



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

## ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE RELAVE Y CONCENTRADO DE COBRE EN EL RÍO BLANCO, QUINTA REGIÓN, CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

DÉBORA ANNY ARANCIBIA MONTECINOS

PROFESOR GUÍA:  
Yarko Niño Campos

PROFESOR CO-GUÍA:  
Santiago Montserrat Michelini

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
Alex Garcés Catalán  
Luis Zamorano Riquelme

SANTIAGO DE CHILE  
2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL  
POR: DÉBORA ANNY ARANCIBIA MONTECINOS  
FECHA: 2023  
PROF. GUÍA: YARKO NIÑO CAMPOS

## **ARRASTRE DE PARTÍCULAS DE RELAVE Y CONCENTRADO DE COBRE EN EL RÍO BLANCO, QUINTA REGIÓN, CHILE**

La minería es la principal actividad económica del país, convirtiendo a Chile en el mayor exportador de cobre a nivel mundial. En la planta minera el material es separado en dos flujos principales: concentrado y relave. Ambos son transportados mediante canaletas o tuberías de grandes extensiones cuyo rompimiento puede generar contaminación en el sustrato de cauces aledaños, por lo que organismos y plantas que allí habiten están expuestos a esa contaminación. La descarga de productos mineros tiene efectos a corto y largo plazo, ya que debido a su composición pueden mantenerse en el lecho por cientos de años (González, 1994).

En este trabajo se estudia el arrastre de partículas de concentrado de cobre y relave en el río Blanco, ubicado en la región de Valparaíso. Este tiene por objetivo evaluar si el transporte sólido desemboca en el río Aconcagua, principal fuente de agua potable de la región. Para ello se llevó a cabo un estudio hidrológico con la finalidad de estimar caudales de crecida para distintos periodos de retorno. Una vez definida la batimetría y granulometría del lecho, se generaron modelos numéricos en los que se simulaban primeramente las crecidas, y luego el transporte sólido de partículas minerales para los periodos de retorno de 20, 50 y 100 años, y un caudal medio anual. Para cada periodo se consideraron 3 casos: concentrado de cobre (como sedimento cohesivo y no cohesivo), relave y granulometría natural del lecho. Cada escenario evaluado se modeló tanto en HEC-RAS como en Telemac-2D. Los principales parámetros que se analizaron fueron el gasto sólido y la evolución del lecho. De los resultados obtenidos se concluyó que tanto el concentrado como el relave son transportados aguas abajo y se va depositando material en las riberas del río Blanco, para finalmente desembocar en el río Aconcagua, afectando y contaminando el lecho.



# Agradecimientos

En el culminar de este largo viaje académico, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera invaluable a la realización de esta memoria. Este logro no habría sido posible sin su apoyo, orientación y estímulo constante.

A mis amigas, les agradezco por su apoyo inquebrantable, comprensión y aliento a lo largo de esta travesía. Meli, Vicky, Macka, Coni, Nacha, y a todas esas bachi amistades con las que un día cruzamos camino y nunca volvimos a separarnos. En cada una de ustedes encontré tranquilidad, cariño y felicidad. Gracias por todos los momentos inolvidables.

A mi familia, quienes me brindaron su apoyo y dedicación para dar lo mejor de mí. A mi hermano Pablo, con quien inicié esta travesía universitaria y nos respaldamos mutuamente durante esos primeros años, y a Isaías, a quien siempre he admirado y considerado un modelo a seguir, despertó mi interés por la ingeniería y me orientó en cada paso de este proceso. Quiero expresar un agradecimiento especial a Camila, mi mentora, quien me introdujo en el mundo de la hidráulica y me brindó su apoyo inquebrantable. En ti encontré una amiga y compañera más en este viaje.

Agradezco a Yarko, Luis y Santiago por su valiosa guía, retroalimentación y contribuciones, las cuales han enriquecido significativamente la calidad de esta memoria. Siempre demostraron disposición para brindarme su apoyo.

Por último, quiero expresar mi gratitud a Martín, cuyo apoyo emocional y amor han sido mi fuente de fortaleza para enfrentar los desafíos que surgieron en esta etapa, y que ha estado a mi lado desde mis primeros pasos en el campo de la ingeniería civil. Valoro enormemente cada cada palabra de aliento, cada risa y cada abrazo compartido.

Cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en este logro y estoy profundamente agradecida por su presencia en mi vida.

Gracias a todos por ser parte de este viaje y por contribuir a la realización y cierre de esta etapa en mi vida.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	3
1.2.1. Objetivo general . . . . .	3
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	3
1.3. Metodología . . . . .	3
<b>2. Metodología</b>	<b>5</b>
2.1. Hidrología . . . . .	5
2.1.0.1. Método DGA-AC . . . . .	6
2.1.0.2. Método racional . . . . .	9
2.1.0.3. Hidrograma Unitario Sintético tipo Linsley . . . . .	10
2.2. Granulometría . . . . .	12
2.3. Análisis hidráulico . . . . .	13
2.4. Ecuaciones de movimiento . . . . .	15
2.4.1. Navier-Stokes . . . . .	15
2.4.2. RANS . . . . .	15
2.4.3. Saint-Venant . . . . .	16
2.5. Resistencia hidráulica . . . . .	16
2.6. Transporte de sedimentos . . . . .	18
2.6.1. Gasto sólido en suspensión . . . . .	18
2.6.2. Gasto sólido de fondo para granulometría uniforme (Niño, 2005) . . . . .	18
2.6.3. Gasto sólido de fondo para granulometría extendida . . . . .	19
2.6.4. Ecuación de Exner . . . . .	20
2.7. Sedimento cohesivo . . . . .	20
2.8. Softwares . . . . .	21
2.8.1. HEC-RAS, versión 6.3.1 . . . . .	21
2.8.2. Telemac-2D, versión 8p0r0 . . . . .	21
2.8.3. BlueKenue . . . . .	21
2.8.4. SISYPHE . . . . .	22
2.8.5. QGIS, versión 3.32.2 . . . . .	22
<b>3. Análisis hidrológico</b>	<b>23</b>
3.1. Caracterización geomorfológica de la cuenca . . . . .	23
3.2. Caracterización hidrológica de la cuenca . . . . .	26
3.2.1. Estaciones meteorológicas y fluviométricas . . . . .	26
3.2.2. Análisis de frecuencia . . . . .	28

3.2.3.	Curva de variación estacional . . . . .	28
3.2.4.	Caudales de crecida . . . . .	29
<b>4.</b>	<b>Modelo numérico</b>	<b>31</b>
4.1.	Granulometría . . . . .	31
4.2.	Estimación del coeficiente de Manning . . . . .	32
4.3.	Pre-procesamiento modelo de elevación digital . . . . .	33
4.3.1.	Mallado en HEC-RAS . . . . .	34
4.3.2.	Mallado en BlueKenue . . . . .	35
4.4.	Simulación de crecidas . . . . .	37
4.4.1.	HEC-RAS . . . . .	37
4.4.2.	TELEMAC-2D . . . . .	38
4.5.	Simulación de arrastre de sedimentos . . . . .	39
4.5.1.	Estimación del gasto sólido . . . . .	39
4.5.2.	HEC-RAS . . . . .	41
4.5.3.	TELEMAC-2D . . . . .	43
<b>5.</b>	<b>Resultados</b>	<b>46</b>
5.1.	Simulación de crecidas . . . . .	46
5.2.	Simulación de arrastre de sedimentos . . . . .	47
5.2.1.	Lecho . . . . .	47
5.2.2.	Concentrado de cobre, cohesivo . . . . .	49
5.2.3.	Concentrado de cobre, no cohesivo . . . . .	52
5.2.4.	Relave . . . . .	55
5.2.5.	Caudal medio anual . . . . .	58
<b>6.</b>	<b>Discusión</b>	<b>61</b>
<b>7.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>65</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>68</b>

# Índice de Tablas

2.1.	Coefficientes de frecuencia Región de Valparaíso, fuente: Manual de Carreteras Volumen N°3, Mop (2018). . . . .	5
2.2.	Curva de frecuencia regional Caudales Medios Diarios Máximos, Zona homogénea Vn Nival - Gamma - Latitud 32°45'-33°15'. Fuente: Manual de Crecidas, Tabla 4.6 (2018). . . . .	7
2.3.	Factor de conversión de Caudal Medio Diario Máximo a Caudal Instantáneo Máximo. Fuente: Manual de Crecidas, Tabla 4.10 (2018). . . . .	7
2.4.	Elevación de línea de nieves definida en función de la latitud. Fuente: Manual de Crecidas, Tabla 4.11 (2018). . . . .	8
2.5.	Coefficientes de fórmulas empíricas, V Región. Fuente: Manual de Crecidas, Tabla 3.26 (2018). . . . .	9
2.6.	Parámetros para calcular el hidrograma unitario sintético. Fuente: DGA (1995).	11
2.7.	Coefficientes adimensionales de distribución para el Hidrograma Unitario Sintético. Fuente: DGA (1995). . . . .	11
3.1.	Parámetros geomorfológicos, subcuenca del río Aconcagua Alto. . . . .	26
3.2.	Información de la estación río Aconcagua en río Blanco, DATUM WGS-84. . .	26
3.3.	Test Chi cuadrado. . . . .	28
3.4.	Caudales calculados con los métodos DGA-AC, Verni y King y Racional, para distintos periodo de retorno, Cuenca del río Aconcagua. . . . .	29
3.5.	Caudales calculados con los métodos DGA-AC, Verni y King y Racional, para distintos periodo de retorno, Subcuenca del río Aconcagua Alto. . . . .	30
4.1.	Coordenadas UTM y altura de la estación de muestreo E2. Fuente: CENMA, (2008). . . . .	32
4.2.	Coefficientes de Manning obtenidos para T=20, 50 y 100 años. Fuente: Elaboración propia. . . . .	33
4.3.	Volumen de sedimentos acumulado (V sed), volumen de agua (V agua), volumen de flujo (V sed + agua) y porcentaje de sedimentos (%sed) para cada periodo de retorno. Fuente: Elaboración propia. . . . .	41
4.4.	Clases de material predeterminadas en HEC-RAS junto con su diámetro mínimo, máximo y promedio [mm]. . . . .	43
4.5.	Caudal medio anual y coeficiente de Manning. . . . .	45

# Índice de Ilustraciones

1.1.	Rotura de tubería que transportaba el concentrado de cobre. Fuente: CODELCO División Andina (2016). . . . .	2
1.2.	Imagen izquierda muestra el material derramado en la ribera del río Blanco, mientras que la imagen de la derecha se detalla la acumulación del mismo. Fuente: Obrador (2016). . . . .	2
2.1.	Parámetros para calcular el hidrograma unitario sintético. . . . .	10
2.2.	Curva granulométrica y distribución bimodal para ríos cordilleranos. Fuente: Tamburrino y Niño (2013). . . . .	12
3.1.	Cuenca de río Aconcagua, Región de Valparaíso, Chile. Elaboración propia. . .	23
3.2.	Red hidrográfica: Principales cauces y punto de rotura, Cuenca del río Aconcagua. Fuente: Elaboración propia. . . . .	24
3.3.	Subcuenca del río Aconcagua Alto. Fuente: Elaboración propia. . . . .	25
3.4.	Curva hipsométrica segmentada junto a cada regresión lineal, cuenca del río Aconcagua. Fuente: Elaboración propia. . . . .	25
3.5.	Ubicación de estaciones meteorológicas y fluviométricas, Cuenca del río Aconcagua. Fuente: Elaboración propia. . . . .	27
3.6.	Serie anual de precipitaciones, en rojo se ve la línea de tendencia. Fuente: Elaboración propia. . . . .	27
3.7.	Análisis de frecuencia - Distribución Gumbel. Fuente: Elaboración propia. . . .	28
3.8.	Curva de variación estacional. Fuente: Elaboración propia. . . . .	29
3.9.	Hidrogramas de escorrentía directa para T=20, 50 y 100 años. Fuente: Elaboración propia. . . . .	30
4.1.	Ubicación de la zona de extracción de sedimentos para su estudio. Fuente: CENMA (2008). . . . .	31
4.2.	Curva granulométrica estación E2. Fuente: CENMA (2008). . . . .	32
4.3.	Efecto macro rugoso en el río Blanco. Fuente: Elaboración propia. . . . .	33
4.4.	Malla elaborada en HEC-RAS. La Figura a) muestra el área de estudio, mientras que la Figura b) muestra el detalle del refinado del cauce. Fuente: Elaboración propia. . . . .	34
4.5.	Coefficientes de Manning en HEC-RAS definidos para el valle (azul, n=0,05) y el cauce (rojo, n=0,04). Fuente: Elaboración propia. . . . .	35
4.6.	Malla elaborada en BlueKenue. La Figura a) muestra el área de estudio, mientras que la Figura b) muestra el detalle del refinado del cauce. Fuente: Elaboración propia. . . . .	36
4.7.	Coefficientes de Manning en BlueKenue definidos para el valle (azul, n=0,05) y el cauce (rojo, n=0,04). Fuente: Elaboración propia. . . . .	37
4.8.	Ubicación de las secciones utilizadas para comparar los resultados. Fuente: Elaboración propia. . . . .	39

4.9.	Gasto sólido en $[m^3/s]$ para los periodos de retorno T=20, 50 y 100 años. Fuente: Elaboración propia, Excel. . . . .	40
4.10.	Volumen de sedimento en $[m^3]$ para los periodos de retorno T=20, 50 y 100 años. Fuente: Elaboración propia, Excel. . . . .	40
4.11.	Secciones transversales, modelo de arrastre de sedimentos 1D. Fuente: Elaboración propia. . . . .	41
4.12.	Opciones de cambio en el lecho global Fuente: CEIWR-HEC (s.f). . . . .	42
4.13.	Depósito de concentrado de cobre (rojo) aguas abajo el punto de derrame. Fuente: Elaboración propia. . . . .	44
5.1.	Volumen acumulado para los periodos de retorno T = 20, 50 y 100 años. Fuente: Elaboración propia. . . . .	46
5.2.	Velocidad en el perfil intermedio para los periodos de retorno T = 20, 50 y 100 años. Fuente: Elaboración propia. . . . .	47
5.3.	Gasto sólido del lecho $[m^3/s]$ obtenido para el periodo de retorno T=20 años. Fuente: Elaboración propia. . . . .	48
5.4.	Gasto sólido del lecho $[m^3/s]$ obtenido para el periodo de retorno T=50 años. Fuente: Elaboración propia. . . . .	48
5.5.	Gasto sólido del lecho $[m^3/s]$ obtenido para el periodo de retorno T=100 años. Fuente: Elaboración propia. . . . .	49
5.6.	Gasto sólido de concentrado de cobre en $[m^3/s]$ obtenido para el periodo de retorno T=20 años. Fuente: Elaboración propia. . . . .	50
5.7.	Gasto sólido de concentrado de cobre en $[m^3/s]$ obtenido para el periodo de retorno T=50 años. Fuente: Elaboración propia. . . . .	50
5.8.	Gasto sólido de concentrado de cobre en $[m^3/s]$ obtenido para el periodo de retorno T=100 años. Fuente: Elaboración propia. . . . .	51
5.9.	Evolución del lecho en $[m]$ aguas abajo, deposición de concentrado de cobre, cohesivo. Fuente: Elaboración propia. . . . .	52
5.10.	Gasto sólido de concentrado de cobre en $[m^3/s]$ obtenido para el periodo de retorno T=20 años, no cohesivo. Fuente: Elaboración propia. . . . .	53
5.11.	Gasto sólido de concentrado de cobre en $[m^3/s]$ obtenido para el periodo de retorno T=50 años, no cohesivo. Fuente: Elaboración propia. . . . .	53
5.12.	Gasto sólido de concentrado de cobre en $[m^3/s]$ obtenido para el periodo de retorno T=100 años, no cohesivo. Fuente: Elaboración propia. . . . .	54
5.13.	Evolución del lecho en $[m]$ aguas abajo, deposición de concentrado de cobre, no cohesivo. Fuente: Elaboración propia. . . . .	54
5.14.	Evolución del lecho en HEC-RAS. Fuente: Elaboración propia. . . . .	55
5.15.	Gasto sólido de relave en $[m^3/s]$ obtenido para el periodo de retorno T=20 años. Fuente: Elaboración propia. . . . .	56
5.16.	Gasto sólido de relave en $[m^3/s]$ obtenido para el periodo de retorno T=50 años. Fuente: Elaboración propia. . . . .	56
5.17.	Gasto sólido de relave en $[m^3/s]$ obtenido para el periodo de retorno T=100 años. Fuente: Elaboración propia. . . . .	57
5.18.	Evolución del lecho en $[m]$ aguas abajo, deposición de relave. Fuente: Elaboración propia. . . . .	57
5.19.	Gasto sólido de concentrado de cobre con caudal medio anual, aguas arriba. Fuente: Elaboración propia. . . . .	58

5.20.	Gasto sólido de relave con caudal medio anual, aguas arriba. Fuente: Elaboración propia. . . . .	58
5.21.	Evolución del lecho para la modelación de concentrado de cobre como sedimento cohesivo, con caudal medio anual. Fuente: Elaboración propia. . . . .	59
5.22.	Evolución del lecho para la modelación de concentrado de cobre como sedimento no cohesivo, con caudal medio anual. Fuente: Elaboración propia. . . . .	59
5.23.	Evolución del lecho para la modelación de relave, con caudal medio anual. Fuente: Elaboración propia. . . . .	60
6.1.	Curvas comunes de igual velocidad en diferentes secciones de canal. Fuente: Chow, (1994). . . . .	63

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

Una de las principales actividades económicas en Chile es la minería, siendo el mayor productor a nivel mundial, y el tercer país con mayor cantidad de relaves al año 2019 (SONAMI, 2019).

Dentro de la planta concentradora, el mineral es separado del material extraído en la mina, generando dos flujos principales: el concentrado y el relave. Ambos son transportados mediante canaletas o tuberías hasta la zona de disposición, y en su trayecto pueden cruzar cauces. El rompimiento de las líneas de transporte pueden provocar derrames en los cursos de agua, alterando su calidad y el ecosistema que lo compone (Bustamante et al., 2017).

La División Andina es un yacimiento que explota minerales en la mina subterránea río Blanco y en la mina a rajo abierto Sur Sur. El 2016 la Seremi de salud de Valparaíso inició un sumario contra Codelco Andina producto del rompimiento de una tubería subterránea de 6", derramando cerca de 50 [ $m^3$ ] de concentrado en el río Blanco (ver Figura 1.1). La problemática reside en que el río Blanco es el mayor afluente del río Aconcagua, la principal fuente de agua potable en Valparaíso. La Figura 1.2 muestra concentrado de cobre depositado en la ribera del río Blanco luego del accidente. Una vez detectado, se tomaron acciones que involucraba la activación del plan de contingencia operacional, monitoreos de calidad de agua en distintos puntos de los ríos Blanco y Aconcagua, y la limpieza en el punto de derrame y la escuela Río Blanco. Según el reporte entregado por Codelco, se registraron variaciones del cobre total entre 6 [mg/l] y 27 [mg/l] en el río Blanco. La norma de calidad de agua potable (NCh409) establece un máximo de 2 [mg/l] (INN, 2005), mientras que la NCh1333, establece una concentración máxima de 0,2 [mg/l] para agua de riego (INN, 1987). Al día siguiente se alcanzaron valores bajo la norma de riego. Además de lo anterior, también se han registrado derrames de relave en el mismo cauce, nuevamente por una rotura de una de sus tuberías, como el ocurrido en 2019 (Godfrid et al., 2020).



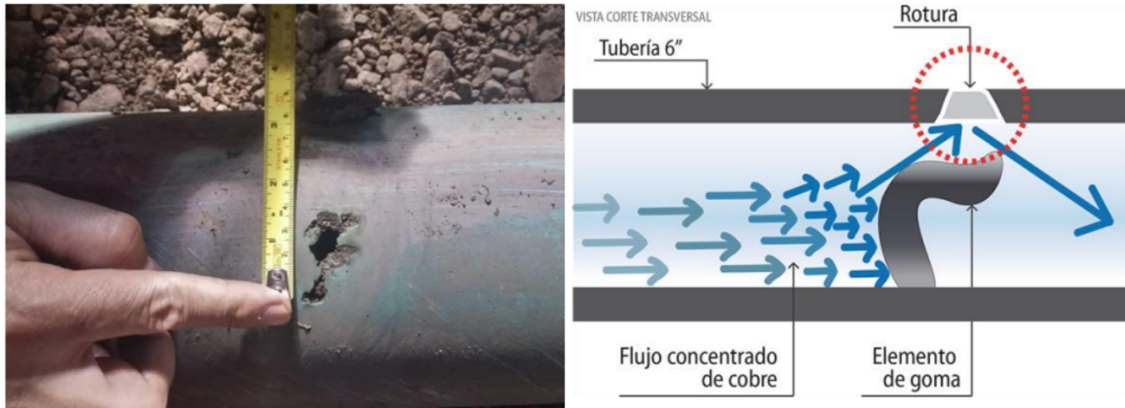


Figura 1.1: Rotura de tubería que transportaba el concentrado de cobre.  
Fuente: CODELCO División Andina (2016).



Figura 1.2: Imagen izquierda muestra el material derramado en la ribera del río Blanco, mientras que la imagen de la derecha se detalla la acumulación del mismo. Fuente: Obrador (2016).

La diferencia entre concentrado y relave se debe a su composición y comportamiento una vez que es descargado al río. Por una parte, el relave es una mezcla de agua y sólidos (en mayor medida arenas, y luego arcillas), por lo que su peso específico es similar o menor al de los sedimentos del lecho. Inicialmente su transporte es por suspensión, pero luego sedimenta (Aceituno, 2017). En el caso del concentrado, cerca del 30 % es cobre, mientras que el 70 % restante es escoria y otros componentes, como arsénico y zinc, por lo que su peso específico es mayor al del lecho ( $4500 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ ). Cuando se produce una crecida o aumento significativo del caudal, el flujo puede inducir la socavación del lecho y por consiguiente, el transporte de sedimentos aguas abajo (Bustamante et al., 2017).

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

Este trabajo tiene como objetivo simular el arrastre de partículas provenientes de los derrames de relaves y concentrado de cobre en el río Blanco, mediante un modelo numérico en HEC-RAS y Telemac-2D, utilizando datos bibliográficos (topografía y granulometría), con la finalidad de caracterizar el transporte de partículas mineras en el cauce y evaluar su influencia en el río Aconcagua.

### 1.2.2. Objetivos específicos

1. La simulación requiere datos hidrológicos y sedimentométricos, por lo tanto, se llevará a cabo la recopilación y análisis de registros previos con el fin de caracterizar estas condiciones.
2. Recopilar fuentes de información topográficas y batimétricas que permitan describir el lecho del río. Debido a que no hay contemplado realizar mediciones en terreno, este análisis se basará en información de fuentes gratuitas y previas.
3. Se construirán dos modelos utilizando los softwares Telemac-2D y HEC-RAS 2D y 1D. En primer lugar, se definirá el modelo hidrodinámico como base, y a partir de este, se creará el modelo morfodinámico para simular el transporte de partículas de cobre, relave.

## 1.3. Metodología

- **Revisión bibliográfica**

Se recopilará información desde distintas fuentes y autores relacionados con el tema. En particular, bibliografía vinculada al arrastre de sedimentos, estudios hidrológicos, granulometría y topografía de la subcuenca del río Aconcagua Alto. La revisión se muestra en el capítulo 2 de este trabajo.

- **Hidrología**

Se utilizará la información disponible de las estaciones meteorológicas y fluviométricas para caracterizar hidrológicamente la cuenca. En particular, con el método del Hidrograma Unitario Sintético se estimarán caudales a partir de la estación ubicada en la conjunción del río Blanco con el río Juncal. Para este estudio de crecidas no se considerará el efecto del cambio climático. El detalle de la hidrología se muestra en el capítulo 3.

- **Batimetría y granulometría**

La topografía del cauce se obtendrá a partir de información geográfica de ALOS PALSAR (Rivera, 2022), debido a que tiene la resolución más alta (12,5 metros) comparado con otras fuentes satelitales gratuitas. Los datos de elevación digital obtenidos se importarán al modelo de simulación de crecidas y sedimentos. Además, con la finalidad de mejorar la topografía, se modificará el cauce principal y se modelará como un canal trapezoidal. Como no se realizaron actividades de terreno, se utilizará información bibliográfica disponible para definir la granulometría del río, que se detalla en el capítulo 4.

