículo 745*.
- Lauchlan, C. y May, R. (2002). Comparison of general scour prediction equations for river crossings. *First International Conference on Scour of Foundations, ICSF-1*. Texas A&M University, College Station, Texas, USA.
- Link, O., García, M., Pizarro, A., Alcayaga, H., y Palma, S. (2020). Local Scour and Sediment Deposition at Bridge Piers during Floods. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(3), 04020003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001696](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001696).

- Lu JY, Hong JH, Su CC, Wang CY y Lai JS (2008) Field measurements and simulation of bridge scour-depth variations during floods. *Journal of Hydraul Engineering ASCE* 134(6):810–821
- Martín Vide, J.P. (2002). *Ingeniería de ríos*. Barcelona, Edición UPC (2ª ed.)
- Maza Alvarez, J.A. y García Flores, M. (1996). *Manual de Ingeniería de Ríos. Series del Instituto de Ingeniería, UNAM*. Comisión Nacional de Aguas, México D.F.
- Melville, B.W. & Coleman, S.E., (2000). Bridge Scour. *Water Resources Publications*, LLC.
- Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948). Formulas for Bed-Load transport. *IAHSR 2nd Meeting, Stockholm, Appendix 2*. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A4fda9b61-be28-4703-ab06-43cdc2a21bd7>.
- Ministerio de Obras Públicas. (2018). *Manual de Carreteras, volumen N°3: Instrucciones y criterios de diseño*.
- Moreno, C., Fuentes, R y López, A. (1998). Socavación generalizada; método de cálculo de Lischvan-Lebediev y Maza. Verificación experimental, *Anales del XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, vol. 2*. Oaxaca.
- Nawa, RK., Frissell, CA. (1993) Measuring scour and fill of gravel streambeds with scour chains and slidingbead monitors. *North Am J Fish Manag* 13:634–639.
- Ordóñez, J. El Régimen de los Ríos Aluviales y sus Implicaciones sobre la Socavación General. *Segundo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*, Bogotá, 2005.

- Pizarro, Alonso, Ettmer, B., & Link, O. (2021). ScourApp: A Toolbox for Local Scour and Deposition at Bridges during Floods. Submitted to Computers & Geosciences (under Review).
- Qiongfang, L., Meixiu Y., Guobin L., Tao C., Xue B., Ziqiang X. (2011). Impacts of the Gezhouba and Three Gorges reservoirs on the sediment regime in the Yangtze River, China. *Journal of Hydrology*, Vol. 403, N° 3–4, pp. 224-233. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.043.
- Schreider, M. I., Scacchi, G. Franco, F., Fuentes, R y Moreno, C. (2001). Aplicación del método de Lischtvan y Lebediev al cálculo de la erosión general. *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XVI, No. 1, 15-26.
- Su, CC., Lu, JY. (2013). Measurements and prediction of typhoon-induced short-term general scours in intermittent rivers. *Nat Hazards* 66, 671–687. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0509-6>
- Toapaxi Álvarez, J. A., Galiano Ayala, L. M., Castro Delgado, M. A., Hidalgo Bustamante, X. D. R., & Valencia Bonilla, N. T. (2015). Análisis de la Socavación en Cauces Naturales. *Revista Politécnica*, 35(3), 83. Recuperado a partir de https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/368.
- Zanke, U. (1977). *Neuer Ansatz zur Berechnung des Transportbeginns von Sedimenten unter Stromungseinfluss*. Franzius-Institut, Technical Univ. Hannover.

ANEXO 1.1 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ODS-2 : Hambre cero.
- ODS-3 : Salud y bienestar.
- ODS-4 : Educación de calidad.
- ODS-5 : Igualdad de género.
- ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ODS-13 : Acción por el clima.
- ODS-14 : Vida Submarina.
- ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación

La memoria está en el marco de un proyecto de erosión en puentes, lo que tiene que ver directamente con infraestructura. En cuanto al contenido, el acercarse a la física del problema de la erosión generalizada permitiría diseños de obras hidráulicas como puentes de forma más costo-efectivos. Además el implementar el modelo propuesto ayudaría a entender algunos factores que influyen en el colapso de puentes y poder mejorar estos aspectos para obras futuras

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento	: Departamento de Ingeniería Civil
Carrera	: Ingeniería Civil
Nombre del memorista	: Gustavo Herrera Torres
Título de la memoria	: Análisis de la erosión general en ríos con escurrimiento sub y supercrítico: Caso del río Laja
Fecha de la presentación oral	:
Profesor(es) Guía	: Dr. Oscar Link Lazo
Profesor(es) Revisor(es)	: Dra. Alejandra Stehr Gesche
Concepto	:
Calificación	:

Resumen

La socavación general en el lecho de un cauce ocurre producto de un desbalance entre la capacidad del transporte de sedimentos del río y la disponibilidad de material, en respuesta a alteraciones del cauce o por la propia dinámica fluvial. Determinar la profundidad de erosión general es relevante en ingeniería de ríos para lograr un buen diseño de obras hidráulicas.

En la literatura existen varias metodologías para calcular la erosión general, siendo todas empíricas o semiempíricas y aplicables en condiciones de régimen permanente. El historial de caudales, tipo de escurrimiento (sub y supercrítico) y duración de la crecida no se consideran explícitamente en las ecuaciones existentes. Introducir este tipo de variables en el cálculo ayudaría a tener estimaciones más cercanas a la física del problema.

Se propone una metodología basada en las fórmulas existentes del cálculo de la erosión pero introduciendo la variable de la sedimentación con la formulación propuesta por Link et al. (2020), realizando el cálculo de forma no estacionaria usando el hidrograma del río Laja en Puente Perales entre los años 1970-2020 para el análisis y comparando los resultados obtenidos con las mediciones disponibles.

Los resultados obtenidos evidencian que la erosión general presenta una alta sensibilidad a un parámetro asociado a la sedimentación, el intervalo de tiempo utilizado y el diámetro medio de las partículas. También se observó que el método de Litschvan-Levediev fue el que tuvo mejor desempeño para el rango de sedimentos analizados. El formular un modelo de estas características permite realizar análisis forenses de distintos casos de estudio, siendo un instrumento útil para determinar causas de colapso en puentes o incluso ser usado en conjunto

con simulaciones de caudales para calcular escenarios futuros del comportamiento de los ríos frente a cambios en las condiciones hidráulicas debido a construcción de obras o alteraciones del cauce.