- **Modelación hidráulica**

El comportamiento del río se modelará mediante una simulación numérica bidimensional utilizando los softwares HEC-RAS y Telemac-2D. Se evaluarán crecidas para los periodos de retorno de 20, 50 y 100 años, bajo la hipótesis de que son lo suficientemente altos como para socavar el lecho del río (condiciones más erosivas). No se toman en cuenta periodos de retorno superiores a los 100 años ya que es un requisito para las metodologías empleadas para el cálculo de crecidas. Adicional a estos, se creará un modelo que utilice como input un caudal medio anual con la finalidad de replicar condiciones de flujo "normales".

- **Arrastre de sedimentos**

Para la modelación de arrastre de sedimentos se utilizará SISYPHE, correspondiente a un módulo de Telemac-2D, que permite simular la evolución del lecho (Telemac Team, 2021), y obtener el alcance de las partículas de relave y concentrado. En caso de HEC-RAS se generará un modelo unidimensional. En ambos los parámetros que se ingresan son los caudales de crecida y granulometría. Para el transporte de sedimentos se trabajó con la función de Wilcock y Crowe.

# Capítulo 2

## Metodología

### 2.1. Hidrología

El análisis hidrológico se realizará en base a los datos de precipitación máxima anual en 24 horas, para la estación ubicada en el punto de confluencia del río Blanco y Juncal (MOP, 2018).

Para obtener precipitaciones con duraciones menores a una hora, se aplican los coeficientes de duración y frecuencia de la zona en estudio bajo la siguiente expresión (MOP, 2018):

$$P_{DT} = C \cdot CF^T \cdot CD_D \cdot P_D^{10} \quad (2.1)$$

Donde:

- $C$ : Coeficiente que transforma las precipitaciones diarias en máximas en 24 horas de valor 1,1 (MOP, 2018).
- $CF^T$ : Coeficiente de frecuencia asociado a cierto periodo de retorno. Los valores se encuentran tabulados en la Tabla 2.1.
- $CD_D$ : Coeficiente de duración.
- $P_D^{10}$ : Precipitación diaria [mm] de 10 años de periodo de retorno, que se utiliza como referencia.

Tabla 2.1: Coeficientes de frecuencia Región de Valparaíso, fuente: Manual de Carreteras Volumen N°3, Mop (2018).

Periodo Retorno Años	Coeficiente Frecuencia
2	0,52
5	0,81
10	1,00
20	1,18
50	1,42
100	1,60
200	1,77

Llevando los valores anteriormente calculados a precipitaciones con duraciones menores a una hora:

$$P_{DT} = C \cdot CF^T \cdot CD_D \cdot (CD_1 \cdot P_D^{10}) \quad (2.2)$$

Donde:

- $CD_1$ : Coeficiente de duración asociado a precipitaciones con duración menor a 1 hora (obtenidos del Manual de Carreteras Volumen N°3, MOP (2018). Tabla 2.702.403.A.).

A partir de lo anterior, se obtienen las intensidades de precipitación para los diferentes periodos de retorno, según la siguiente expresión:

$$I = \frac{P_{DT}}{D} \quad (2.3)$$

Donde:

- $I$ : Intensidad de precipitación [mm/hr].
- $P_{DT}$ : Precipitación para distintos periodos de retorno [mm].
- $D$ : Duración [hr].

Se realizará un análisis de frecuencia para los datos de precipitación. Permiten obtener los caudales para distintos periodos de retorno. En particular, se realiza el análisis para las distribuciones Normal, Log-Normal, Pearson y Gumbel más un test de Chi-cuadrado, para determinar la mejor distribución que se ajusta a los datos.

Como la cuenca de río Aconcagua tiene un régimen nivo-pluvial, se consideraron los metodologías de estimación de caudales instantáneos máximos definidos en el Manual de Crecidas de la DGA (DGA, 1995).

### 2.1.0.1. Método DGA-AC

Este enfoque es adecuado para implementarlo en cuencas sin información fluviométrica, que presentan un régimen hidrológico nivo-pluvial o nival, abarcan áreas nivales que oscilan entre 50 y 6.000 [km<sup>2</sup>], y se encuentran ubicadas en un rango geográfico que abarca desde la III hasta la IX región.

Para obtener el caudal instantáneo máximo, se sigue la siguiente metodología:

1. Determinación de la zona homogénea: se define en base a la latitud de la cuenca (32°55'). Corresponde a la zona "Vn".
2. Determinación de la curva de frecuencias regional: En base a la zona homogénea identificada, se selecciona la curva adimensional de frecuencia mostrada en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Curva de frecuencia regional Caudales Medios Diarios Máximos, Zona homogénea Vn Nival - Gamma - Latitud 32°45'-33°15'. Fuente: Manual de Crecidas, Tabla 4.6 (2018).

Periodo de Retorno [años]	Q(T)/Q(10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,57	0,67	0,40
5	0,84	0,88	0,75
10	1,00	1,00	1,00
20	1,15	1,24	1,11
25	1,21	1,33	1,15
50	1,36	1,57	1,25
75	1,44	1,70	1,31
100	1,48	1,77	1,34

3. Determinación del caudal medio diario máximo de periodo de retorno 10 años: Se calcula en función de la región en que se encuentre la cuenca.

$$Q_{10} = 1,81 \cdot 10^{-4} \cdot A_n^{0,915} \cdot (Lat - 26,2)^{3,392} \quad (2.4)$$

Donde:

- $Q_{10}$ : Caudal medio diario máximo para un periodo de retorno de 10 años, en  $[m^3/s]$ .
  - $A_n$ : Área nival aportante, en  $[km^2]$ .
  - $Lat$ : Latitud media de la cuenca, en grados.
4. Curva de frecuencia de caudal medio diario máximo: Se obtiene al multiplicar el valor  $Q(T)/Q(T=10)$  (Tabla 2.2) por el valor de  $Q_{10}$ , obtenido en el paso anterior.
5. Determinación de la curva de frecuencia del caudal instantáneo máximo: Se obtiene de multiplicar los valores de la tabla del paso 4 por un factor  $\beta$ , que depende de la zona homogénea a la cual pertenece. Los valores para  $\beta$  se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Factor de conversión de Caudal Medio Diario Máximo a Caudal Instantáneo Máximo. Fuente: Manual de Crecidas, Tabla 4.10 (2018).

Zona Homogénea	$\beta$
Qn	1,12
Rn	1,11
Sn	1,26
Tn	1,16
Un	1,20
Vn	1,17
Wn	1,18
Xn	1,39
Yn	1,39

Para determinar el área nival se debe establecer la línea de nieves. Para ello se utiliza la Tabla 2.4 del Manual de Crecidas, donde se muestran los valores de elevación de la línea de nieves para distintas latitudes sur, según lo propuesto por Escobar y Vidal (1992). Latitud sur se refiere a la medida angular que indica la posición de un lugar en la mitad sur del planeta Tierra en relación con el ecuador. Se expresa en grados, minutos y segundos y abarca desde 0° en el ecuador hasta 90°S en el Polo Sur.

Tabla 2.4: Elevación de línea de nieves definida en función de la latitud.  
Fuente: Manual de Crecidas, Tabla 4.11 (2018).

Latitud [°]	Elevación Línea de Nieves [m.s.n.m.]
27,0	4350
27,5	4275
28,0	1050
28,5	3975
29,0	3750
29,5	3675
30,0	3525
30,5	3375
31,0	3225
31,5	3075
32,0	3000
32,5	2775
33,0	2670
33,5	2400
34,0	2280
34,5	2100
35,0	1950

#### Método Verni y King Modificado

Este método puede ser aplicado en cuencas de régimen pluvial o nivo-pluvial, con áreas comprendidas entre 20 y 10.000 [km<sup>2</sup>], y que estén ubicadas entre la III y IX región. Relaciona el caudal instantáneo máximo de una crecida con la precipitación máxima diaria y el área pluvial a través de una relación de potencias, con la fórmula que se muestra a continuación:

$$Q = C(T) \cdot 0,00618 \cdot P_{24}^{1,24} \cdot A_p^{0,88} \quad (2.5)$$

Donde:

- $Q$ : Caudal para un periodo de retorno de T años [m<sup>3</sup>/s].
- $C(T)$ : Coeficiente empírico de periodo de retorno de T años [-].
- $P_{24}$ : Precipitación diaria máxima para un periodo de retorno de T años [mm].
- $A_p$ : Área pluvial de la cuenca [km<sup>2</sup>].

Para obtener  $C(T)$  se debe utilizar la Tabla 2.5, donde  $C(T=10)$  corresponde a 0,290 (Tabla 3.25: Coeficiente  $CT=10$  Años Fórmula de Verni y King Modificada, Manual de Crecidas).

Tabla 2.5: Coeficientes de fórmulas empíricas, V Región. Fuente: Manual de Crecidas, Tabla 3.26 (2018).

Periodo de Retorno [años]	$C(T)/C(T=10)$
2	0,38
5	0,84
10	1,00
20	1,15
25	1,20
50	1,33
100	1,55

### 2.1.0.2. Método racional

Esta fórmula es aplicable a cuencas ubicadas entre las regiones III y IX del país, de régimen hidrológico pluvial o pluvio-nival. Según este método, el escurrimiento máximo es proporcional a la precipitación caída. El caudal máximo asociado a un determinado periodo de retorno se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Q_i = \frac{C_i \cdot I \cdot A}{3,6} \quad (2.6)$$

Donde:

- $Q_i$ : Caudal a la salida de la cuenca [ $m^3/s$ ].
- $C_i$ : Coeficiente de escorrentía de la superficie.
- $I$ : Intensidad de la lluvia [ $mm/hr$ ] asociada al periodo de retorno  $T$  y a una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca.
- $A$ : Área de la cuenca [ $km^2$ ].

El coeficiente  $C(T=10)$  para la quinta Región corresponde a 0,08 (Tabla 3.27: Coeficiente  $CT=10$ . Fórmula Racional, Manual de Crecidas (2018)). Para determinar el valor del coeficiente de escorrentía correspondiente a cualquier periodo de retorno comprendido entre 2 y 100 años, se debe multiplicar el valor del coeficiente asociado al periodo de retorno de 10 años por la razón  $C(T)/C(T=10)$ . Este factor de frecuencias es igual al del método de Verni y King modificado. Por lo tanto para su estimación se debe hacer uso de la Tabla 2.5.

En cuanto al tiempo de concentración de la cuenca, se utiliza el método de Kirpich (1997), definido como:

$$t_c = 3,98 \cdot \left( \frac{L}{S^{0,5}} \right)^{0,77} \quad (2.7)$$

Donde:



- $t_c$ : Tiempo de concentración [ $min$ ].
- $L$ : Longitud del cauce [ $km$ ].
- $S$ : Pendiente media de la cuenca [ $m/m$ ].

### 2.1.0.3. Hidrograma Unitario Sintético tipo Linsley

Se define en función de las características geomorfológicas de la cuenca, tales como la longitud del cauce principal ( $L_c$ ), longitud hasta el centro de gravedad de la cuenca ( $L_G$ ), pendiente media de la cuenca ( $S$ ). Para obtener el hidrograma sintético unitario (HUS) es necesario determinar los parámetros  $t_p$ ,  $q_p$ ,  $t_b$  y  $t_u$  que se muestran en la Figura 2.1, que se definen como se muestra en las ecuaciones 2.8 a la 2.11.

$$t_p = C_t \left( \frac{L_c L_G}{\sqrt{S}} \right)^{n_t} \quad (2.8)$$

$$q_p = C_p t_p^{n_p} \quad (2.9)$$

$$t_b = C_B t_p^{n_b} \quad (2.10)$$

$$t_u = \frac{t_p}{5,5} \quad (2.11)$$

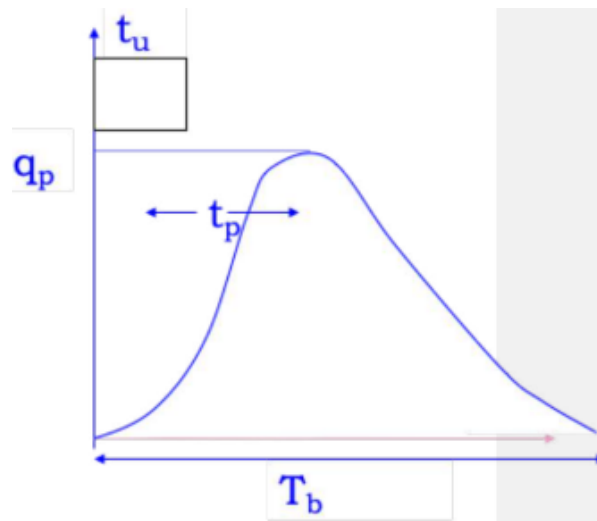


Figura 2.1: Parámetros para calcular el hidrograma unitario sintético.

Los parámetros están detallados en la Tabla 2.6, donde la Zona 1 corresponde a las regiones de la III a VI, la Zona 2 corresponde a la VII región, y la Zona 3 de la VIII a X región:

Tabla 2.6: Parámetros para calcular el hidrograma unitario sintético. Fuente: DGA (1995).

	<b>Zona 1</b>	<b>Zona 2</b>	<b>Zona 3</b>
$C_t$	0,3240	0,5840	1,3510
$n_t$	0,4210	0,3270	0,2370
$C_p$	140,0140	522,5140	172,7750
$n_p$	-0,7840	-1,5110	-0,8350
$C_B$	5,0430	1,8220	5,4280
$n_B$	0,8442	1,4120	0,7170

Si  $t_R$  (tiempo adoptado para la lluvia unitaria) no es igual a  $t_u$ , entonces se debe verificar:

1.  $t_R < 0,5 t_u$
2.  $t_u - 10 \% < t_R < t_u + 10 \%$

Si no se cumple ninguna de las 2 condiciones anteriores, se debe corregir  $t_p$  como sigue, y recalculer los parámetros:

$$t'_p = t_p + \frac{(t_R - t_u)}{4} \quad (2.12)$$

Los valores corregidos  $t'_p$  y  $q'_p$  son utilizados para obtener el hidrograma unitario, ponderando por los valores del hidrograma unitario adimensional de la Tabla 2.7.

Tabla 2.7: Coeficientes adimensionales de distribución para el Hidrograma Unitario Sintético. Fuente: DGA (1995).

<b>Razón t/tp</b>	<b>Razón q/qp</b>
0,00	0,00
0,30	0,20
0,50	0,40
0,60	0,60
0,75	0,80
1,00	1,00
1,30	0,80
1,50	0,60
1,80	0,40
2,30	0,20
2,70	0,10
4,00	0,00

El hidrograma unitario obtenido debe ser discretizado a intervalos de  $t'_u$ . Luego se verifica que el volumen de escorrentía directa sea unitario. De no cumplirse, se debe corregir.

## 2.2. Granulometría

A través del análisis granulométrico de una muestra se puede conocer la distribución por tamaño de las partículas que conforman el lecho. Estas muestras se analizan en el laboratorio mediante técnicas como el tamizado, la sedimentación y la microscopía.

La granulometría tiene una relación directa con el arrastre de sedimentos en un río. La resistencia que ejerce el agua sobre las partículas de sedimento depende del tamaño y forma de las mismas. En general, las partículas más pequeñas y redondeadas son más fáciles de mover por el agua que las partículas más grandes y angulares (Niño, 2005).

Cuando el flujo del río aumenta, las partículas de sedimento pueden ser arrastradas y transportadas aguas abajo. La capacidad de arrastre del río depende de la fuerza del flujo, que a su vez depende de factores como la pendiente, la profundidad del agua y la rugosidad del lecho (Niño, 2005).

Dado un diámetro  $D$  (en [mm]) se define la escala  $\psi$  como sigue (Tamburrino y Niño, 2013):

$$\psi = \frac{\ln(D)}{\ln(2)}; D = 2^\psi \quad (2.13)$$

Por definición, la densidad de probabilidad  $p(\psi)$  y la distribución de probabilidad  $P(\psi)$ :

$$p(\psi) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\psi)d(\psi) = 1; P(\psi) = \int_{-\infty}^{\psi} p(\psi)d(\psi) \quad (2.14)$$

Para ríos cordilleranos donde se espera que el D50 se encuentre fuera del rango de las arenas, la distribución es bimodal. La curva granulométrica generalmente tiene peaks en las arenas y en las gravas, como se muestra en la Figura 2.2.

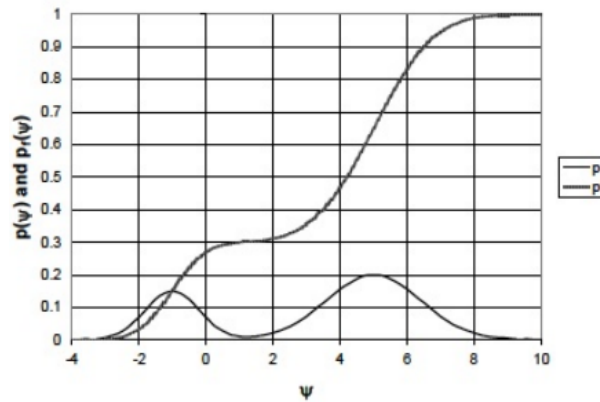


Figura 2.2: Curva granulométrica y distribución bimodal para ríos cordilleranos. Fuente: Tamburrino y Niño (2013).

La forma analítica para la densidad de probabilidad y la distribución de tamaños de granos es la distribución log-normal, definida según las ecuaciones 2.15 y 2.16.

$$p(\psi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\psi - \psi_m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.15)$$

$$P(\psi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\psi} \exp\left(-\frac{(\psi' - \psi_m)^2}{2\sigma^2}\right) d\psi' \quad (2.16)$$

Se definen el promedio geométrico y desviación estándar según las ecuaciones 2.17 y 2.18.

$$D_g = \sqrt{D_{84}D_{16}} \quad (2.17)$$

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}} \quad (2.18)$$

Las muestras de sedimento con valores de  $\sigma_g$  mayor a 1,6 son de granulometría extendida.

## 2.3. Análisis hidráulico

Para caracterizar el flujo de un cauce se dispone de parámetros adimensionales.

1. Número de Reynolds (Re): Se define como el producto de la velocidad característica del fluido y el radio hidráulico, dividido por la viscosidad dinámica del fluido.

$$Re = \frac{U \cdot Rh}{\nu} \quad (2.19)$$

Donde:

- $Rh$ : Radio hidráulico.
- $U$ : Velocidad de flujo.
- $\nu$ : Viscosidad cinemática.

Según los siguientes valores se puede determinar el régimen del flujo:

$Re < 500$ : Régimen Laminar

$500 < Re < 1000$ : Régimen de Transición.

$Re > 1000$ : Régimen Turbulento.

2. Número de Froude (Fr): Permite describir el comportamiento de un fluido en movimiento.

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (2.20)$$

Donde:

- $U$ : Velocidad de flujo.
- $g$ : Aceleración de gravedad.

- $h$ : Altura de flujo.

Según los siguientes valores se puede determinar el tipo de escurrimiento del flujo:

$Fr < 1$ : Flujo Subcrítico o de río.

$Fr = 1$ : Flujo Crítico.

$Fr > 1$ : Flujo Supercrítico o de Torrente.

3. Número de Reynolds de la partícula: Viene dado por la siguiente relación:

$$Re_p = \frac{u_* \cdot ds}{\nu} \quad (2.21)$$

Donde:

- $ds$ : Diámetro de la partícula.
- $\nu$ : Viscosidad cinemática.

4. Velocidad de corte de la partícula ( $u_*$ ): Para flujo uniforme, se define como:

$$u_* = \sqrt{gR_h i} \quad (2.22)$$

Con:

- $g$ : Aceleración de gravedad.
- $R_h$ : Radio hidráulico.
- $i$ : Pendiente.

5. Esfuerzo de corte adimensional de la partícula ( $\tau_*$ ): Definido por la siguiente relación:

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{g \cdot R \cdot ds} \quad (2.23)$$

Donde:

- $ds$ : Diámetro de la partícula.
- $u_*$ : Velocidad de corte.
- $g$ : Aceleración de gravedad.
- $R$ : Relación adimensional entre la densidad del sedimento ( $\rho_s$ ) y la densidad del fluido ( $\rho$ ),

$$R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (2.24)$$

Se define además el esfuerzo de corte adimensional crítico  $\tau_{*c}$ , asociado a una velocidad crítica  $u_{*c}$ . Cuando el  $\tau_* > \tau_{*c}$ , entonces se produce el arrastre de sedimentos.

## 2.4. Ecuaciones de movimiento

### 2.4.1. Navier-Stokes

La ecuación de Navier-Stokes es una de las ecuaciones fundamentales en la mecánica de fluidos. Describe el comportamiento de los fluidos en movimiento y establece una relación entre la velocidad del fluido, la presión y la viscosidad del mismo.

La ecuación de Navier-Stokes se expresa matemáticamente como:

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) = -\nabla \hat{p} + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (2.25)$$

Donde:

- $\rho$ : Densidad del fluido.
- $\vec{u}$ : Velocidad del fluido.
- $t$ : Tiempo.
- $\hat{p}$ : Presión,  $\hat{p} = p + \rho gh$ .
- $\mu$ : Viscosidad dinámica.
- $\nabla$ : Operador gradiente.

La ecuación de Navier-Stokes es una ecuación diferencial parcial no lineal y, en general, no tiene solución analítica exacta para casos complejos. Sin embargo, se han desarrollado diversos métodos numéricos para resolver esta ecuación y simular el comportamiento de los fluidos en diferentes condiciones.

### 2.4.2. RANS

Las ecuaciones RANS (del inglés Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) son un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales que se utilizan en la mecánica de fluidos para describir el comportamiento de los fluidos turbulentos. Las ecuaciones RANS se derivan de las ecuaciones de Navier-Stokes mediante el promediado de Reynolds, que es un método matemático utilizado para separar el flujo turbulento del flujo laminar en un fluido (Tapia, 2018).

Entonces, si se consideran flujos incompresibles, las componentes de velocidad y presión se expresan como:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (2.26)$$

$$p_i = \bar{p}_i + p'_i \quad (2.27)$$

Donde las variables promedio se denotan con una barra ( $\bar{x}$ ) y las turbulentas con una prima ( $x'$ ).

### 2.4.3. Saint-Venant

Las ecuaciones de Saint-Venant se derivan a partir de la promediación vertical de las ecuaciones RANS, las cuales descomponen las velocidades en cada eje en un término promedio y una fluctuación. Estas ecuaciones forman un sistema no lineal, lo que implica que su solución no se puede obtener de forma analítica, requiriendo en su lugar la aplicación de métodos numéricos para resolverlas (Torres, 2022).

Se puede definir un vector  $\vec{U} = (U, V)$ , donde:

$$U_i = \frac{1}{h} \int_{Z_f}^{Z_s} \bar{u}_i dz \quad (2.28)$$

Donde:

- $Z_f$ : Cota de fondo.
- $Z_s$ : Cota superficial.
- $h$ :  $Z_f - Z_s$ .

Promediando la ecuación de continuidad sobre la vertical se obtiene:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla(h) + h \nabla \cdot (\vec{U}) = S_{ce} \quad (2.29)$$

Por último, del promedio en la vertical de las ecuaciones de momentum se obtiene (Torres, 2022):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla U = -g \frac{\partial Z_s}{\partial x} + F_x + \frac{1}{h} \nabla \cdot (h v_e \nabla(U)) \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla V = -g \frac{\partial Z_s}{\partial y} + F_y + \frac{1}{h} \nabla \cdot (h v_e \nabla(V)) \quad (2.31)$$

Donde:

- $S_{ce}$ : Entradas o descargas de agua en el dominio.
- $t$ : Tiempo [s].
- $v_e$ : Coeficiente de difusión turbulenta [ $m^2/s$ ].
- $F_x$  y  $F_y$ : Fuerzas que pueden representar el viento, fuerzas de Coriolis, fricción de fondo y fuente de momentum [ $m^2/s$ ].

## 2.5. Resistencia hidráulica

La ley de resistencia hidráulica se expresa como (Niño, 2005):

$$\tau_0 = C_f \cdot \rho \cdot U^2 \quad (2.32)$$

Donde:

- $\tau_0$ : Esfuerzo de corte sobre el fondo.
- $C_f$ : Coeficiente o factor de fricción adimensional.
- $U$ : Velocidad media del flujo.

Al definir la velocidad friccional como:  $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ , se tiene:

$$\frac{U}{u_*} = \sqrt{\frac{1}{C_f}} \quad (2.33)$$

Para la ecuación de Manning:

$$U = \frac{\sqrt{S}}{n} R_h^{2/3} \quad (2.34)$$

Donde  $n$  es el coeficiente de Manning, que se relaciona con  $C_f$  de la siguiente manera:

$$C_f = \left( \frac{\sqrt{gn}}{R_h^{1/6}} \right)^2 \quad (2.35)$$

La relación entre el número de Manning y el diámetro representativo del sedimento ( $d_s$ ) se muestra en la ecuación 2.36.

$$n = \frac{d_s^{1/6}}{26,4} \quad (2.36)$$

El número de Strickler relaciona el coeficiente de Manning y  $d_s$ , expresado como:

$$S_t = \frac{\sqrt{gn}}{d_s^{1/6}} \quad (2.37)$$

La ecuación de Keulegan expresa  $S_t$  en función de la relación  $d_s/R_h$ , definida como la rugosidad relativa del lecho. Calculando la inversa, se tiene que el número de Strickler es 0,12 para el rango  $10 < R_h/d_s < 200$  (Niño, 2005). Fuera de ese rango,  $S_t$  aumenta hasta 0,15 aproximadamente. En este caso, el río Blanco cuenta con un lecho granulométrico grueso, en el cual se tiene  $R_h/d_s < 10$ . Aquí la rugosidad relativa es alta y se corresponde con una resistencia hidráulica alta, donde las ecuaciones de Strickler y Keulegan ya no son válidas. Para valores  $R_h/d_s < 10$ , Ayala y Oyarce (1993) analizaron la resistencia hidráulica en el río Mapocho Alto obteniendo una relación para el número de Strickler definida como:

$$S_t = \frac{(R_h/D_{90})^{1/6}}{3,3(R_h/D_{90})^{0,57}} \quad (2.38)$$

El coeficiente de Manning depende de otros factores además del sedimento, como la vegetación, obstrucciones, irregularidades, etc., por lo que puede ser estimado como:

$$n = n_0 + n_s \quad (2.39)$$

Donde  $n_s$  es el coeficiente de Manning debido al tamaño del sedimento y  $n_0$  una corrección por otros factores (Chow, 1994).



## 2.6. Transporte de sedimentos

El transporte de sedimentos es un fenómeno que se relaciona con el régimen hidráulico del río. Existen dos mecanismos por los que puede producirse: suspensión y arrastre de fondo. El movimiento de una partícula desde el lecho ocurre cuando el esfuerzo de corte ejercido por el flujo supera a las fuerzas de resistencia. Estas se deben al tamaño de los sedimentos y la cohesión, en el caso de sedimentos cohesivos como el cobre.

### 2.6.1. Gasto sólido en suspensión

El gasto sólido en suspensión corresponde al material que es transportado fuera de la capa de arrastre de fondo, cuyo espesor, según Einstein se estima aproximadamente como dos veces el diámetro de las partículas que se mueven como arrastre de fondo (Tapia, 2018). El material en suspensión está formado por el material de lavado y el material de fondo en suspensión.

El material de lavado corresponde a la fracción de arenas muy finas, limos y arcillas que se mantienen en suspensión aún para bajas velocidades de escurrimiento. Por lo general, es arrastrado por la lluvia hasta el río y/o, como producto de la erosión de las laderas del río. Por otro lado, el material de fondo en suspensión corresponde al material proveniente del lecho y es arrastrado por suspensión.

Para obtener el gasto en suspensión, Telemac resuelve la ecuación bidimensional de advección-difusión:

$$\frac{\delta hC}{\delta t} + \frac{\delta hUC}{\delta x} + \frac{\delta hVC}{\delta y} = \frac{\delta}{\delta x} \left( h\epsilon_s \frac{\delta C}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left( h\epsilon_s \frac{\delta C}{\delta y} \right) + E - D \quad (2.40)$$

Donde  $C = C(x,y)$  es la concentración promedio en profundidad expresada en % de volumen (-),  $(U,V)$  son los componentes de la velocidad promediados en profundidad en las direcciones  $x$  e  $y$ , respectivamente,  $\epsilon_s$  es la difusividad turbulenta del sedimento.  $E$  y  $D$  son la erosión y deposición respectivamente.

### 2.6.2. Gasto sólido de fondo para granulometría uniforme (Niño, 2005)

El gasto sólido ( $q_s$ ) se define como la tasa de transporte de sedimento, expresado como el volumen o peso seco por unidad de tiempo que pasa por una sección transversal de un cauce (Niño, 2005). Se define el gasto sólido de fondo adimensional ( $q_{*s}$ ) como:

$$q_{*s} = \frac{q_s}{\sqrt{g \cdot R \cdot ds}} = W_s^* \cdot \tau_*^{3/2} \quad (2.41)$$

Donde:

- $W_s^*$ : Tasa de transporte adimensional.

Para el caso de sedimentos uniformes, una de las fórmulas más utilizadas es la de Peter-Meyer y Muller (1948) expresada:

En función de  $q_{*s}$ :

$$q_{*s} = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{3/2} \quad (2.42)$$

En función de  $W_s^*$ :

$$W_s^* = 8(1 - \tau_c/\tau)^{3/2} \quad (2.43)$$

### 2.6.3. Gasto sólido de fondo para granulometría extendida

El río Blanco, como otros ríos de montañas o cordilleranos con pendientes relativamente altas, tienen lechos de grava con granulometrías extendidas no uniformes. En estos casos, las partículas de diámetros más gruesas son más difíciles de mover que las más finas. De esta forma, se produce una capa superficial del lecho que es más gruesa que la del sustrato, llamada coraza (Niño, 2005).

En este caso, la fórmula de Peter-Meyer y Miller no es aplicable, ya que no toman en cuenta la formación de esta capa. Sin embargo, el método de Wilcock y Crowe (2003) permite calcular el gasto sólido de fondo en lechos de granulometría extendida que se basan en la granulometría de la coraza (Arias, 2015).

Para calcular el gasto sólido adimensional  $W_{si}^*$ , se plantea que es función de la razón entre el esfuerzo de corte sobre el lecho  $\tau$  y un esfuerzo de corte de referencia  $\tau_{ri}$ . Cuando estos dos esfuerzos son iguales, entonces se tiene que  $W_{si}^* = 0.002$ .

El esfuerzo de corte de referencia se estima para todas las fracciones granulométricas con la expresión (Arias, 2015):

$$\frac{\tau_{ri}}{\tau_{rg}} = \left( \frac{d_i}{d_g} \right)^b \quad (2.44)$$

Donde:

- $\tau_{rg}$ : Esfuerzo de corte de referencia asociado al diámetro geométrico.
- $d_i$ : Diámetro de las partículas correspondiente a la fracción i.
- $d_g$ : Diámetro geométrico de la distribución granulométrica.
- $b$ : exponente que debe ser determinado para cada una de las fracciones granulométricas i. Se calcula como:

$$b = \frac{0,69}{1 + \exp\left(1,5 \cdot \frac{d_i}{d_g}\right)} \quad (2.45)$$

Una vez se tienen los respectivos valores de  $\tau$  y  $\tau_{ri}$ , se calcula el gasto sólido para cada una de las fracciones granulométricas, por medio de la siguiente expresión, donde  $\phi = (\tau/\tau_{ri})$ :

$$W_{si}^* = \begin{cases} 0,002\phi^{7,5} & \phi < 1,35 \\ 14 \left(1 - \frac{0,894}{\phi^{0,5}}\right) & \phi \geq 1,35 \end{cases} \quad (2.46)$$

Una vez se conoce el gasto sólido adimensional para cada fracción, se obtiene el gasto adimensional total (Niño, 2005):

$$W_s^* = \sum_{i=1}^N W_{s_i}^* \quad (2.47)$$

Para obtener  $q_s$ , se utiliza la ecuación 2.41.

### 2.6.4. Ecuación de Exner

Para calcular la evolución del lecho, se utiliza la ecuación de Exner:

$$(1 - n) \frac{\partial Z_f}{\partial t} + \nabla Q_b = 0 \quad (2.48)$$

Donde:

- $n$ : Porosidad [-].
- $Z_f$ : Elevación de la capa de fondo [ $m$ ].
- $Q_b$ : Gasto sólido de fondo [ $m^2/s$ ].

La ecuación de Exner describe la conservación de la masa entre el sedimento en el lecho de un río y el sedimento que se transporta. Establece que la elevación del lecho aumenta proporcionalmente a la cantidad de sedimento que cae fuera del transporte y, a la inversa, disminuye proporcionalmente a la cantidad de sedimento que se arrastra por el flujo. Debido a que no existen sumideros o fuentes, la ecuación 2.48 se iguala a cero.

## 2.7. Sedimento cohesivo

Existen fuentes bibliográficas donde el concentrado de cobre se considera como un sedimento cohesivo (Bustamante y Niño, 2021), lo que requiere un enfoque de estudio distinto. Este tipo de sedimento está compuesto por partículas de pequeño diámetro, que oscilan entre 1 y 100 [ $\mu m$ ]. Estas partículas experimentan fuerzas de atracción y repulsión, que tienen un origen electroquímico y atómico y son el resultado de las propiedades mineralógicas del sedimento (Partheniades, 2009). En términos generales, la velocidad de sedimentación de estas partículas es tan baja que la fracción más fina puede mantenerse en suspensión prácticamente de forma indefinida. Sin embargo, bajo condiciones específicas, las fuerzas de atracción prevalecen sobre las de repulsión, lo que provoca que las partículas colisionen y se agrupen formando flóculos con tamaños y velocidades de sedimentación mucho mayores que las partículas individuales.

Cuando se tiene un derrame de concentrado de cobre, inicialmente se transporta por suspensión durante los primeros metros, pero luego sedimenta y percola en el lecho debido a su alto peso específico (Bustamante-Penagos y Niño, 2021).

Einstein en Beschta y Jackson (1979), Cui y Parker (1998), Diplas y Parker (1985) concluyeron que la profundidad de percolación de material fino dependía del diámetro de las partículas que conformaban el lecho (alrededor de 2 a 5 veces el  $D_{90g}$ ). Sin embargo, esto

no aplica para el concentrado de cobre, ya que la profundidad de percolación es mucho más grande. Bustamante-Penagos y Niño (2020) realizaron un experimento en el cual vertieron concentrado de cobre en un canal abierto para estudiar los factores que influyen en la profundidad de percolación. Consideraron un lecho con 2 capas: grava y arena. A partir de los resultados, no pudieron encontrar una relación entre la profundidad de infiltración y los parámetros hidráulicos (ancho del canal, número de Reynolds, Froude o Shields), por lo que propusieron relaciones adimensionales que pudieran caracterizar la percolación en función del tamaño de grano de sedimento y concentrado de cobre. En particular, se definió una percolación adimensional  $H=H_{perc}/D_{90arena}$  y un diámetro adimensional  $D=ds/D_{90arena}$ . Se encontró que H tiende a decrecer a medida que el D aumenta, con una tendencia lineal. Las gravas tienden a proteger al concentrado de cobre; solo cuando hay socavación en el lecho hay re suspensión de éste.

Para efectos de este trabajo, se simulará el concentrado de cobre como sedimento cohesivo y no cohesivo para estudiar sus diferencias.

## 2.8. Softwares

### 2.8.1. HEC-RAS, versión 6.3.1

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System) es un software utilizado para el análisis hidráulico de ríos, canales y sistemas de flujo en general (Brunner, 2016). Es una herramienta ampliamente utilizada en ingeniería hidráulica y gestión de recursos hídricos. Permite modelar inundaciones y realizar análisis de sedimentos y erosión. Cuenta con el módulo RAS Mapper, que permite la visualización de los resultados.

### 2.8.2. Telemac-2D, versión 8p0r0

Telemac es un programa de modelado hidráulico creado por el Servicio de Estudios y Modelización Hidráulica (SEMH) de la Dirección General de Agua en Francia. Este software se emplea con el propósito de replicar el comportamiento del agua y los sedimentos en diferentes entornos acuáticos, como ríos, estuarios, puertos y otras infraestructuras hidráulicas. Su funcionamiento se basa en la aplicación del modelo numérico de las ecuaciones de Navier-Stokes para representar la hidrodinámica, además de incorporar modelos para el transporte de sedimentos y contaminantes en el agua. Además de su capacidad de simulación, Telemac ofrece herramientas destinadas a la visualización y el análisis de datos, como se cita en la referencia (Open Telemac, 2021).

### 2.8.3. BlueKenue

Blue Kenue™ es una herramienta avanzada de preparación, análisis y visualización de datos para modeladores hidráulicos. Proporciona una interfaz que integra datos geospaciales con datos de entrada y resultados del modelo, y la importación directa de resultados de modelos de Telemac. Permitirá generar el mallado de la topografía que se utilizará en Telemac-2D (NRC-CHC, 2009).

#### **2.8.4. SISYPHE**

Corresponde a un módulo de Telemac. Es utilizado principalmente para la simulación de la dinámica de partículas y sedimentos en ríos. Utiliza un modelo numérico para simular el movimiento de partículas y sedimentos en el agua, así como la erosión y sedimentación en los ríos y canales (Tassi y Villaret, 2014).

#### **2.8.5. QGIS, versión 3.32.2**

QGIS (Quantum GIS) es un sistema de información geográfica (SIG) de código abierto que permite a los usuarios crear, editar, visualizar y analizar datos geoespaciales (QGIS Development Team, 2009).

# Capítulo 3

## Análisis hidrológico

### 3.1. Caracterización geomorfológica de la cuenca

Para la caracterización de la cuenca se utilizó el software QGIS (QGIS Development Team, 2009), al cual se le importaron los archivos shape descargados de la mapoteca digital de la DGA. A continuación se presentan las provincias principales (Figura 3.1) y la red hidrográfica de la cuenca de río Aconcagua que se muestra en la Figura 3.2.

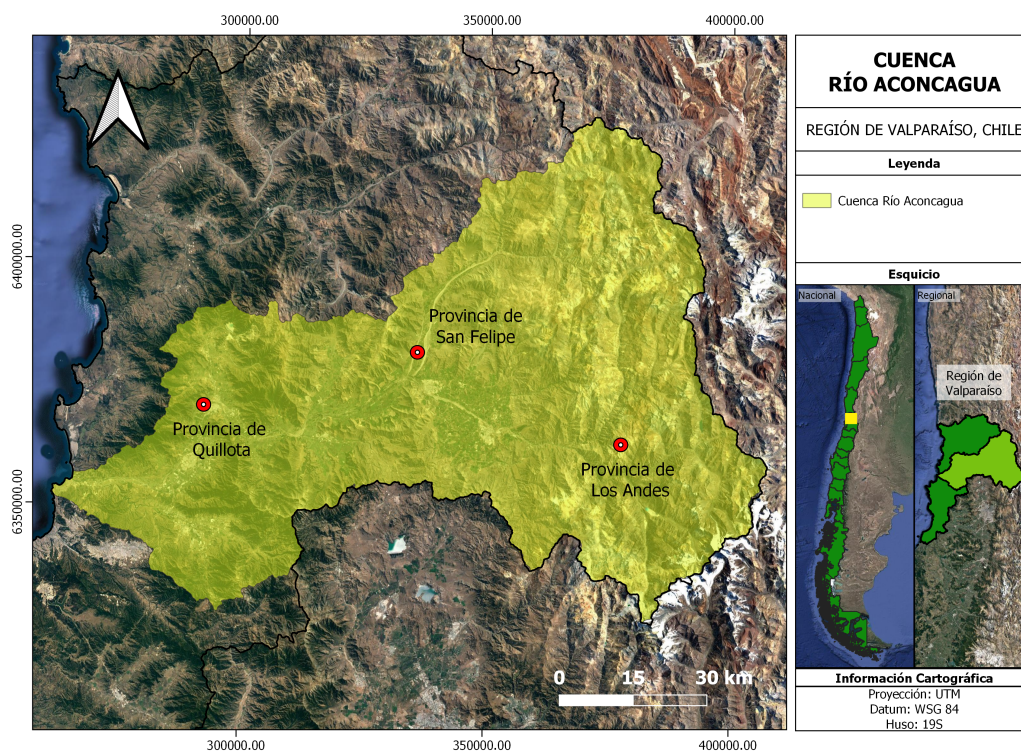


Figura 3.1: Cuenca de río Aconcagua, Región de Valparaíso, Chile. Elaboración propia.

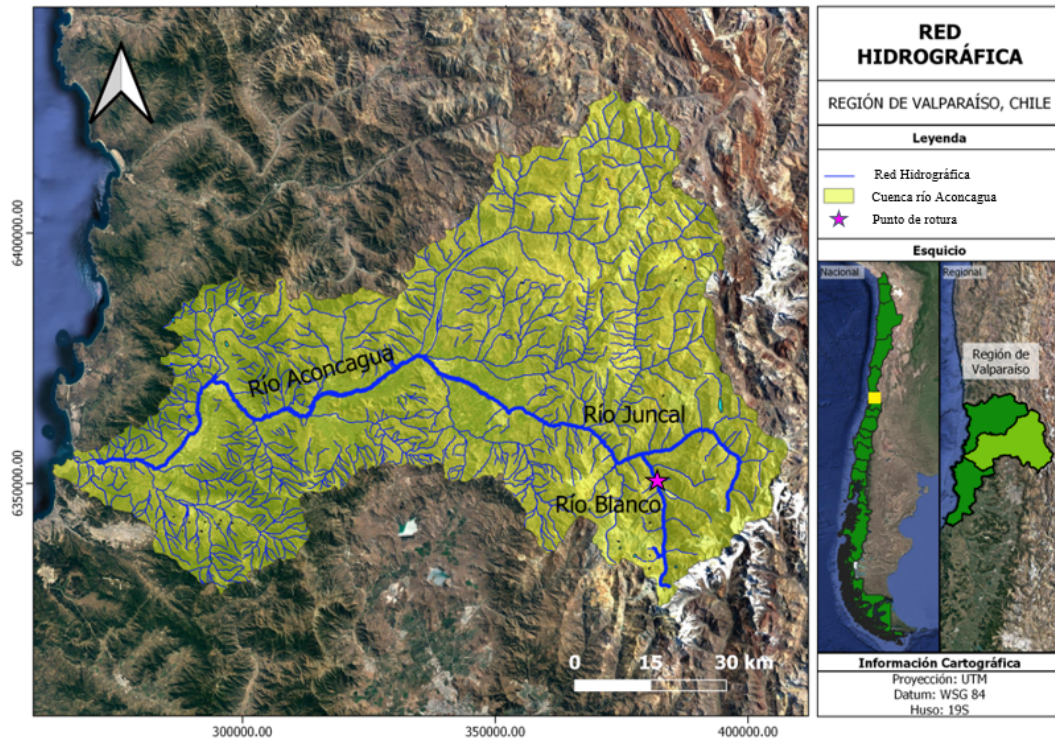


Figura 3.2: Red hidrográfica: Principales cauces y punto de rotura, Cuenca del río Aconcagua. Fuente: Elaboración propia.

Si se toma en cuenta la cuenca completa, el caudal calculado incorporará la contribución de todos los afluentes que desembocan en el cauce principal, en este caso, el Río Aconcagua. Sin embargo, para evitar una sobreestimación del caudal, se realiza un análisis más detallado, específicamente focalizado en la subcuenca del río Aconcagua Alto (ver Figura 3.3). De esta manera, se examinan y consideran únicamente las características hidrológicas y las contribuciones de esa porción específica de la cuenca, permitiendo una evaluación más precisa del caudal.



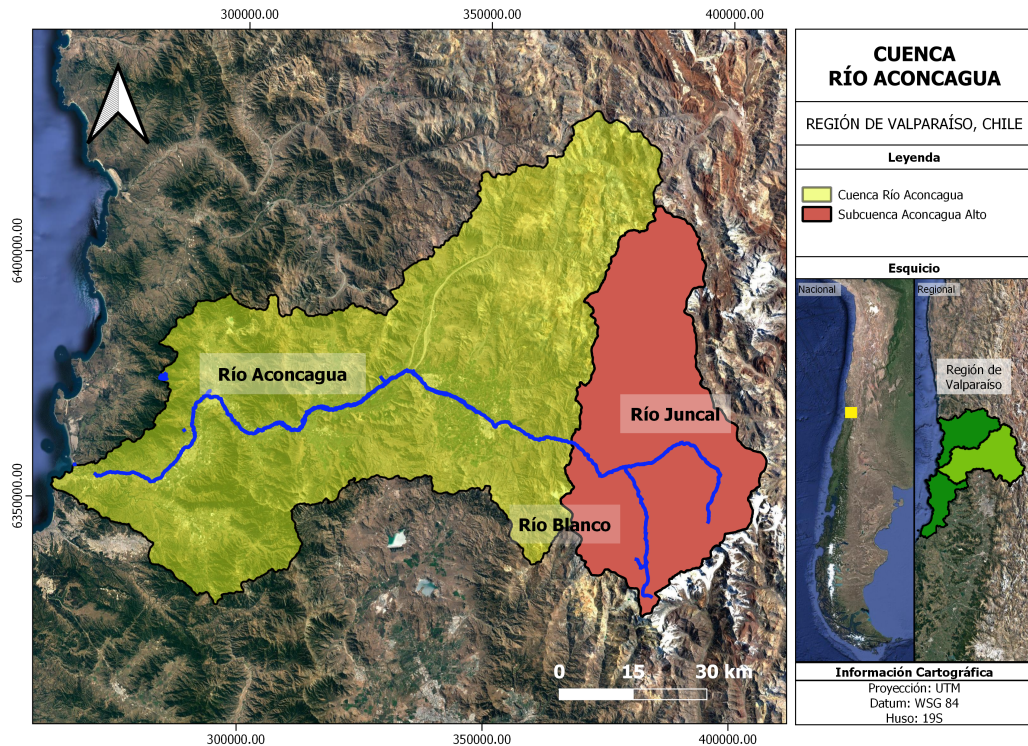


Figura 3.3: Subcuenca del río Aconcagua Alto. Fuente: Elaboración propia.

Desde QGIS se obtuvo directamente la información para graficar la curva hipsométrica de la Figura 3.4. Se discretizó en tres secciones y a cada una se le realizó una regresión lineal.

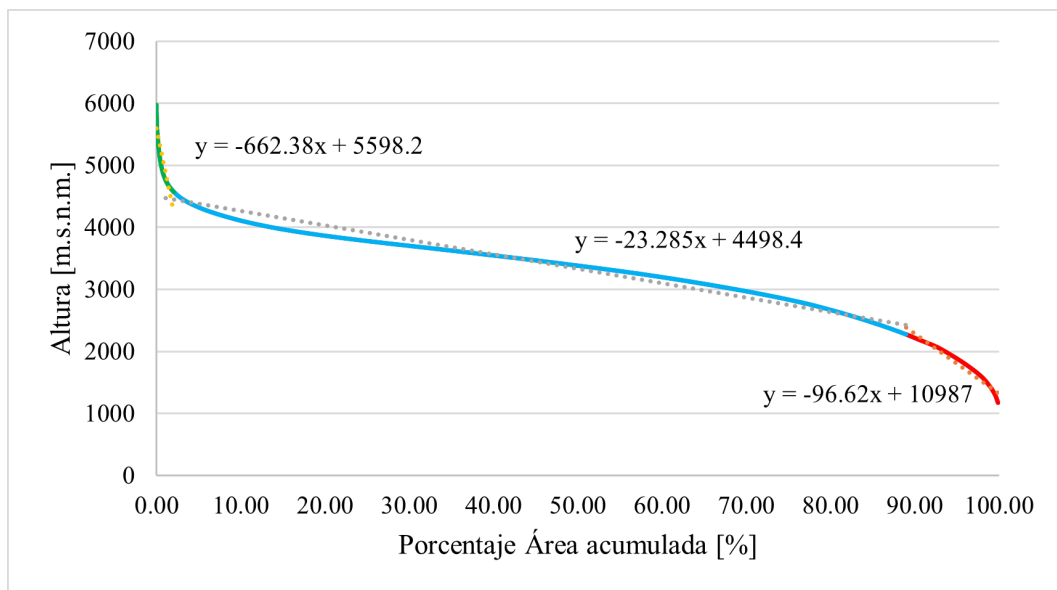


Figura 3.4: Curva hipsométrica segmentada junto a cada regresión lineal, cuenca del río Aconcagua. Fuente: Elaboración propia.

De esta forma, a partir de la sección intermedia de la curva hipsométrica de la subcuenca (sección donde se encuentra la línea de nieves), se calcula el área pluvial y nival aportantes. Los parámetros de la subcuenca se resumen en la Tabla 3.1.



Tabla 3.1: Parámetros geomorfológicos, subcuenca del río Aconcagua Alto.

<b>Área total</b>	1959	[ $km^2$ ]
<b>Línea de nieves</b>	2400	[ $m.s.n.m$ ]
<b>Área acumulada</b>	90,1	[ $\%$ ]
<b>Área nival</b>	1765,4	[ $km^2$ ]
<b>Área pluvial</b>	193,6	[ $km^2$ ]
<b>Largo</b>	43,9	[ $km$ ]
<b>Pendiente media</b>	0,11	[ $m/m$ ]

## 3.2. Caracterización hidrológica de la cuenca

### 3.2.1. Estaciones meteorológicas y fluviométricas

A partir de la mapoteca digital de la DGA, se descargó la información de estaciones meteorológicas y fluviométricas en formato shape. La estación de la cual se necesita información meteorológica y fluviométrica corresponde a "río Aconcagua en río Blanco". La Tabla 3.2 resume la información de esta estación, mientras que la Figura 3.5 muestra la distribución de estaciones meteorológicas (puntos celestes) y fluviométricas (puntos rojos).

Tabla 3.2: Información de la estación río Aconcagua en río Blanco, DATUM WGS-84.

<b>Estación río Aconcagua en río Blanco</b>	
Código BNA	05403002-9
UTM Norte	6357917
UTM Este	377747
Altitud [m.s.n.m]	1420

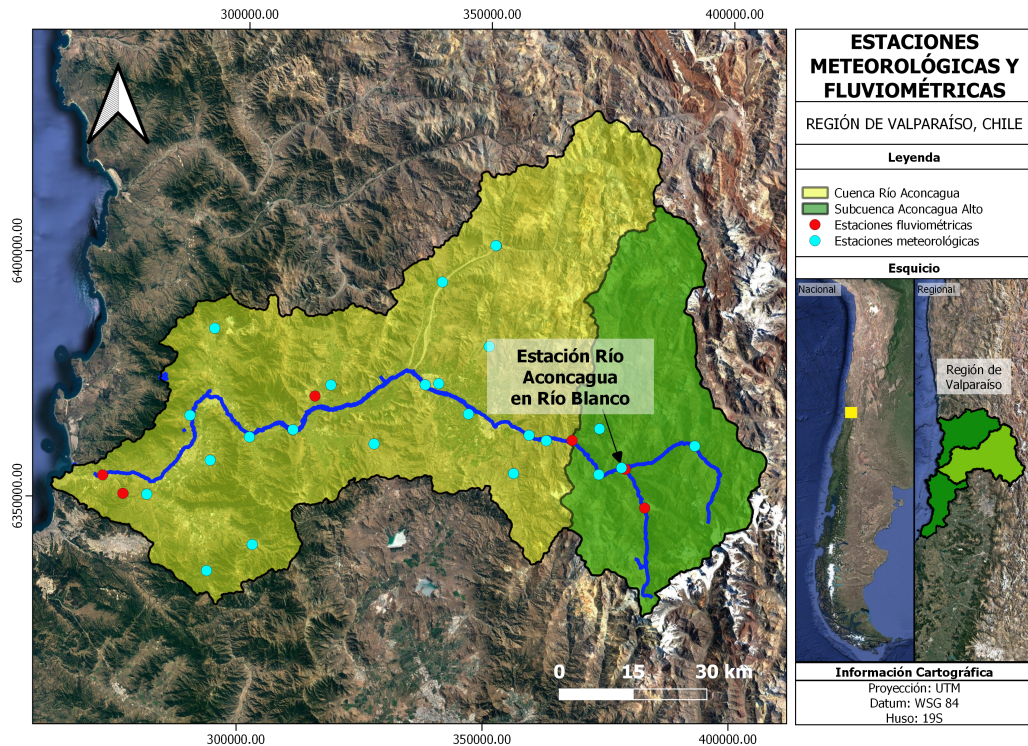


Figura 3.5: Ubicación de estaciones meteorológicas y fluviométricas, Cuenca del río Aconcagua. Fuente: Elaboración propia.

Desde la página web de CAMELS-CR2 (CAMELS-CL, s.f.), se descargaron las precipitaciones diarias y caudales medios mensuales. A partir de las precipitaciones diarias, se obtuvieron las medias mensuales y anuales. La serie de precipitaciones anuales se muestra en la Figura 3.6 a continuación, donde se observa que la tendencia va a la baja en la actualidad, debido al efecto de la megasequía (DGAC, 2023).

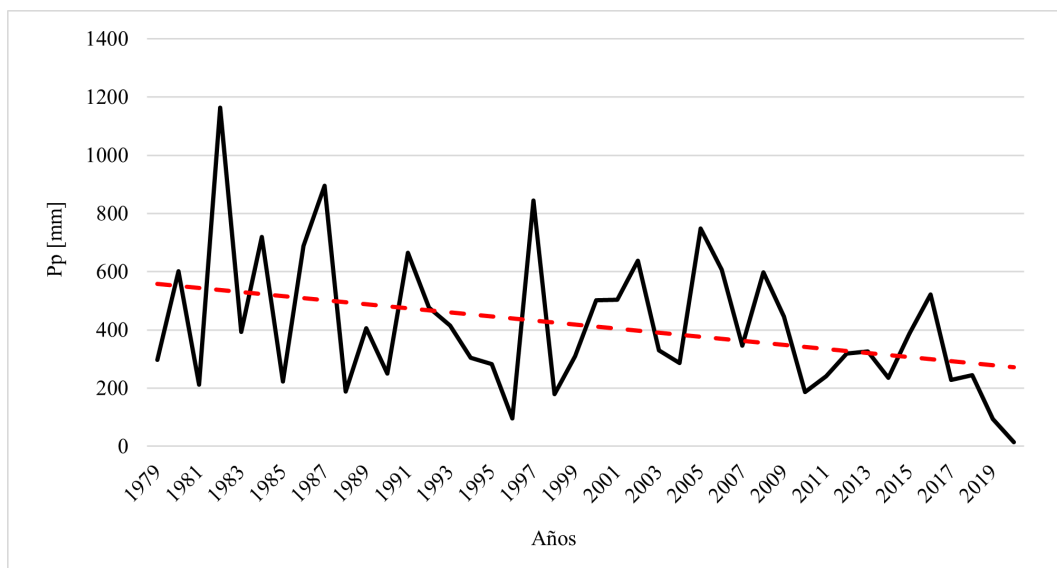


Figura 3.6: Serie anual de precipitaciones, en rojo se ve la línea de tendencia. Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.2. Análisis de frecuencia

Utilizando las precipitaciones máximas anuales, se realizó el análisis de frecuencia para ver qué distribución se ajusta mejor a los datos. Los resultados del test se encuentran resumidos en la Tabla 3.3, donde la única distribución rechazada es la de Log-Pearson.

Tabla 3.3: Test Chi cuadrado.

	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
<b>c2(calculado)</b>	5,30	6,29	3,02	14,90	3,46
<b>c2(0,05)</b>	9,49	9,49	7,81	7,81	9,49
<b>Test</b>	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Rechazado	Aceptado

A partir de un análisis visual, se concluye que la distribución de Gumbel de la Figura 3.7 es la que mejor se ajusta a los datos y no subestima las precipitaciones.

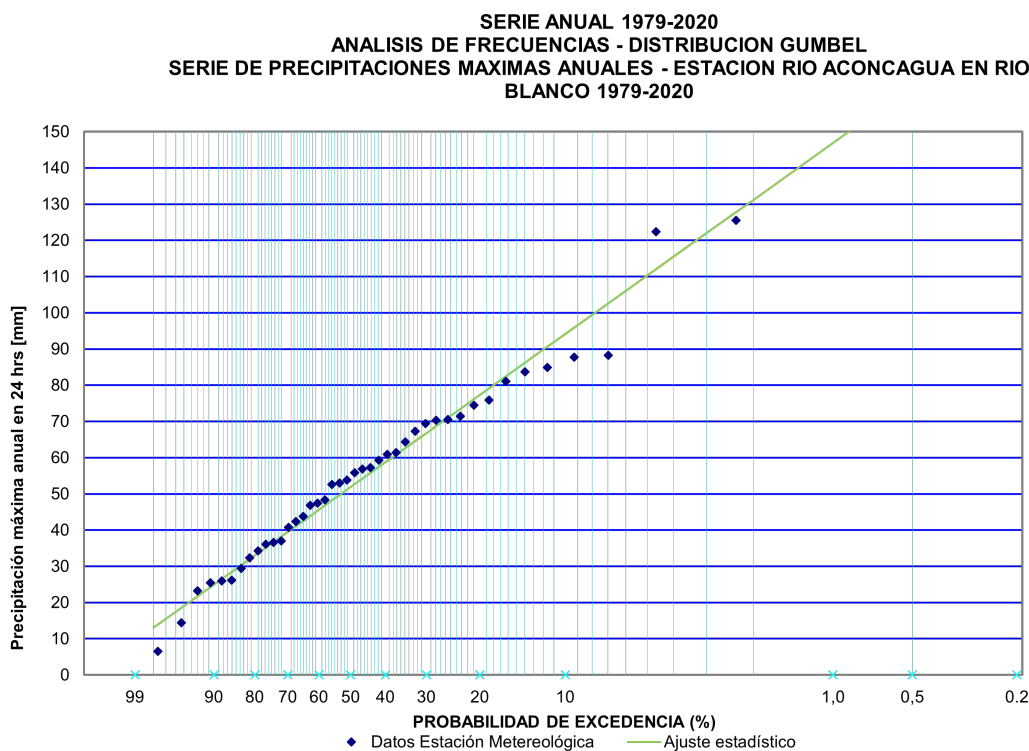


Figura 3.7: Análisis de frecuencia - Distribución Gumbel. Fuente: Elaboración propia.

De aquí se obtiene que la precipitación máxima anual de 24 horas para  $T = 10$  años es 94,2 [mm].

### 3.2.3. Curva de variación estacional

A partir de los caudales medios mensuales de los años 1979-2020 (estación río Aconcagua en río Blanco), se estimó la curva de variación estacional mostrada en la Figura 3.8. Para ello fue necesario reordenar los caudales y calcular su valor asociado a las probabilidades de

excedencia de 5 %, 10 %, 20 %, 50 %, 85 % y 95 %, respectivamente.

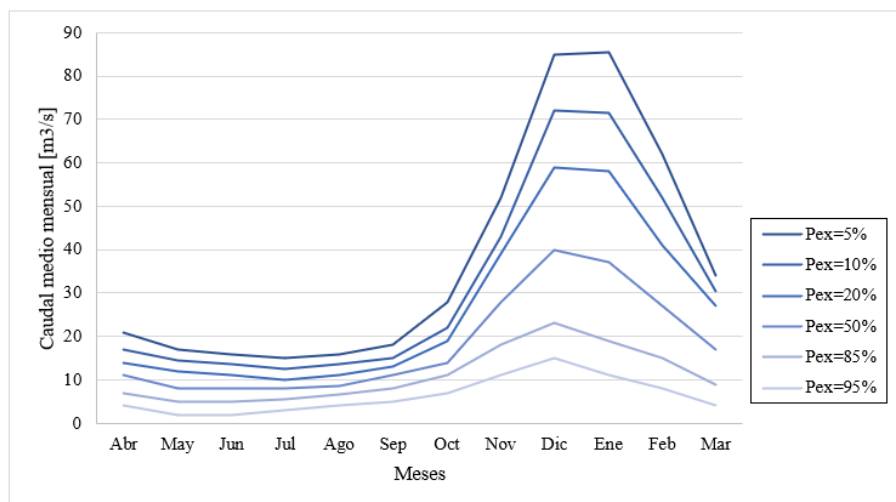


Figura 3.8: Curva de variación estacional. Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 3.8 se concluye que el régimen de la subcuenca es completamente nival, lo que quiere decir que los caudales provienen del derretimiento de nieve.

### 3.2.4. Caudales de crecida

En las Tablas 3.4 y 3.5 se resumen los caudales obtenidos para los métodos DGA-AC, Verni y King y Racional. En primer lugar se considera el cálculo en base a la cuenca completa y luego en base a la subcuenca.

Tabla 3.4: Caudales calculados con los métodos DGA-AC, Verni y King y Racional, para distintos periodo de retorno, Cuenca del río Aconcagua.

T [AÑOS]	Q(T) [m <sup>3</sup> /s]		
	DGA-AC	Verni y King	Método Racional
2	100,0	145,6	147,5
5	131,4	557,4	508,0
10	149,3	861,8	746,6
20	185,1	1216,8	1013,1
25	198,6	1459,1	1182,6
50	234,4	1770,5	1410,0
100	264,3	2392,4	1851,6

De la Tabla 3.4 se ve una diferencia en el orden de magnitud de los caudales obtenidos para los 3 métodos. Las ecuaciones utilizadas consideran las áreas aportantes nivales y pluviales de la cuenca del río Aconcagua, en la cual el área pluvial aportante es mucho mayor al área nival aportante (régimen pluvio-nival). De esta manera los resultados están sobreestimados y se estaría considerando el caudal que pasa por el punto de salida de la cuenca. Por otro lado, si se considera la subcuenca, se toma en cuenta el caudal que está pasando al inicio del

río Aconcagua (ver Figura 3.3). En la Tabla 3.5 se muestran los caudales obtenidos en este caso.

Tabla 3.5: Caudales calculados con los métodos DGA-AC, Verni y King y Racional, para distintos periodo de retorno, Subcuenca del río Aconcagua Alto.

T [AÑOS]	Q(T) [m <sup>3</sup> /s]		
	DGA-AC	Verni y King	Método Racional
2	70,1	8,7	28,0
5	92,1	33,4	96,6
10	104,6	51,7	141,9
20	129,8	73,0	192,6
25	139,2	87,5	224,8
50	164,3	106,2	268,0
100	185,2	143,5	352,0

En relación al hidrograma de escorrentía directa, se calculan los caudales para tres periodos de retorno: T=20, 50 y 100 años. Los resultados se muestran en la gráfica de la figura 3.9, para los cuales se obtiene una duración de 37 [hrs].

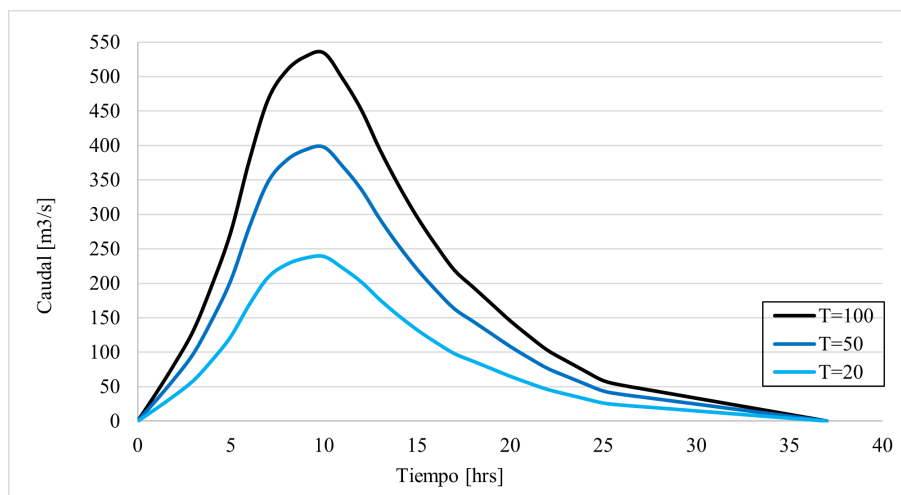


Figura 3.9: Hidrogramas de escorrentía directa para T=20, 50 y 100 años. Fuente: Elaboración propia.

Los métodos de Verni y King, el Método Racional y el DGA-AC tienden a ser más precisos debido a que consideran factores específicos de la cuenca, sin embargo, estos métodos implican modelar en régimen permanente y bajo condiciones constantes o estables. Los caudales del hidrograma superan a los obtenidos con los otros métodos. Esto puede deberse a que la distribución de probabilidad seleccionada sobreestima las precipitaciones, y por ende, se sobreestiman los caudales. A pesar de ello, se optó por utilizar los hidrogramas de crecida, ya que ofrecen una representación más rigurosa de la variación temporal del caudal que se tiene durante este tipo de eventos.

# Capítulo 4

## Modelo numérico

Como se mencionó anteriormente, se realizará un modelo en el software HEC-RAS y otro modelo en Telemac, para poder realizar una comparación entre ambas simulaciones.

### 4.1. Granulometría

A partir del informe “Análisis de la composición físico química de los sedimentos fluviales y su relación con la disponibilidad de metales en agua, Cuenca del río Aconcagua” (CENMA, 2008) se obtiene la granulometría del río Blanco. La zona de donde se extrajo la muestra de sedimento se puede observar en el mapa de la Figura 4.1, mientras que la curva granulométrica obtenida se muestra en la Figura 4.2.

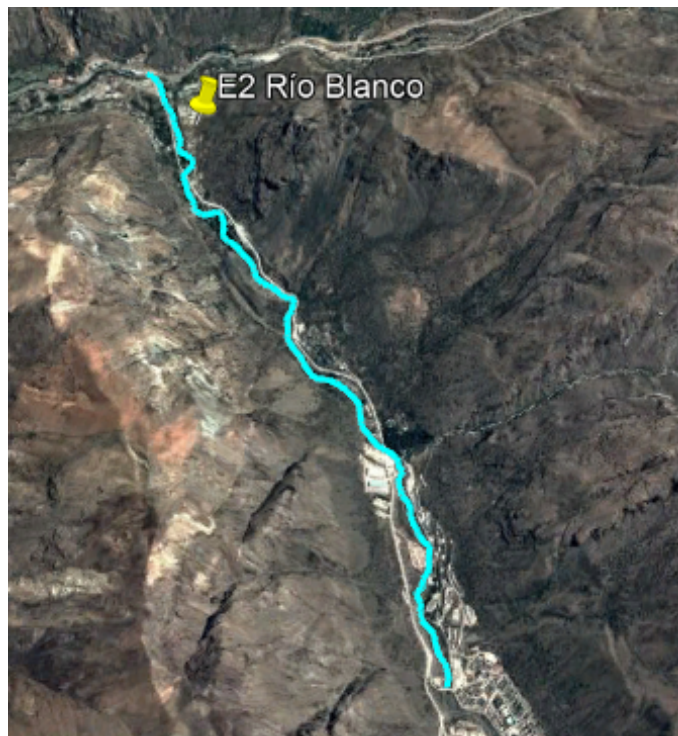


Figura 4.1: Ubicación de la zona de extracción de sedimentos para su estudio.  
Fuente: CENMA (2008).



Tabla 4.1: Coordenadas UTM y altura de la estación de muestreo E2. Fuente: CENMA, (2008).

Este	Norte	Altura
378865	6357674	1410

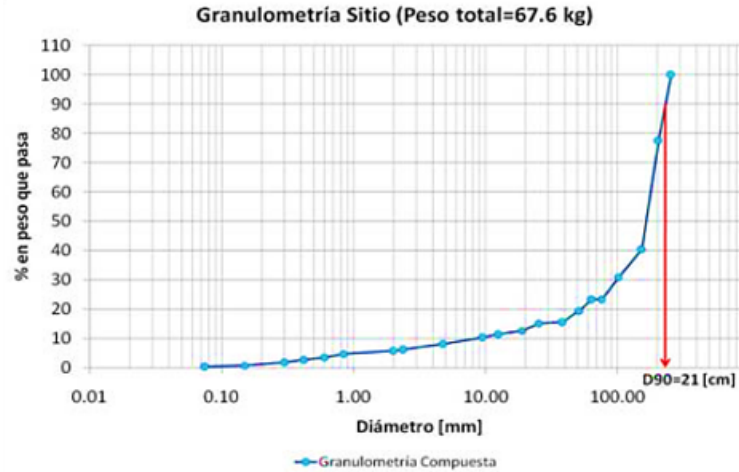


Figura 4.2: Curva granulométrica estación E2. Fuente: CENMA (2008).

De la Figura 4.2 se muestra una granulometría extendida y mal graduada. Se obtiene un valor representativo  $D_{90}$  de 21 [cm] mientras que el tamaño representativo  $D_{50}$  es del orden de los 16,6 [cm]. Además, se registran tamaños máximos de coraza cercanos a los 26 [cm] e incluso de 50 [cm] (CENMA, 2008).

A partir de la Figura 4.2, se obtiene que la desviación estándar  $\sigma_s = 2,2$ , lo que indica la existencia de una granulometría extendida.

## 4.2. Estimación del coeficiente de Manning

Como el río Blanco tiene un lecho extendido y macro rugoso (CENMA, 2008), es necesario realizar un proceso iterativo para obtener el coeficiente de Manning (Rivera, 2022) (se utilizó HEC-RAS para obtener los resultados en cada iteración):

1. Se calcula un coeficiente inicial ( $n_i$ ) en función del tamaño de sedimento utilizando la ecuación 2.36.
2. Con el caudal y  $n_i$  estimado, se obtiene el radio hidráulico y altura normal, considerando una sección transversal representativa (se considera una aguas arriba, una aguas abajo y una intermedia).
3. Reemplazando los valores de  $D_{90}$  y  $Rh$  en la ecuación 2.38 se obtiene  $St$ .
4. Reemplazando  $St$ ,  $g$  y  $D_{90}$  en la ecuación 2.37 se calcula un nuevo coeficiente  $n_f$ .

5. Se comparan los valores de  $n_i$  con  $n_f$ . Si difieren, se vuelve al paso 2 y se itera hasta que  $n_i - n_f = 0$ .

Finalmente se obtienen los valores de los coeficientes de Manning y número de Strickler para cada periodo de retorno (promediando los coeficientes de las tres secciones para tener 1 valor para cada caso). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Coeficientes de Manning obtenidos para T=20, 50 y 100 años.  
Fuente: Elaboración propia.

Caso de estudio	Manning	Strickler
T=20	0,0398	0,161
T=50	0,0366	0,157
T=100	0,0361	0,153

Se corroboró en cada caso que  $Rh/D_{90} < 10$ . Así, se verifica el efecto macrorugoso en el lecho del río, como se observa en la Figura 4.3.

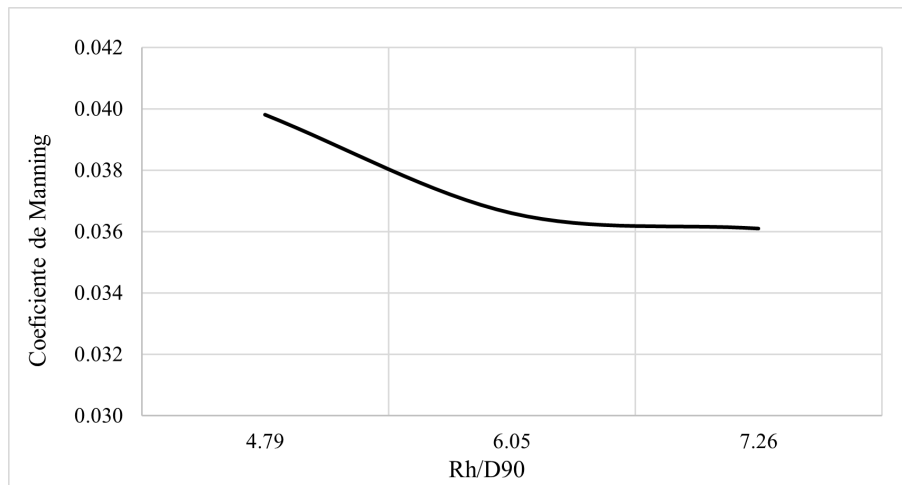


Figura 4.3: Efecto macro rugoso en el río Blanco. Fuente: Elaboración propia.

### 4.3. Pre-procesamiento modelo de elevación digital

Para obtener la topografía del terreno se descargaron modelos de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés) Alos Palsar con una resolución de 12,5 [m]. Este archivo se utilizó para crear la grilla de los modelos bidimensionales en los softwares de HEC-RAS y Telemac.

Para obtener mejores resultados, se realizó un pre-procesamiento de la topografía. Con QGIS se creó un nuevo DEM sin depresiones, y con el comando *r.carve* se generó un canal trapezoidal a partir del eje del cauce, con un ancho de 50 [m], una profundidad de 5 [m], y talud de 1 [m]. Sumado a lo anterior, con la calculadora ráster se resampleó la resolución del DEM.



### 4.3.1. Mallado en HEC-RAS

Para crear la malla en HEC-RAS, se importó el DEM de Alos Palsar al módulo RAS mapper como *terrain*, el cual contiene la información de las elevaciones.

En primer lugar se definió la geometría utilizando la opción *2D Flow Areas*, a partir de la cual se trazó el perímetro del área de estudio, comprendido por el valle de inundación. Se consideró como punto inicial el lugar donde se produjo la descarga de concentrado de cobre el año 2016, y como punto final, justo antes de la confluencia con el río Juncal. Adicionalmente, se trazó el eje del cauce mediante la herramienta *Break Line*. En el *2D Flow Areas Editor* se definió que los puntos de espaciamiento de X e Y fuese de 20 [m], por lo que se generó una malla cuadrada donde cada elemento es de 20x20 [m]. Lo anterior se definió en función del tamaño de pixel y por capacidad computacional. Para una modelación más fina en el área del cauce, se configuró la malla utilizando el *Breakline editor*, en el cual se definió un espaciado de 10 [m] repetido 2 veces al costado del eje. Lo anterior se muestra en la Figura 4.4.



Figura 4.4: Malla elaborada en HEC-RAS. La Figura a) muestra el área de estudio, mientras que la Figura b) muestra el detalle del refinado del cauce.  
Fuente: Elaboración propia.

Utilizando QGIS, se creó un shape con el perímetro del refinado del cauce, con el objetivo de asignar un coeficiente de Manning para el lecho del río en particular (Figura 4.5). Para la planicie de inundación se consideró utilizar un coeficiente de Manning de 0,05 (Chow, 1994) debido a la existencia de vegetación y matorrales en el valle. Esto se hizo para los 3 periodos de retorno.



Figura 4.5: Coeficientes de Manning en HEC-RAS definidos para el valle (azul,  $n=0,05$ ) y el cauce (rojo,  $n=0,04$ ). Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se agregaron las condiciones de borde con la herramienta *Boundary Conditions*. En el modelo de HEC-RAS, se utiliza la ecuación de Manning para estimar las velocidades del flujo. Esta ecuación considera una distribución de velocidad que es máxima en el centro del canal y disminuye hacia las orillas y el fondo. La forma de esta distribución de velocidad es similar a una parábola.

#### 4.3.2. Mallado en BlueKenue

Para la creación de la malla que se importará a Telemac-2D se utiliza el programa BlueKenue. Al igual que en HEC-RAS, para el cauce se utilizó un mallado más fino que para valle de inundación. En este caso, la grilla creada está conformada por elementos triangulares, que a su vez, sigue la dirección del flujo de manera tal de reducir los tiempos de modelación. Las secciones transversales del río se configuraron con 20 nodos (separación aproximada de 2 [m]), mientras que longitudinalmente, se asignaron nodos cada 2 metros. Para el valle, se configuró una malla triangular cuyas aristas crecen en una razón de 1,1 hasta alcanzar una longitud de 15 [m] aproximadamente. Es importante mencionar que el perímetro de la malla en BlueKenue se importó directamente del perímetro de la malla en HEC-RAS. La Figura 4.6 muestra el detalle del mallado.

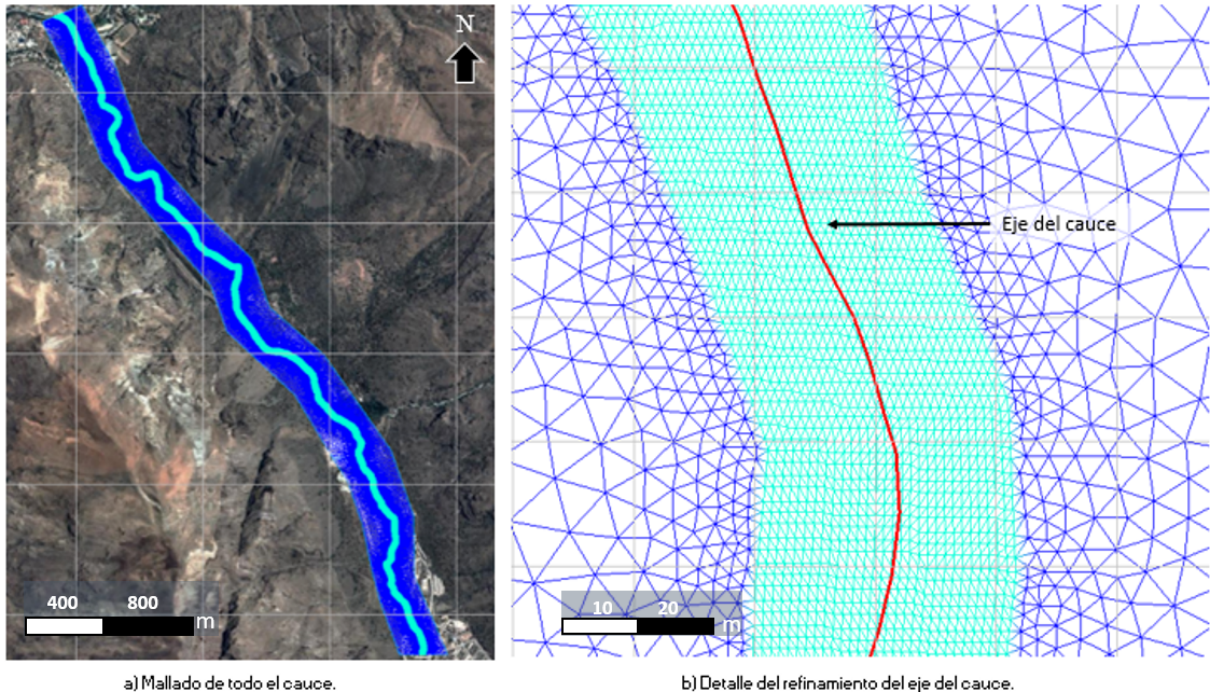


Figura 4.6: Malla elaborada en BlueKenue. La Figura a) muestra el área de estudio, mientras que la Figura b) muestra el detalle del refinado del cauce. Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenida la malla, se interpoló con el DEM para obtener la cota topográfica (archivo *geometry.slf*) necesaria para modelar en Telemac. Para ello se creó un archivo *Selafin*, que contiene la malla con las elevaciones, y una malla con el coeficiente de fricción (Figura 4.7). Al igual que en HEC-RAS, se asignó un valor de 0,05 para el valle de inundación. Utilizando la herramienta *New closed line* se delineó el perímetro del cauce para poder asignarle un nuevo coeficiente de Manning al lecho, como se ve en la Figura 4.7.





Figura 4.7: Coeficientes de Manning en BlueKenue definidos para el valle (azul,  $n=0,05$ ) y el cauce (rojo,  $n=0,04$ ). Fuente: Elaboración propia.

La grilla se interpoló con la topografía original y modificada del cauce permitiendo obtener el archivo necesario para el modelo (archivo SELAFIN).

## 4.4. Simulación de crecidas

### 4.4.1. HEC-RAS

Para la simulación de crecidas en HEC-RAS es necesario contar con 3 archivos:

1. GEOMETRY: Corresponde a la malla creada en RAS Mapper que contiene la información del coeficiente de Manning y la ubicación de las condiciones de borde (aguas arriba y aguas abajo).
2. UNSTEADY FLOW: La simulación se realiza para un flujo impermanente. En el editor, se ingresa el tipo de condición de borde. En este caso el régimen del río es supercrítico por lo que la condición se establece aguas arriba. La condición utilizada es la de *Flow Hydrograph*, en la que se ingresa el hidrograma de crecidas obtenido anteriormente, se define el intervalo de tiempo y la pendiente.
3. PLAN: Contiene la geometría y flujo que serán utilizados para la simulación. Se ingresa el tiempo de modelación y se establece el intervalo de computación, definido de manera tal que se reduzca el número de iteraciones y la simulación sea lo más estable posible (asociado a un número de Courant bajo). Se establece que se modelará como flujo supercrítico.

Los resultados pueden visualizarse en RAS mapper. Se pueden obtener mapas para la profundidad, superficie de agua, velocidad, superficie de inundación, número de Courant, número de Froude, etc. Además es posible trazar perfiles transversales para visualizar los resultados en puntos de interés del río. Los resultados también pueden ser exportados en formato raster para visualizar y analizarlos en plataformas SIG.

#### 4.4.2. TELEMAC-2D

Para las simulaciones de crecidas en Telemac-2D, el software utiliza el solver que resuelve las ecuaciones de Saint-Venant para elementos finitos. Para la simulación se ingresa un archivo *.cas* en el cual son necesarios 2 archivos:

1. GEOMETRY FILE: Archivo *.slf* que contiene la malla del modelo interpolada con la topografía y coeficientes de Manning.
2. BOUNDARY CONDITIONS FILE: Archivo *.cli* que contiene el tamaño y tipo de las condiciones de borde. Este archivo se divide en 13 columnas que indican 13 condiciones de borde distintas. Las variables de tipo de límite nº 1, 2, 3 y 8 pueden tomar los valores enteros 2 (pared cerrada), 4 (límite libre tipo Neumann), 5 (límite prescrito tipo Dirichlet) o 6 (velocidad tipo Dirichlet).

Dentro del archivo *.cas*, se necesitan definir parámetros relacionados con la configuración inicial, archivos 'INPUT' y 'OUTPUT', condiciones iniciales, etc.

Para modelar un flujo impermanente, se sugiere correr una primera simulación en seco o hotstart de caudal constante. Para ello se establece una condición inicial de *Zero Depth* que sugiere que en  $t=0$  todo el río esta seco. Se da una duración tal para que el modelo llegue a una condición estable. El resultado obtenido es utilizado en el modelo impermanente como un archivo de entrada. Para correr este modelo es necesario crear un archivo *Liquid Boundary* que contenga la información de los hidrogramas de crecidas para ingresarlo como condición de borde aguas arriba. La condición aguas abajo se deja libre.

Dentro de las *Boundary Conditions* es necesario definir ciertos parámetros:

1. PRESCRIBED FLOWRATES/ELEVATIONS: Se definen los caudales de entrada y salida del modelo, y también las elevaciones en los bordes. Estas opciones se utilizan para simulaciones de flujo permanente.
2. VELOCITY PROFILES: Se ingresa un valor de 1 para todos los bordes, lo cual significa imponer un vector de velocidad normal al borde. Cuando se tiene un caudal de entrada también se puede utilizar el valor de 4 (también es normal al borde).
3. OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES: Se establece un valor de 1 el cual significa que los valores de caudal y/o altura ingresados no son sugerencias, sino que valores impositivos.

Esto da como resultado 1 archivo *Resultado.slf* que contiene las velocidades, profundidad del agua, superficie libre, número de Froude, número de Courant y flujo. Para visualizar los resultados se utiliza BlueKenue y QGIS, a través del módulo '*PostTelemac*'. Se utilizó un paso temporal variable en función del número de Courant.

## 4.5. Simulación de arrastre de sedimentos

### 4.5.1. Estimación del gasto sólido

En primer lugar, se llevó a cabo una estimación del gasto sólido utilizando la ecuación de Wilcock y Crowe descrito en el capítulo 2. En HEC-RAS se simuló cada caudal del hidrograma de crecidas como flujo uniforme para obtener parámetros como el radio hidráulico y ancho mojado para calcular el gasto sólido. De esta forma se estimó un volumen de sedimentos que podría ser transportado para cada crecida. Para ello se consideraron 3 secciones transversales: aguas abajo (altura Saladillo), aguas arriba (antes de la unión con el río Juncal), y una sección intermedia (altura planta de filtrado), tal como se muestra en la Figura 4.8.

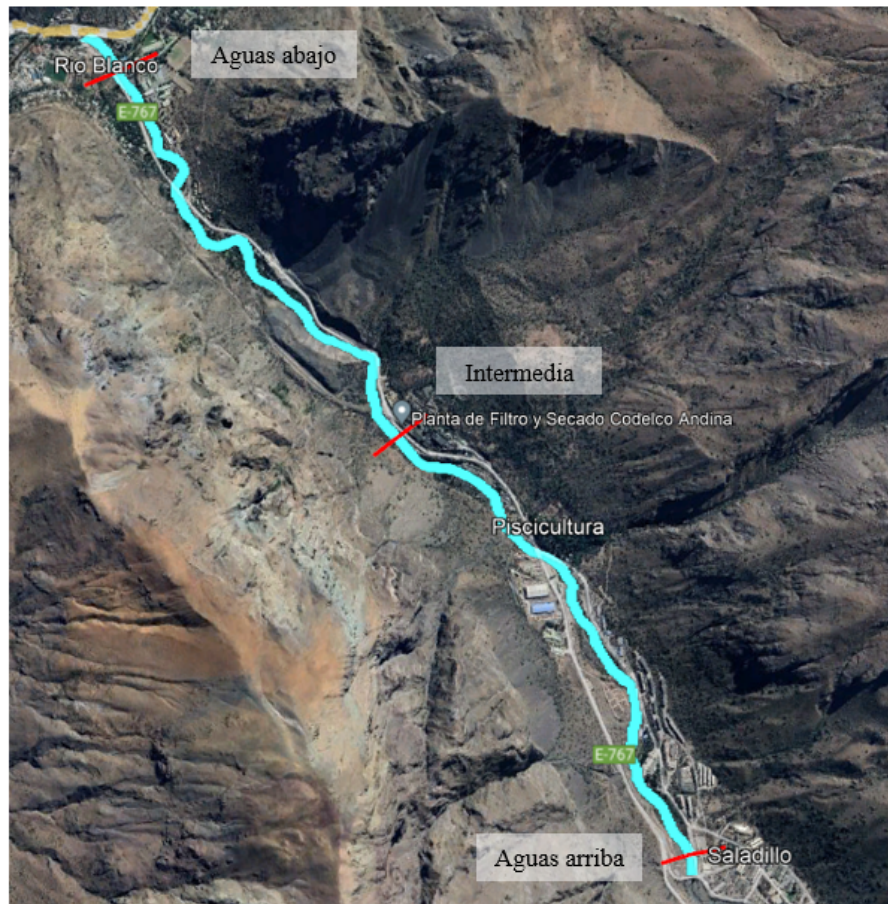


Figura 4.8: Ubicación de las secciones utilizadas para comparar los resultados. Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 4.9 y 4.10 muestran el gasto sólido total y volumen de sedimento estimados.

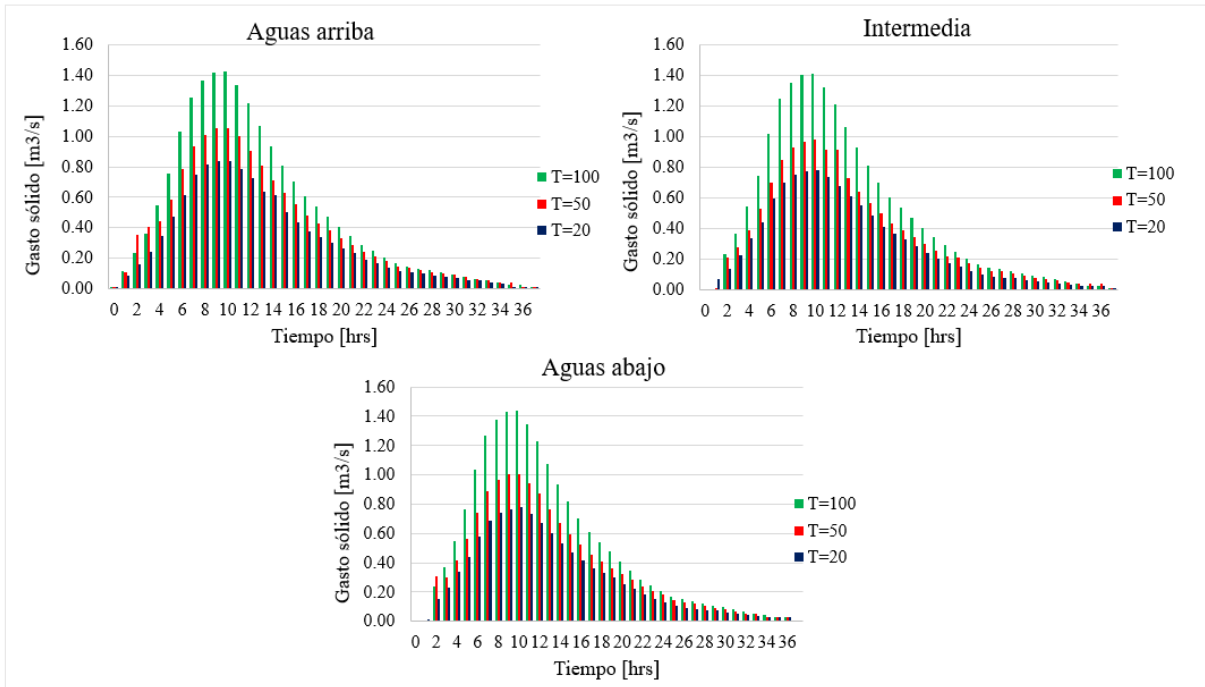


Figura 4.9: Gasto sólido en  $[m^3/s]$  para los periodos de retorno  $T=20$ , 50 y 100 años. Fuente: Elaboración propia, Excel.

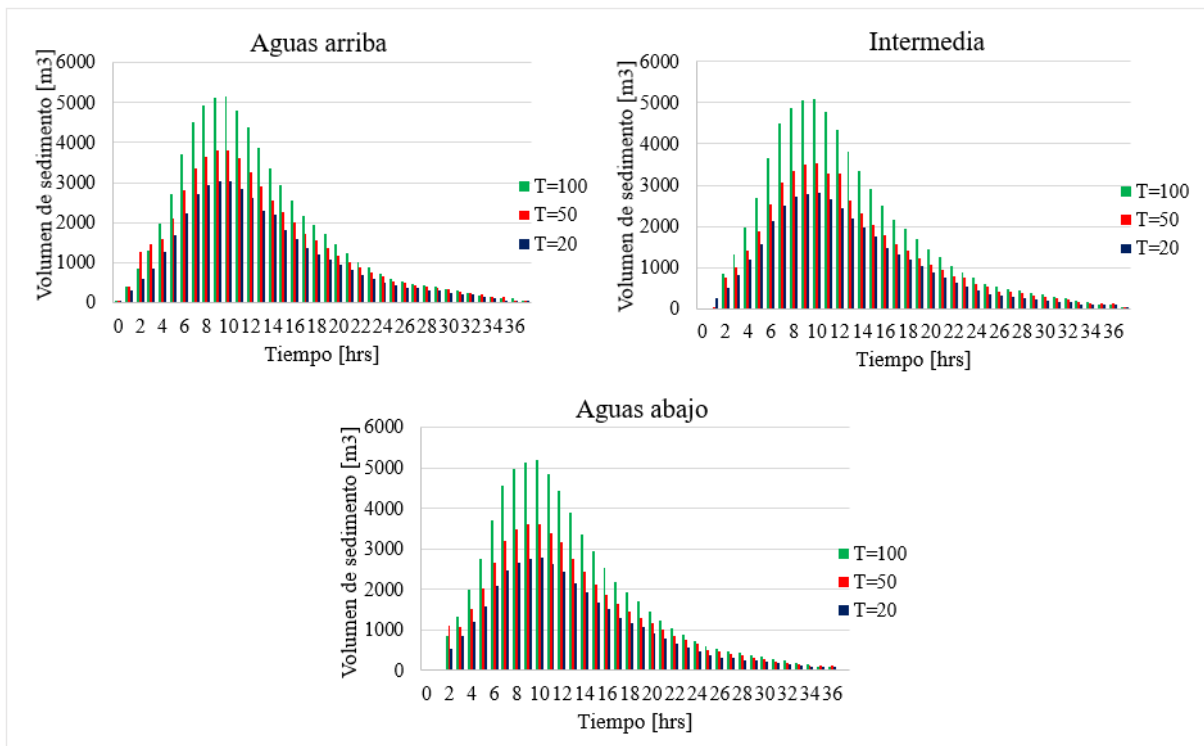


Figura 4.10: Volumen de sedimento en  $[m^3]$  para los periodos de retorno  $T=20$ , 50 y 100 años. Fuente: Elaboración propia, Excel.

Integrando en la duración total de la tormenta, el volumen de sedimento total para cada periodo de retorno es el que se resume en la Tabla 4.3 (sección intermedia).



Tabla 4.3: Volumen de sedimentos acumulado (V sed), volumen de agua (V agua), volumen de flujo (V sed + agua) y porcentaje de sedimentos (%sed) para cada periodo de retorno. Fuente: Elaboración propia.

T	V sed [m3]	V agua [m3]	V sed + agua [m3]	% sed
20	41.918,3	11.125.637,7	11.167.556,0	0,38
50	53.526,6	18.531.726,6	18.585.253,2	0,29
100	67.517,8	24.904.737,2	24.972.255,0	0,27

#### 4.5.2. HEC-RAS

La baja resolución topográfica generó muchas inestabilidades en el programa, por lo que la simulación de arrastre de sedimentos no pudo realizarse en 2D. Por ello, se decidió crear una nueva geometría en 1D, y estudiar lo que sucedía en este caso.

La Figura 4.11 muestra la línea de flujo (eje del río) y las secciones transversales.

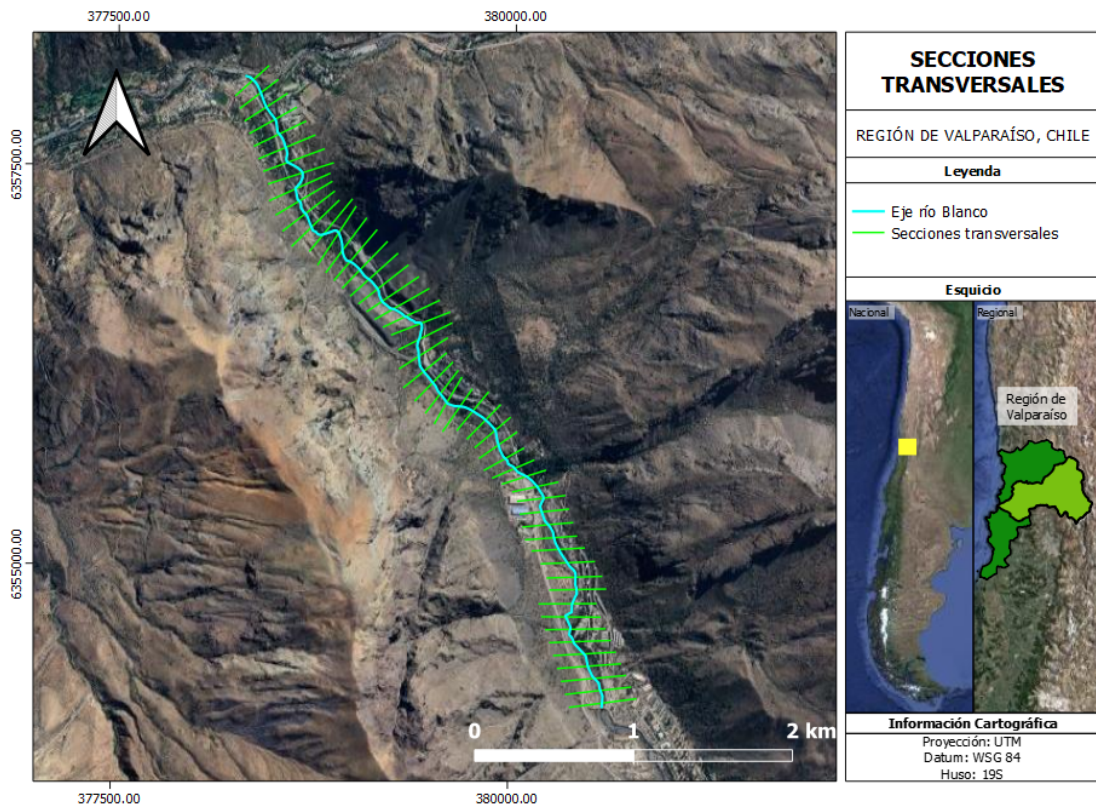


Figura 4.11: Secciones transversales, modelo de arrastre de sedimentos 1D. Fuente: Elaboración propia.

La simulación de crecidas se modeló como flujo impermanente. En este caso, se utilizó la opción de flujo cuasi permanente, lo que quiere decir que se modela el hidrograma de crecidas como pulsos de caudales constantes con una duración de 1 hora. Esta alternativa es la más utilizada para modelar sedimentos. Las condiciones de borde de flujo son las mismas que se definieron anteriormente. En cuanto a la condición de borde de sedimentos, se decidió trabajar con la carga de equilibrio aguas arriba, ya que no se cuenta con información sedimentométrica.



En el módulo *SEDIMENT DATA*, se definieron los parámetros:

- Transport Function: Wilcock y Crowe.
- Sorting Method: Active Layer (recomendado en el manual). El espesor de la capa activa es igual al  $D_{90}$ .
- Fall Velocity: Soulsby.

Además, se ingresa la curva granulométrica mostrada en la Figura 4.2 en la opción *Define/Edit Bed Gradation*. Esta curva se asocia a cada sección transversal del río.

En cuanto a la deposición y erosión del río, en HEC-RAS se tienen 4 opciones tal como se muestra en la Figura 4.12.

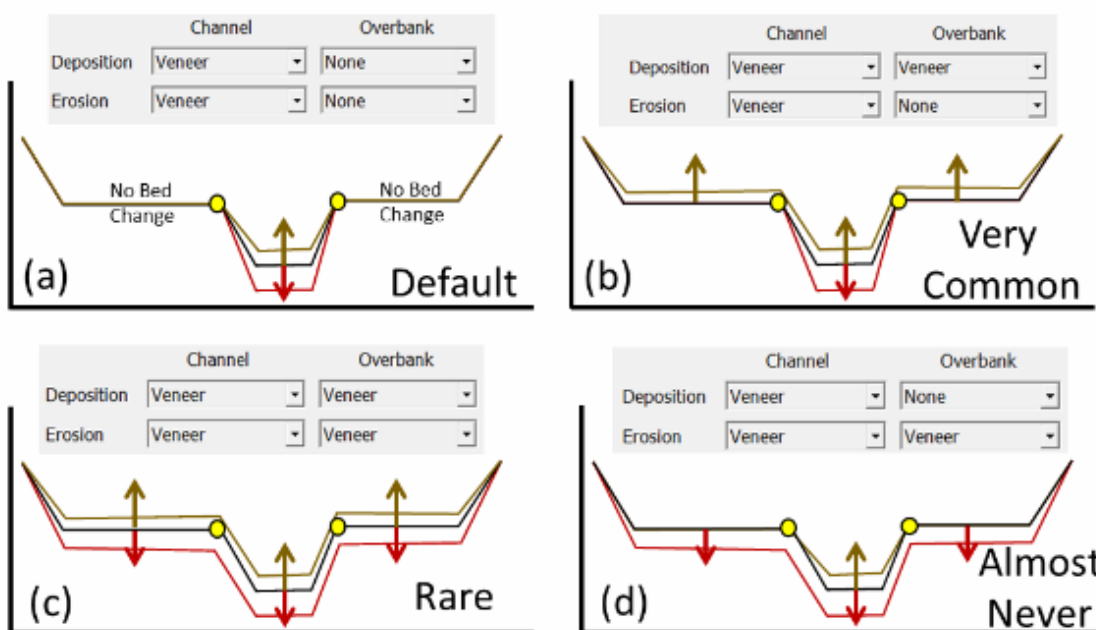


Figura 4.12: Opciones de cambio en el lecho global Fuente: CEIWR-HEC (s.f).

De la Figura 4.12 se escogió modelar por default según la configuración de la Figura 4.12a.

HEC-RAS divide el sedimento en distintas clases de grano. Como no se modeló directamente concentrado de cobre ni relave, se consideró el gasto sólido obtenido por clase. La Tabla 4.4 muestra las clases utilizadas por HEC-RAS.

Tabla 4.4: Clases de material predeterminadas en HEC-RAS junto con su diámetro mínimo, máximo y promedio [mm].

	Mín	Máx	Mean
Clay	0.002	0.004	0.003
VFM	0.004	0.008	0.006
FM	0.008	0.016	0.011
MM	0.016	0.032	0.023
CM	0.032	0.0625	0.045
VFS	0.0625	0.125	0.088
FS	0.125	0.25	0.177
MS	0.25	0.5	0.354
CS	0.5	1	0.707
VCS	1	2	1.41
VFG	2	4	2.83
FG	4	8	5.66
MG	8	16	11.3
CG	16	32	22.6
VCG	32	64	45.3
SC	64	128	90.5
LC	128	256	181
SB	256	512	362
MB	512	1024	724
LB	1024	2048	1448

Las clases CM, VFS y FS se utilizaron para comparar con los resultados de Telemac, representando el comportamiento de concentrado de cobre (CM y VFS) y relave (FM). Para la clase FS se modificó la densidad de 2650 [ $kg/m^3$ ] a 1500 [ $kg/m^3$ ], mientras que para CM y VFS se modificó a 3000 [ $kg/m^3$ ]. En estricto rigor debiese ser 4000 [ $kg/m^3$ ] pero no fue posible.

### 4.5.3. TELEMAC-2D

Para simular el arrastre de sedimentos en Telemac se utilizó Sisyphé. En este caso, es necesario acoplar el módulo de Sisyphé al archivo `.cas` de Telemac. En resumen se requiere de:

- Archivo "Telemac.cas": Contiene la información hidrodinámica del modelo, detallado en la sección anterior.
- Archivo "sisyphe.cas": Contiene la información morfodinámica. Se especifican los diámetros y densidades del lecho, relave y concentrado de cobre, la fórmula para el transporte de sedimentos (Wilcock y Crowe), el grosor de la capa activa ( $D_{90}$ ), la fórmula para el gasto sólido en suspensión, etc.

En esta modelación se utiliza el hotstart definido anteriormente en el modelo de crecidas como punto de partida. Se realizaron 4 modelaciones para cada periodo de retorno:

1. Considerando el diámetro característico del concentrado de cobre (0,04 [mm]), modelándolo como sedimento cohesivo. Si el diámetro de la partícula es inferior a 60 [ $\mu m$ ], Telemac lo considera como sedimento cohesivo y automáticamente calculará sólo gasto en suspensión.
2. Considerando el concentrado de cobre como sedimento no cohesivo. Se utilizó un diámetro de 0,07 [mm] y se desactivó el cálculo de gasto de fondo.
3. Considerando el diámetro característico del relave (0,2 [mm]). Se calcula gasto sólido en suspensión (ecuación de difusión) y arrastre (Wilcock y Crowe). Se ingresa además la densidad, y se impone la condición de borde de equilibrio aguas arriba para los sedimentos, al igual que en HEC-RAS.
4. Considerando la granulometría del lecho natural, con la finalidad de comparar el gasto sólido obtenido usando HEC-RAS y Wilcock y Crowe. Para esta modelación se consideró que la única superficie erosionable es el lecho.

Como se busca ver lo que sucede con el concentrado de cobre y relaves durante una crecida, se agregó una variable al archivo geométrico. Esta variable considera todo el lecho como superficie no erosionable. Se agregó un polígono ubicado aguas abajo del punto de descarga de concentrado de cobre con la finalidad de simular una acumulación de sedimentos (ver Figura 4.13). Se consideró que la entrada de flujo era de agua limpia, es decir, con una concentración inicial 0. El análisis para el relave se hizo de la misma forma.

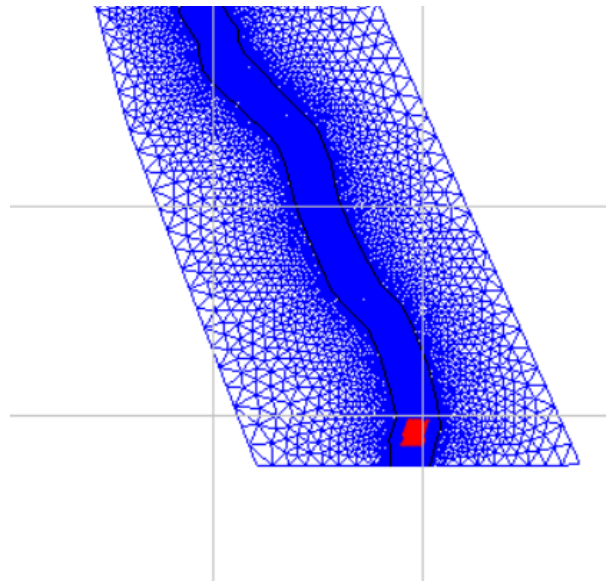


Figura 4.13: Depósito de concentrado de cobre (rojo) aguas abajo el punto de derrame. Fuente: Elaboración propia.

Las condiciones de borde son las mismas que se utilizaron en el modelo hidrodinámico. Es importante para una simulación de Sisyphé que se considere la entrada para la condición

gasto sólido sea impuesta o libre, y no se modele como un muro cerrado.

Finalmente se crearon tres nuevos modelos pero utilizando el caudal medio anual, con el propósito de visualizar el transporte de concentrado de cobre como sedimento cohesivo y no cohesivo, y relave para un flujo bajo. A partir de la información disponible, se estudian los caudales medios mensuales del año 2019, siendo éste el último año con la estadística completa. Con el caudal medio anual estimado se itera nuevamente para obtener el coeficiente Manning. En la Tabla 4.5 se resumen los nuevos parámetros:

Tabla 4.5: Caudal medio anual y coeficiente de Manning.

Caudal	0,77	[m <sup>3</sup> /s]
Manning	0,087	[-]

Además de los resultados que entrega el modelo hidrodinámico, para el modelo de sedimentos, Telemac entrega el gasto sólido total en  $[m^3/s/m]$ , el gasto en suspensión y de arrastre por clase y la evolución del lecho en el tiempo.

# Capítulo 5

## Resultados

### 5.1. Simulación de crecidas

Se trazó una sección transversal intermedia en la cual se comparó el volumen acumulado en el tiempo total de la simulación. A continuación se muestran los resultados obtenidos para HEC-RAS y Telemac, para cada periodo de retorno.

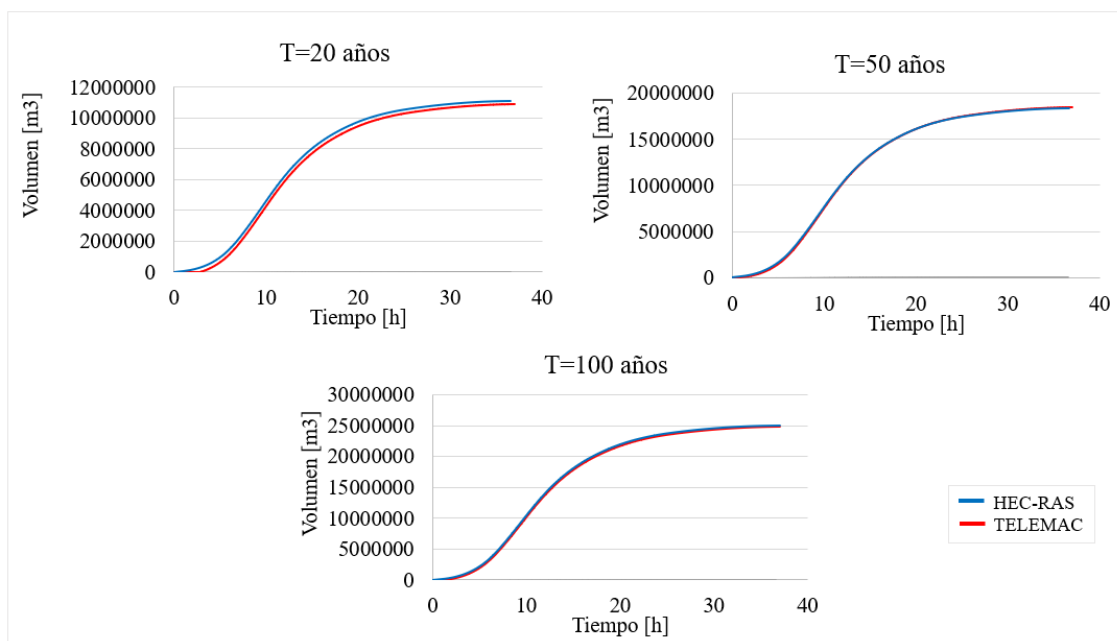


Figura 5.1: Volumen acumulado para los periodos de retorno  $T = 20, 50$  y  $100$  años. Fuente: Elaboración propia.

Las gráficas de la Figura 5.2 muestran las velocidades obtenidas en el tiempo para cada periodo de retorno.

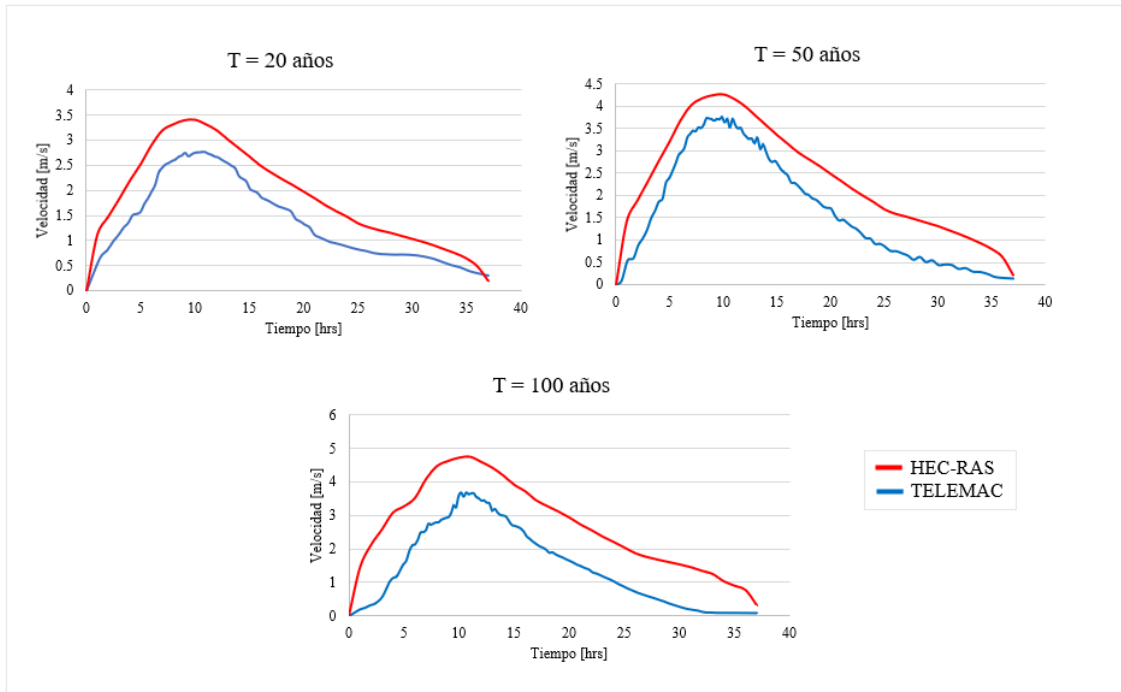


Figura 5.2: Velocidad en el perfil intermedio para los periodos de retorno  $T = 20, 50$  y  $100$  años. Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvieron las alturas de escurrimiento en el peak de la crecida para cada periodo de retorno. En HEC-RAS, las alturas de flujo se encontraron entre  $1,68$  a  $2,36$  [m], mientras que en Telemac, el rango fue entre  $2,05$  y  $3,13$  [m]. Como la geometría se mantiene uniforme y se modelan los mismos hidrogramas en cada software, al obtener velocidades distintas, también se tendrán variaciones en las alturas de escurrimiento.

## 5.2. Simulación de arrastre de sedimentos

A partir del cálculo de gasto sólido mostrado en el capítulo anterior, se compararon los resultados obtenidos con el modelo de HEC-RAS y de Telemac.

### 5.2.1. Lecho

En primer lugar se muestra la comparación del gasto sólido en  $[m^3/s]$  obtenido para el lecho utilizando HEC-RAS, Telemac y la estimación con Wilcock-Crowe.

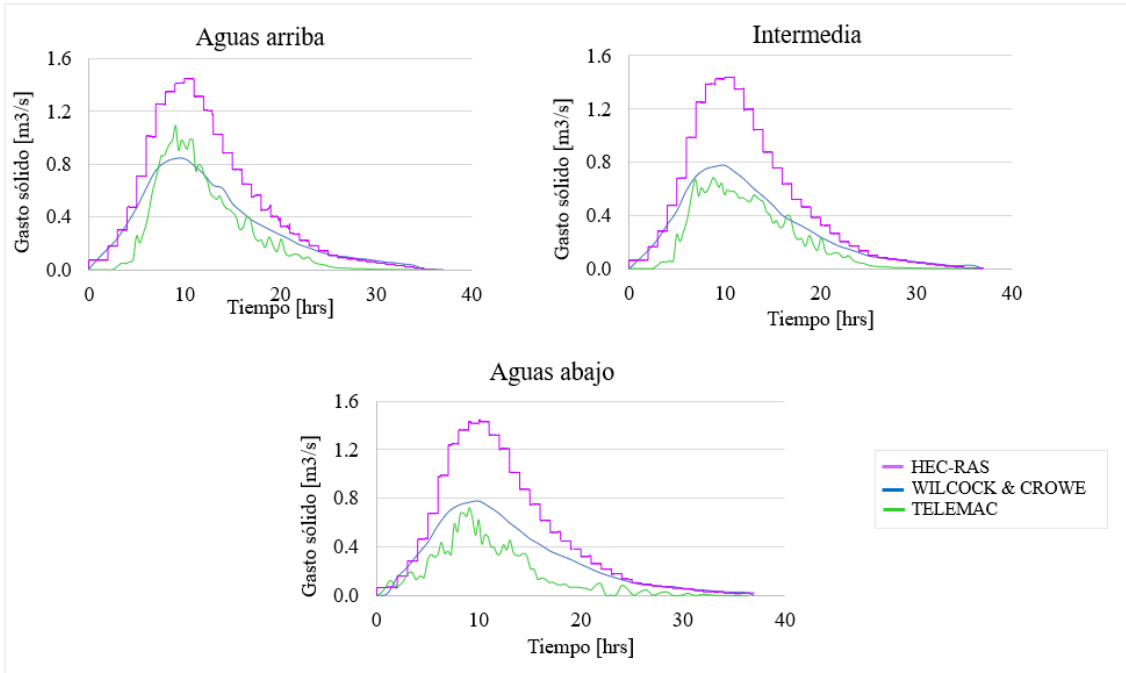


Figura 5.3: Gasto sólido del lecho [ $m^3/s$ ] obtenido para el periodo de retorno  $T=20$  años. Fuente: Elaboración propia.

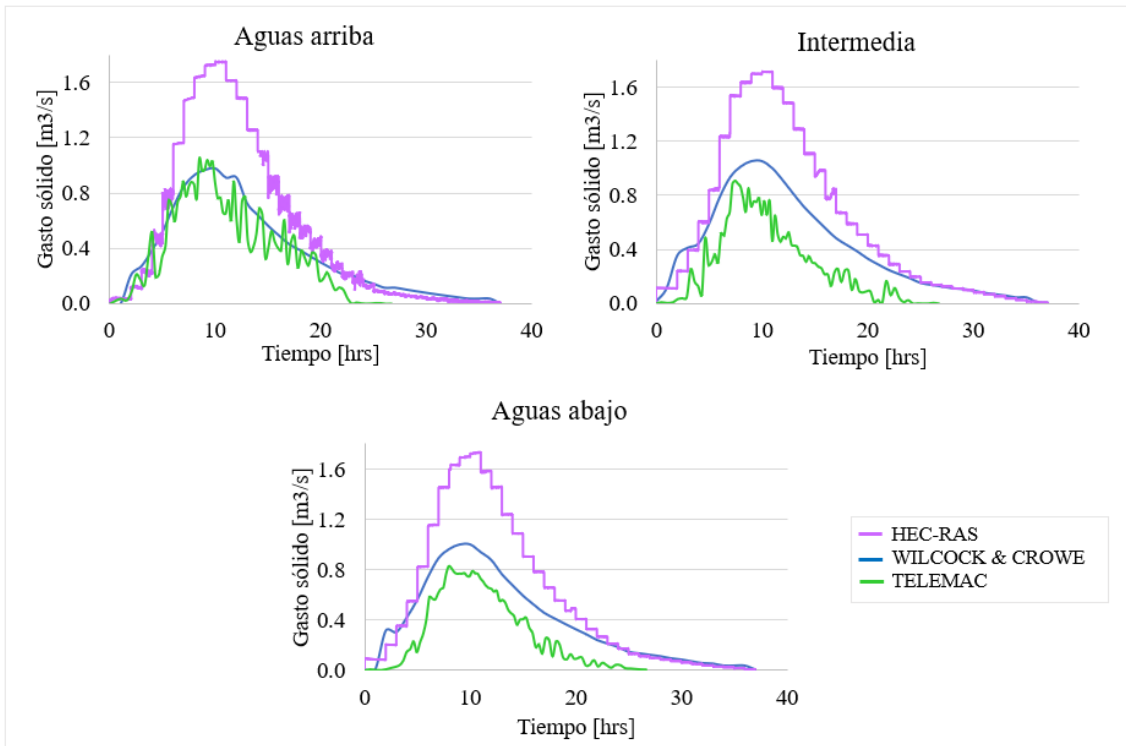


Figura 5.4: Gasto sólido del lecho [ $m^3/s$ ] obtenido para el periodo de retorno  $T=50$  años. Fuente: Elaboración propia.

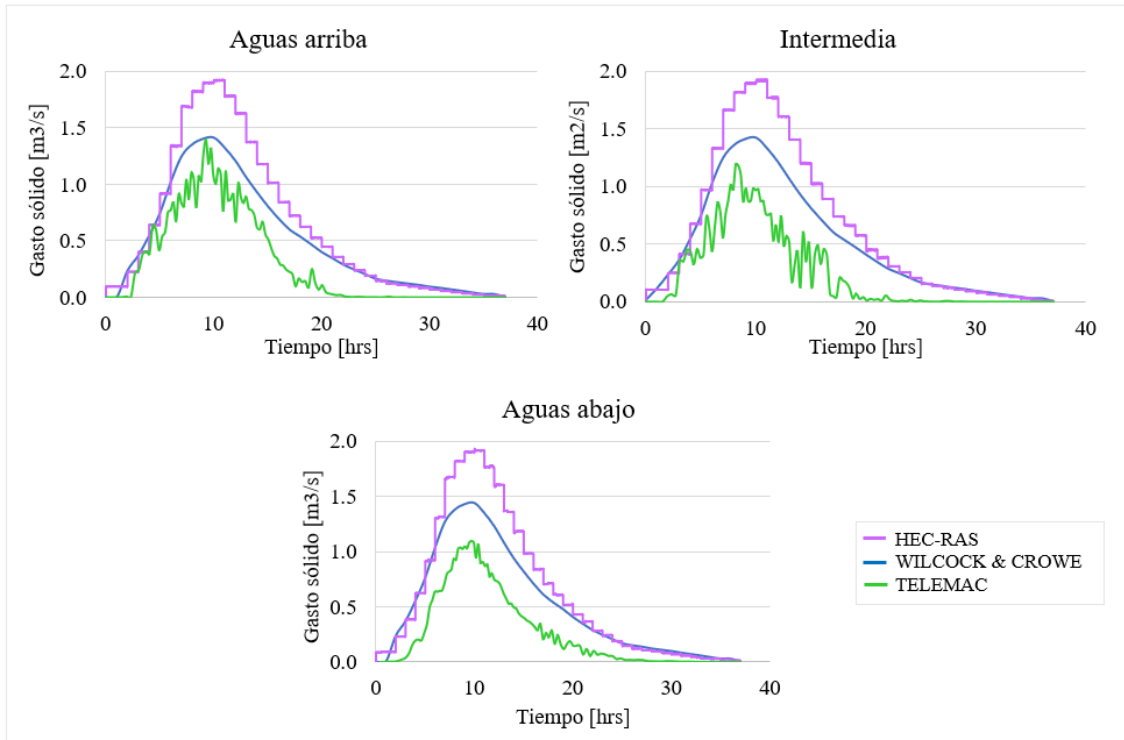


Figura 5.5: Gasto sólido del lecho [ $m^3/s$ ] obtenido para el periodo de retorno  $T=100$  años. Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.2. Concentrado de cobre, cohesivo

Las Figuras 5.6, 5.7 y 5.8 muestran los resultados obtenidos en HEC-RAS y Telemac para los periodos de retorno de 20, 50 y 100 años. En este caso se modeló en Telemac como sedimento cohesivo, mientras que en HEC-RAS se modeló como no cohesivo (clase CM).



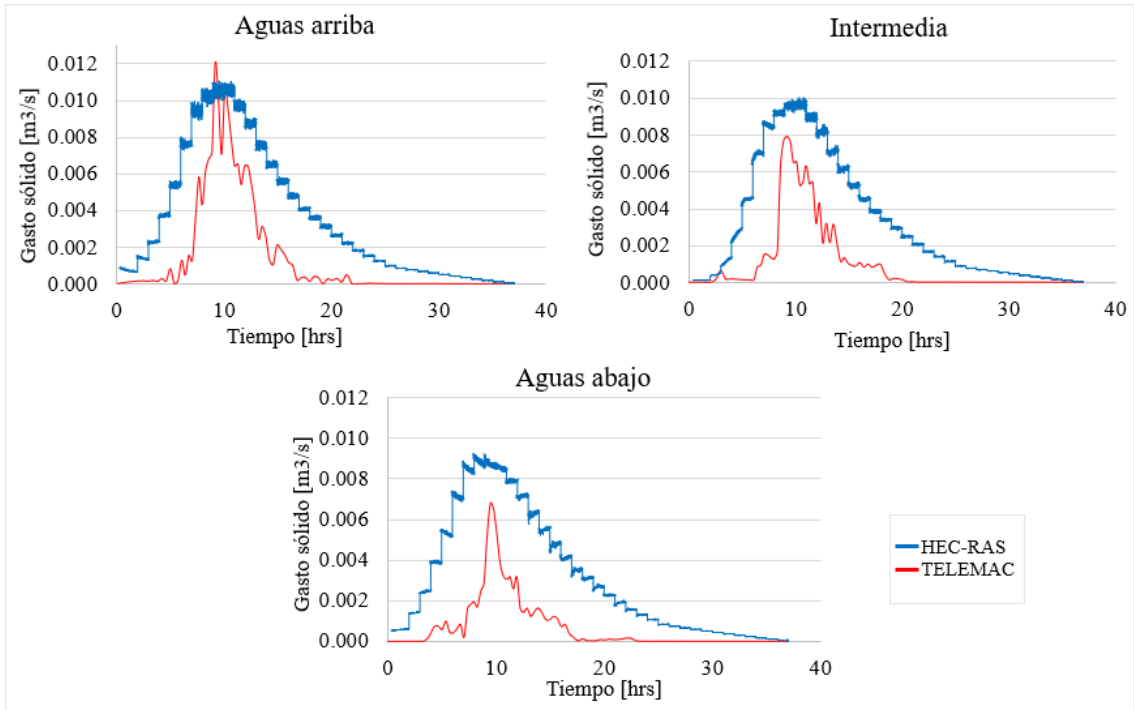


Figura 5.6: Gasto sólido de concentrado de cobre en  $[m^3/s]$  obtenido para el periodo de retorno  $T=20$  años. Fuente: Elaboración propia.

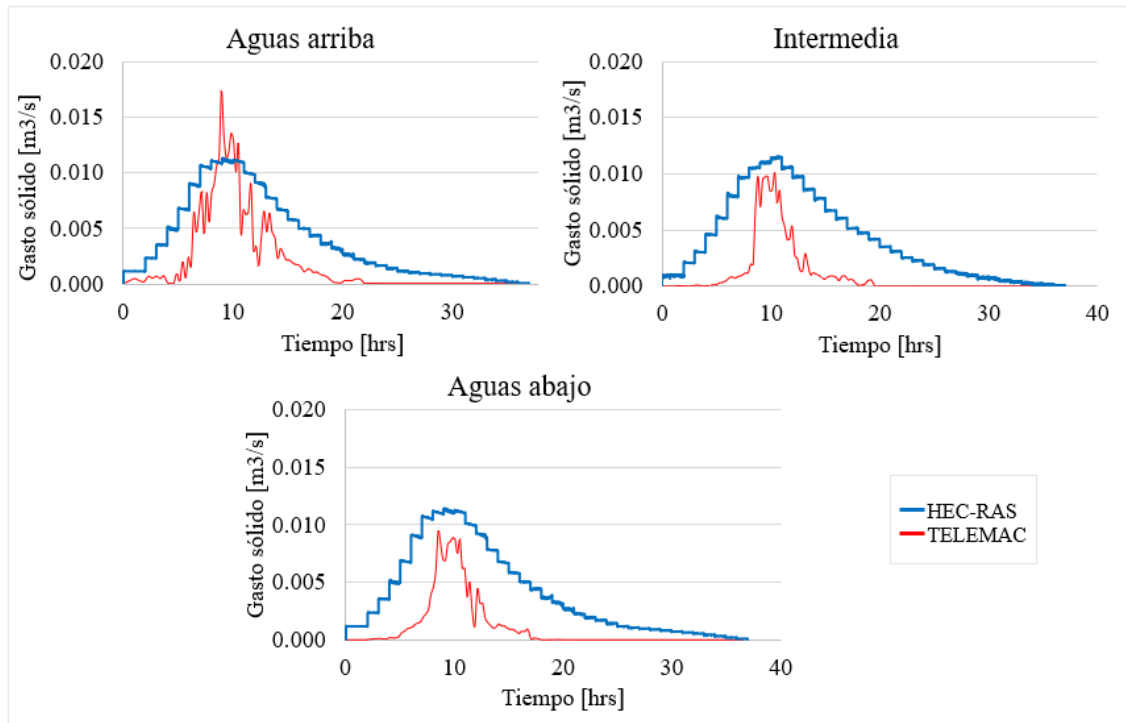


Figura 5.7: Gasto sólido de concentrado de cobre en  $[m^3/s]$  obtenido para el periodo de retorno  $T=50$  años. Fuente: Elaboración propia.

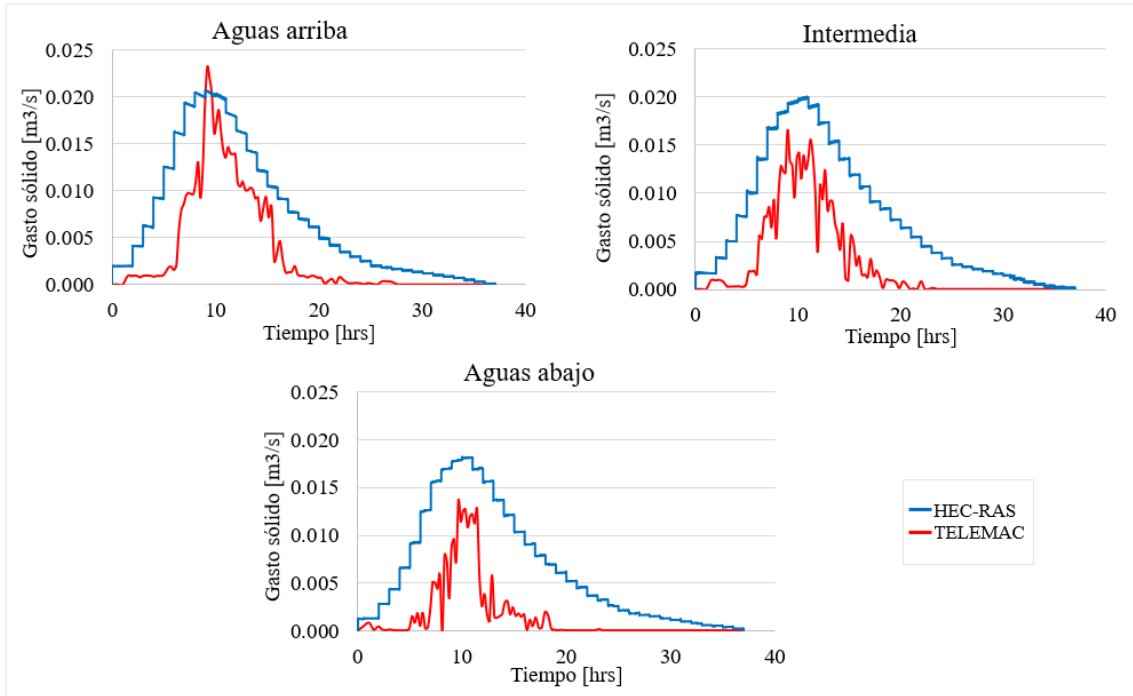


Figura 5.8: Gasto sólido de concentrado de cobre en  $[m^3/s]$  obtenido para el periodo de retorno  $T=100$  años. Fuente: Elaboración propia.

En el modelo se simuló una acumulación de sedimentos de  $600 m^3$ . Considerando el gasto sólido aguas abajo, es posible estimar la cantidad de material que se deposita. A medida que aumenta el caudal, se observa un incremento en la velocidad y la capacidad de transporte, factores que pueden reducir la deposición. En este escenario específico, se depositan  $425,9 m^3$  para  $T=20$  años y  $342,5 m^3$  para  $T=100$  años, conforme a la lógica previamente explicada.

La evolución del lecho obtenida con Telemac se representa mediante la deposición de material en  $[m]$ . La Figura 5.9 muestra lo anterior en el tramo aguas abajo para el periodo de retorno de 20 años.

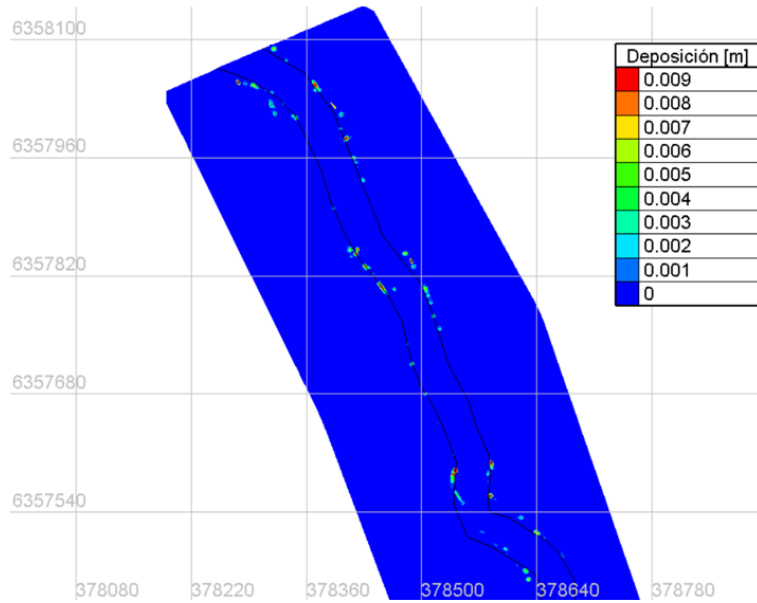


Figura 5.9: Evolución del lecho en  $[m]$  aguas abajo, deposición de concentrado de cobre, cohesivo. Fuente: Elaboración propia.

Para los periodos de retorno de 50 y 100 años se observa un efecto similar, es decir, se produce la acumulación de material en las riberas.

### 5.2.3. Concentrado de cobre, no cohesivo

Las Figuras 5.10, 5.11 y 5.12 muestran los resultados obtenidos en HEC-RAS y Telemac para los periodos de retorno de 20, 50 y 100 años. Tanto en Telemac como HEC-RAS se modeló como sedimento no cohesivo, con una densidad de  $3.000 [kg/m^3]$ . La clase seleccionada en HEC-RAS es la de VFS.

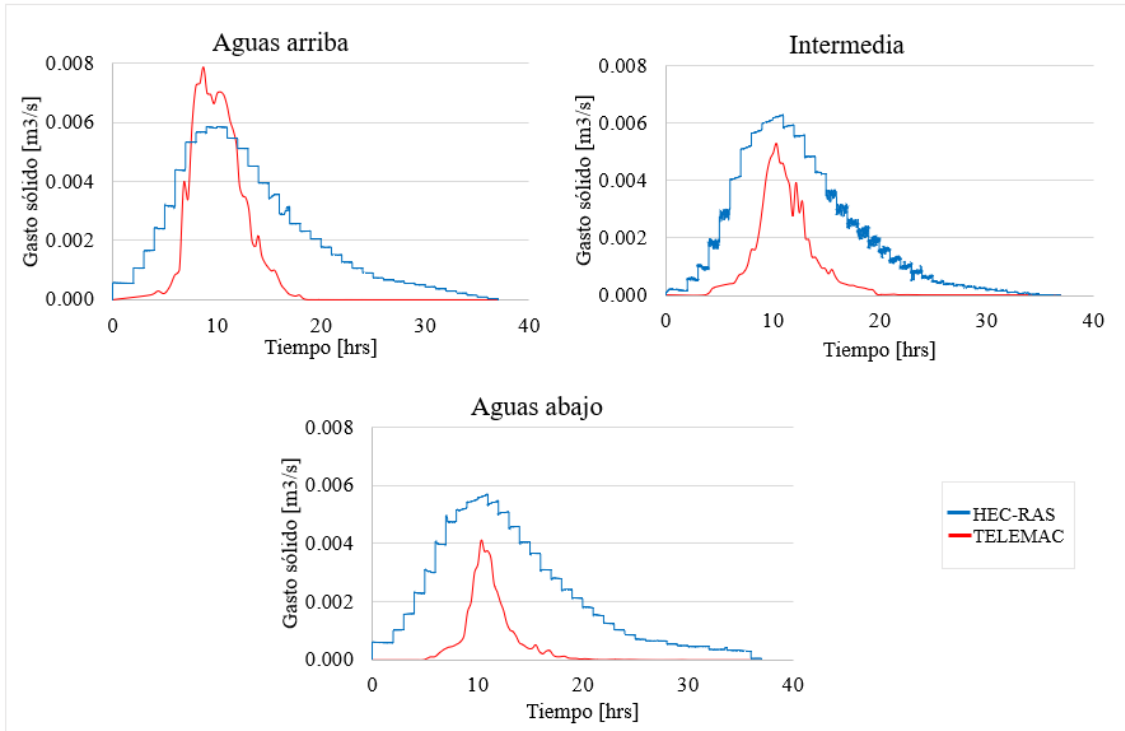


Figura 5.10: Gasto sólido de concentrado de cobre en  $[m^3/s]$  obtenido para el periodo de retorno  $T=20$  años, no cohesivo. Fuente: Elaboración propia.

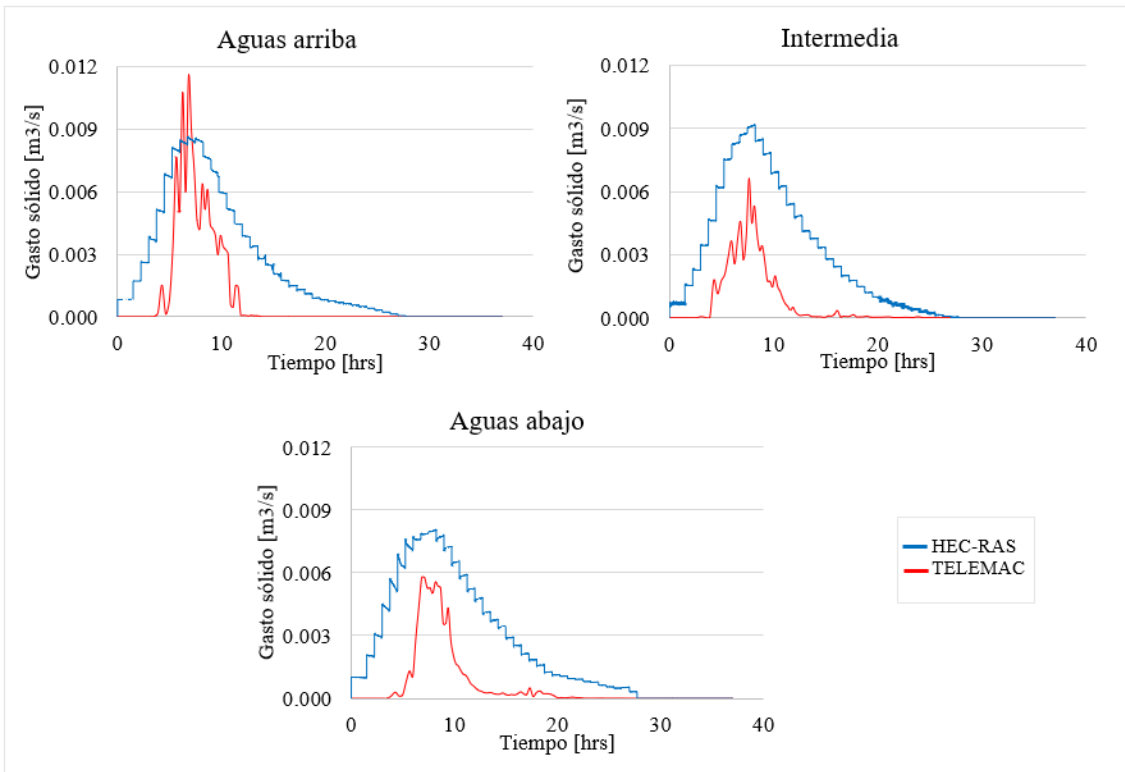


Figura 5.11: Gasto sólido de concentrado de cobre en  $[m^3/s]$  obtenido para el periodo de retorno  $T=50$  años, no cohesivo. Fuente: Elaboración propia.

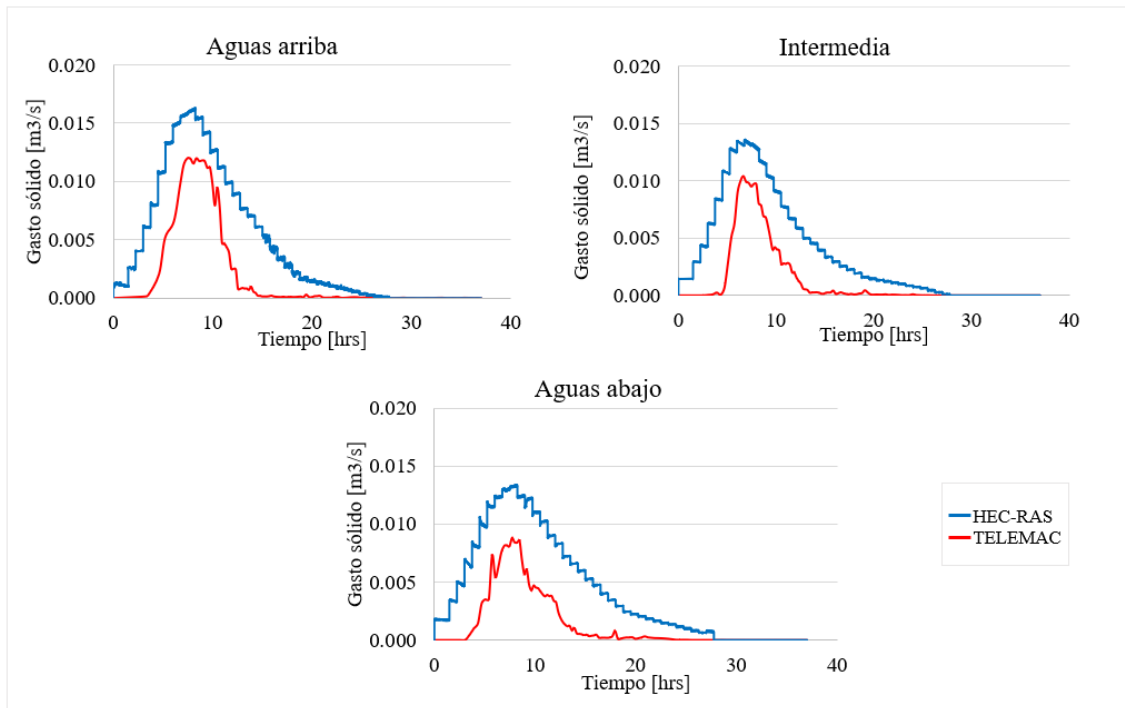


Figura 5.12: Gasto sólido de concentrado de cobre en  $[m^3/s]$  obtenido para el periodo de retorno  $T=100$  años, no cohesivo. Fuente: Elaboración propia.

Para este caso, la deposición de concentrado de cobre como sedimento no cohesivo disminuye de  $476,5 m^3$  ( $T=20$ ) a  $355 m^3$  ( $T=100$ ). La Figura 5.13 presenta la evolución en el tramo final del río.

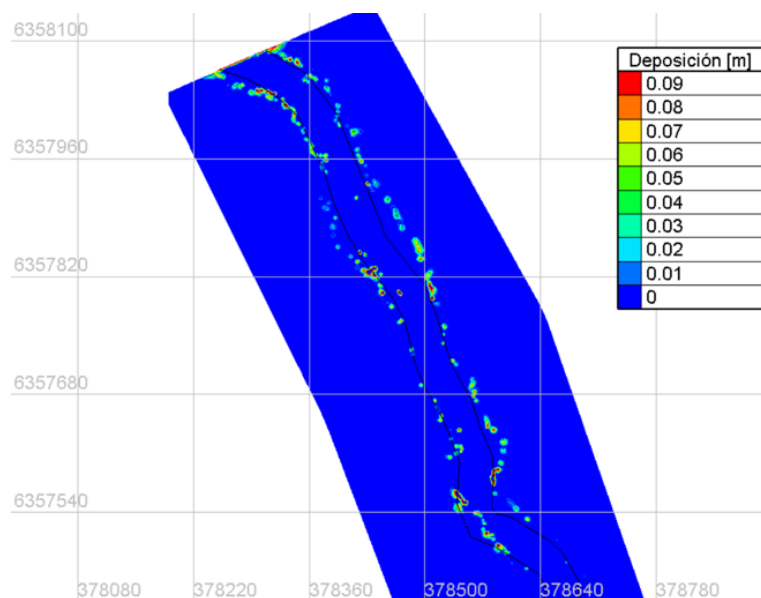


Figura 5.13: Evolución del lecho en  $[m]$  aguas abajo, deposición de concentrado de cobre, no cohesivo. Fuente: Elaboración propia.

Del análisis unidimensional en HEC-RAS, es posible observar los perfiles donde se depositaba material y donde se erosionaba el lecho. Considerando que la densidad del concentrado

de cobre es alta, sólo una crecida que logre socavar el lecho podría provocar una resuspensión del material para transportarlo aguas abajo. Para los tres periodos de retorno estudiados, se obtiene que la mayor erosión ocurre a los 3500 [m], aproximadamente, y se da en el intervalo temporal que corresponde a las 5-10 horas de iniciada la crecida, es decir el peak.

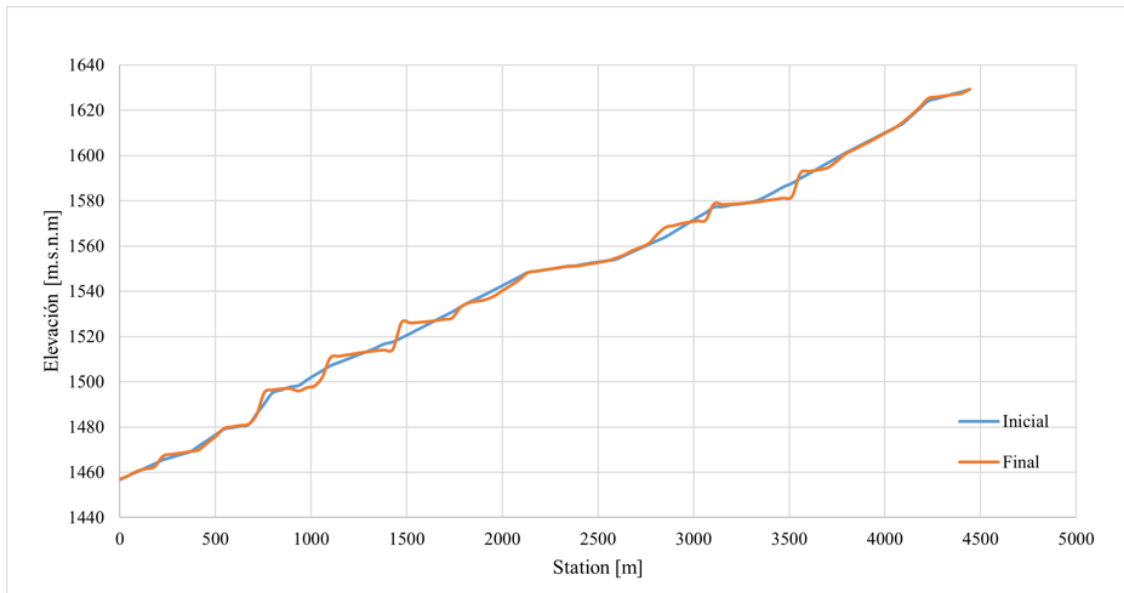


Figura 5.14: Evolución del lecho en HEC-RAS. Fuente: Elaboración propia.

Como en Telemac se simuló con una superficie no erosionable, no es posible realizar el análisis anterior.

#### 5.2.4. Relave

En las Figuras 5.15, 5.16 y 5.17 se muestra la comparación del gasto sólido obtenido para relave en Telemac y HEC-RAS.

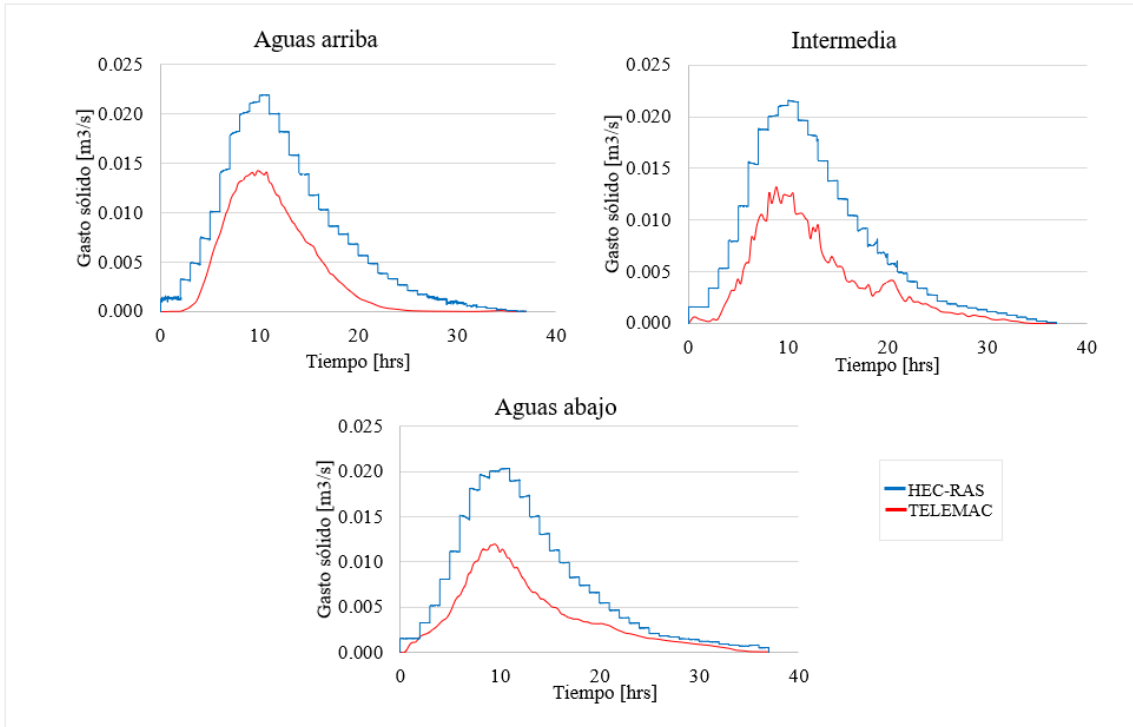


Figura 5.15: Gasto sólido de relave en  $[m^3/s]$  obtenido para el periodo de retorno  $T=20$  años. Fuente: Elaboración propia.

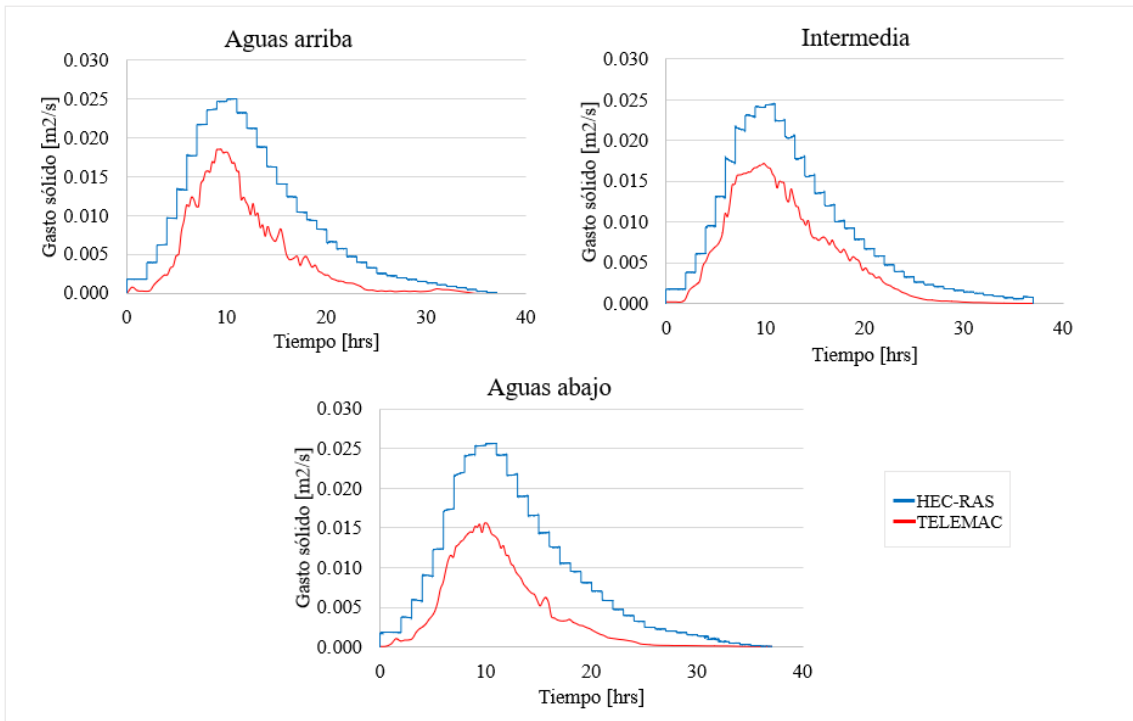


Figura 5.16: Gasto sólido de relave en  $[m^2/s]$  obtenido para el periodo de retorno  $T=50$  años. Fuente: Elaboración propia.

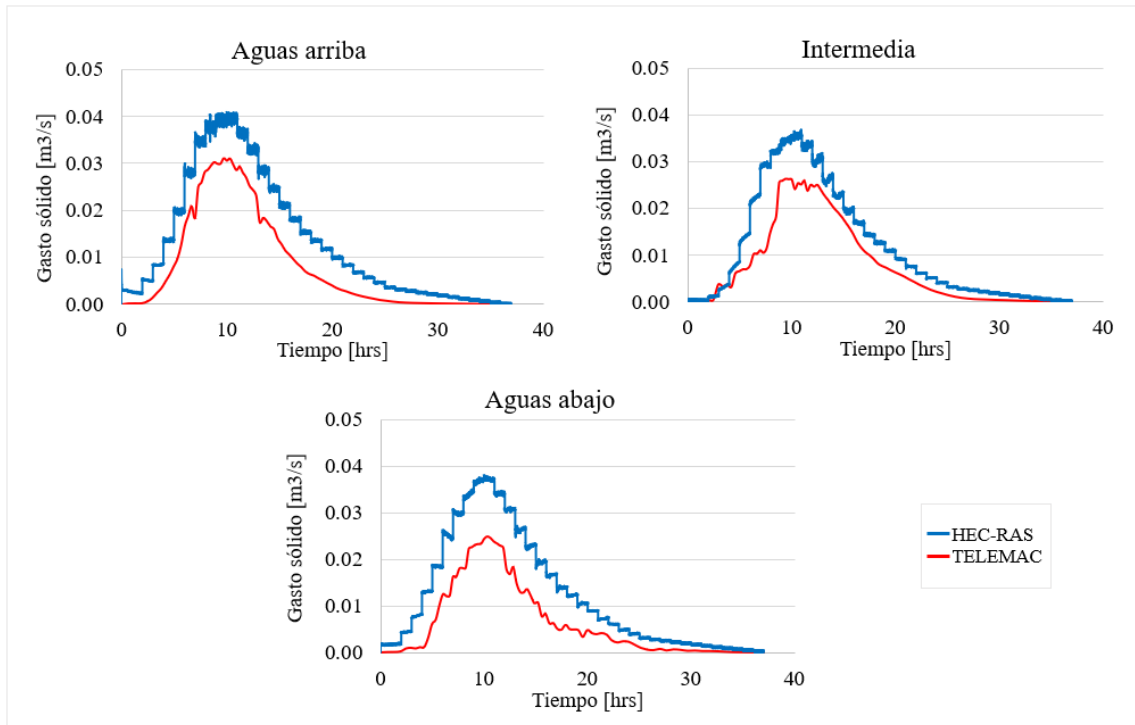


Figura 5.17: Gasto sólido de relave en  $[m^3/s]$  obtenido para el periodo de retorno  $T=100$  años. Fuente: Elaboración propia.

La deposición de relave sigue la misma dinámica que antes. Para  $T=20$  se tiene que se depositan  $295,9 m^3$ , y al aumentar el caudal, para  $T=100$  sedimentan  $155,4 m^3$ . En la Figura 5.18 se presenta la evolución del lecho.

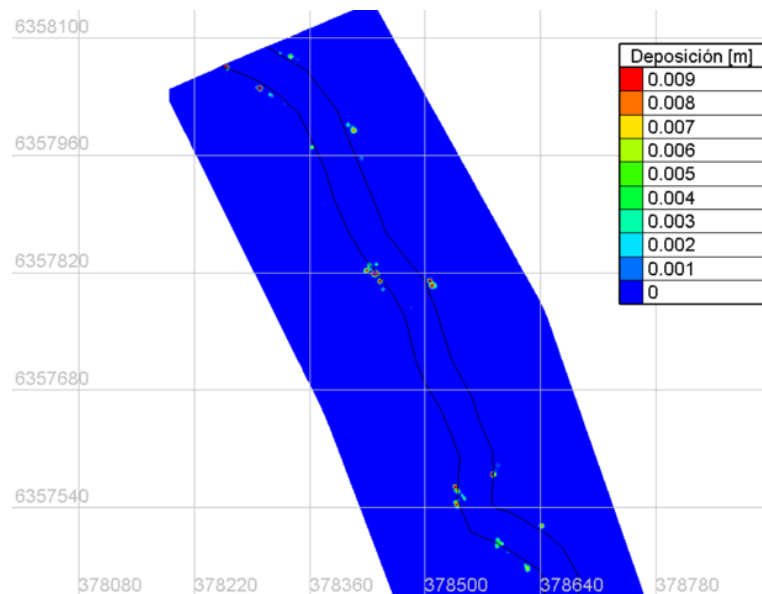


Figura 5.18: Evolución del lecho en  $[m]$  aguas abajo, deposición de relave. Fuente: Elaboración propia.



### 5.2.5. Caudal medio anual

Este caso fue modelado sólo en Telemac. El gasto sólido asociado a un caudal medio anual se muestra en las Figuras 5.19 y 5.20 para el concentrado de cobre y relave, respectivamente. Las Figuras 5.21, 5.22 y 5.23 indican que una parte del material es transportado aguas abajo y depositado en el lecho a 200 [m] aproximadamente. No existe deposición luego de ese tramo.

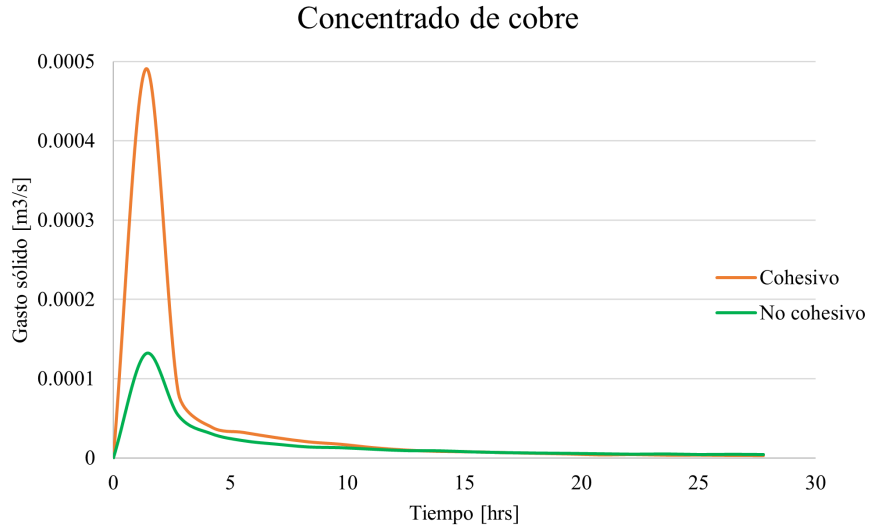


Figura 5.19: Gasto sólido de concentrado de cobre con caudal medio anual, aguas arriba. Fuente: Elaboración propia.

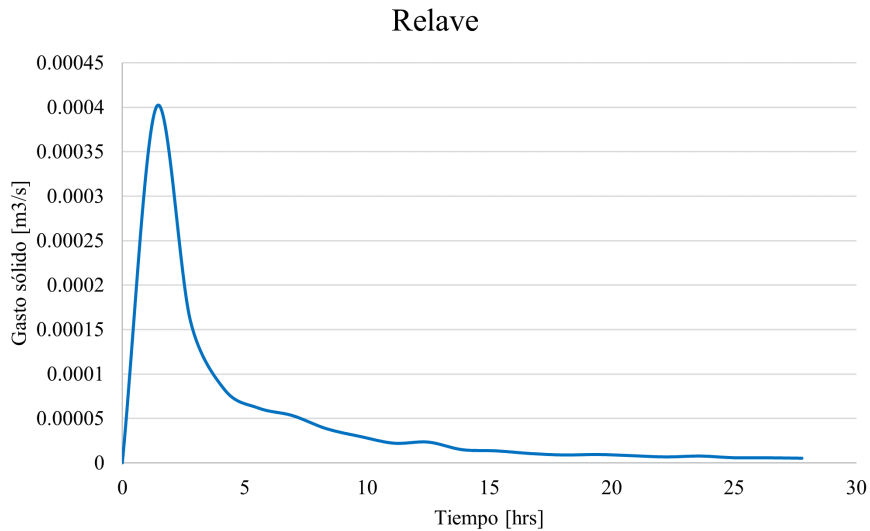


Figura 5.20: Gasto sólido de relave con caudal medio anual, aguas arriba. Fuente: Elaboración propia.

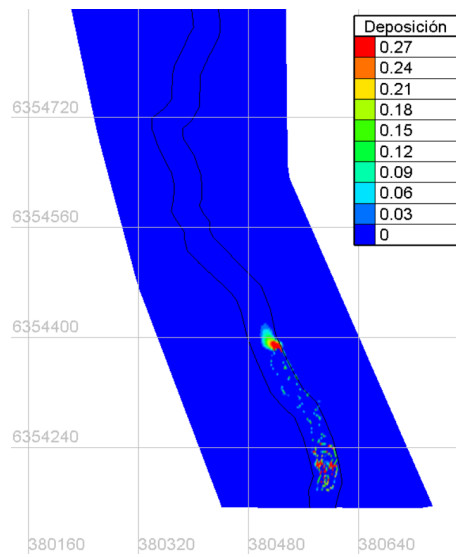


Figura 5.21: Evolución del lecho para la modelación de concentrado de cobre como sedimento cohesivo, con caudal medio anual. Fuente: Elaboración propia.

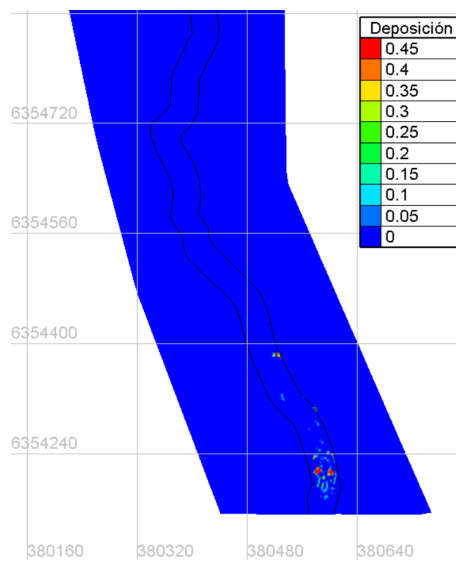


Figura 5.22: Evolución del lecho para la modelación de concentrado de cobre como sedimento no cohesivo, con caudal medio anual. Fuente: Elaboración propia.

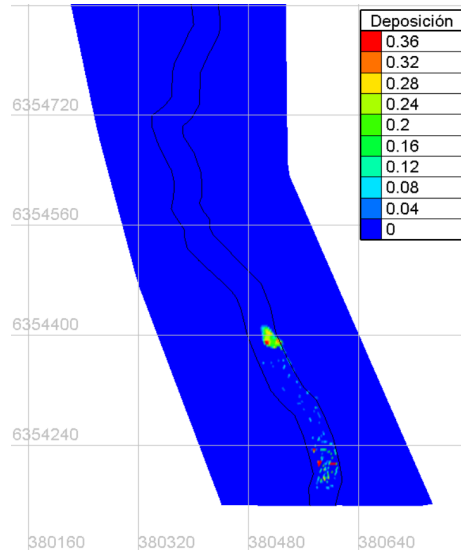


Figura 5.23: Evolución del lecho para la modelación de relave, con caudal medio anual. Fuente: Elaboración propia.

# Capítulo 6

## Discusión

En el capítulo anterior se presentaron los resultados obtenidos de las modelaciones. En relación al modelo hidrodinámico de crecidas, tanto HEC-RAS como Telemac entregaron valores congruentes en términos de volumen. En cuanto a las velocidades, las gráficas de la Figura 5.2 muestra que se tienen variaciones importantes, y estas a su vez, se reflejan en las diferentes alturas de escurrimiento obtenidas en cada software. Es importante recalcar que tener un buen modelo de crecidas era la base para evaluar el arrastre de sedimentos.

Para el transporte de sedimentos, se creó un modelo unidimensional en HEC-RAS y uno bidimensional en Telemac. La elección entre un modelo 1D y uno 2D en el transporte de sedimentos en ríos y cuencas fluviales tiene un impacto significativo en la capacidad de representar con precisión los procesos sedimentarios y su influencia en el sistema. Los modelos 1D tratan los flujos en una dirección única a lo largo del canal, simplificando la representación de las características hidráulicas en comparación con modelos 2D (Ríos, 2023). Estos últimos permiten una representación más precisa de los procesos transporte y sedimentación, ya que capturan la interacción bidimensional entre los sedimentos y el flujo.

Según los resultados considerando la granulometría natural del lecho, HEC-RAS es el modelo en el cual se genera mayor transporte de sedimentos, mientras que el gasto obtenido con Telemac se mantiene cercano a lo calculado según Wilcock y Crowe. La sobreestimación del gasto sólido en el modelo de HEC-RAS se refleja en las discrepancias en las magnitudes de velocidades en comparación con Telemac. Al revisar la evolución del lecho (Figura 5.14) según el modelo de HEC-RAS, se observaron deposiciones y erosiones grandes (alrededor de 5 [m]) que no son representativas de lo que ocurre en la realidad. Lo anterior se explica por la condición de borde utilizada aguas arriba para los sedimentos (equilibrium load) (U.S. Army Corps of Engineers, 2023). HEC-RAS permite establecer otras condiciones de borde pero son difíciles de usar ya que se requiere información específica medida en terreno. Aunque esta condición evita el procesamiento intensivo de datos para obtener una curva de descarga o serie temporal, por lo general es insuficiente ya que el modelo genera deposiciones o erosiones grandes, alejándose del equilibrio. Se presume que esta es la causa de la sobre estimación del gasto sólido por parte de HEC-RAS y debe ser verificado con un análisis de sensibilidad.

De las gráficas 5.6, 5.7 y 5.8 se muestra que en el modelo de HEC-RAS el gasto sólido del concentrado de cobre sigue el comportamiento del hidrograma de crecidas. En el caso de Telemac, el comportamiento es similar, donde el sedimento se modeló como cohesivo. Por

falta de información, el programa le asignó propiedades correspondientes a arcillas o limos, cuyos pesos específicos son del orden de 900 y 1200  $[kg/m^3]$  (Pérez, s.f.) y tienen velocidades de sedimentación bajas. Debido a aquello, el material puede mantenerse en suspensión por periodos prolongados.

En el caso del modelo que considera el cobre como sedimento no cohesivo, el gasto obtenido es menor que al considerarlo como cohesivo, ya que tanto en HEC-RAS como Telemac se asignó un peso específico de 3.000  $[kg/m^3]$ . En este último el sedimento se moviliza al aumentar el caudal de la crecida, y va disminuyendo aguas abajo porque se va depositando. Esto se debe a que, a mayores caudales, el flujo adquiere la energía suficiente para transportar las partículas de sedimento a lo largo del río. Sin embargo, a medida que el flujo disminuye su velocidad aguas abajo, la capacidad de transporte del sedimento también disminuye, lo que lleva a la deposición de material en el lecho del río. Este proceso de transporte y deposición del sedimento es fundamental en la evolución morfológica de los ríos y puede influir en la formación de bancos de sedimentos, la erosión del lecho y la configuración geométrica del canal a lo largo del tiempo.

Tanto HEC-RAS como Telemac muestran comportamientos similares en cuanto al modelo de relave (ver las Figuras 5.15, 5.16 y 5.17). De las gráficas resultantes se muestra que el gasto sólido calculado por Telemac se mantiene por debajo de los valores estimados por HEC-RAS y alcanzan su peak durante la crecida.

Los resultados de las Figura 5.9, 5.13 y 5.18 indican que existe deposición de material en las riberas del río, tanto de concentrado como de relave. Lo anterior se corresponde con registros fotográficos que muestran concentrado de cobre depositado al costado del cauce luego de ocurrido un derrame (ver Figura 1.2). El mayor volumen depositado se tuvo para el concentrado de cobre como sedimento no cohesivo. El gasto sólido obtenido fue menor comparado con los casos del concentrado de cobre como sedimento cohesivo y el relave, lo que se traduce en una menor capacidad de transporte, favoreciendo la deposición. Sumado a lo anterior, un estudio realizado en terreno sobre el peligro de remoción de relaves en los ríos Illapel y Aucó asociado a crecidas, indicó la presencia de relaves en las riberas de los cauces (Torres, 2022). En todos los escenarios evaluados se estaría depositando material en el río Aconcagua. Lo anterior se relaciona directamente con el perfil de velocidades del río. Debido a la mayor fricción en las paredes y la existencia de una superficie libre, las máximas velocidades se tienen en o por debajo de la superficie libre en el centro del río, y disminuyen hacia las orillas (Chow, 1994). La Figura 6.1 muestra la distribución de velocidades para distintas secciones, siendo la trapezoidal la utilizada en este trabajo. El material transportado se acumula en regiones de menor velocidad, como las riberas, y al mismo tiempo, el flujo puede erosionar otras áreas, lo que conlleva a cambios en la forma del canal. En Telemac, dado que se utilizó una superficie no erosionable, solo es factible analizar los depósitos al concluir la simulación.

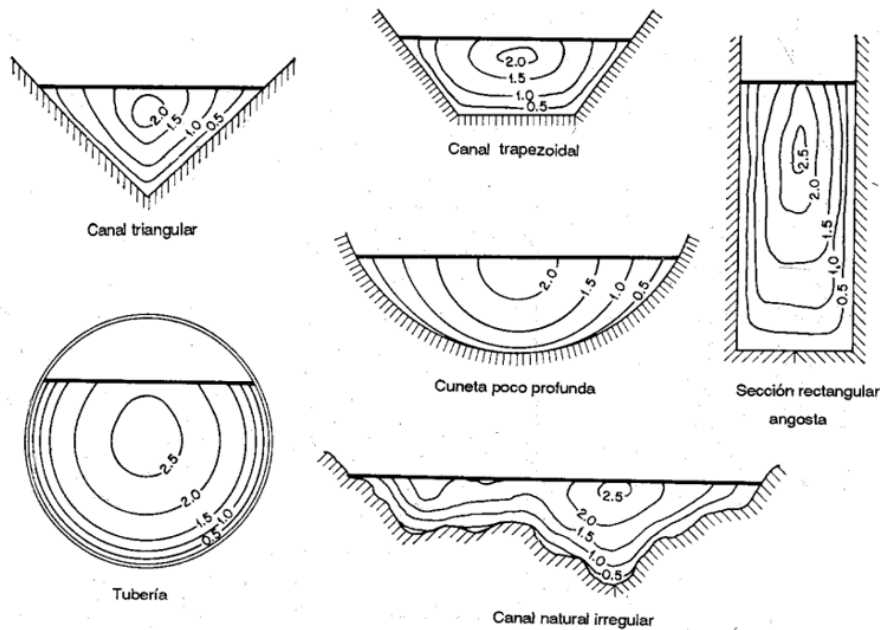


Figura 6.1: Curvas comunes de igual velocidad en diferentes secciones de canal. Fuente: Chow, (1994).

Con el modelo de HEC-RAS se estableció un intervalo de caudales para los cuales se generaba la mayor erosión del lecho. Se escogió la sección transversal que más se socavó (alrededor de los 3500 [m] medido desde aguas abajo) y se observó el intervalo temporal en el cual se producía. Finalmente se obtuvo que para el umbral de caudales de  $25 [m^3/s]$  en adelante se comienza a socavar el lecho. Para el evento reciente de inundaciones en Chile (julio 2023) se pidieron los datos medidos de caudal en la DGA para la estación fluviométrica Río Blanco en Río Blanco. La crecida tuvo un peak a los  $75,5 [m^3/s]$ , por lo que en base a los resultados mostrados, sería suficiente para empezar a socavar el lecho y movilizar el concentrado de cobre aguas abajo. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, las socavaciones obtenidas (4-5 metros, ver Figura 5.14) no son una buena representación de la realidad por lo que no es posible suponer lo anterior. Se requiere una topografía de detalle, muestras medidas en terrenos (para una condición de borde de sedimentos que represente lo que sucede), y un modelo bidimensional como base. Además de ello se debe calibrar el modelo según lo observado.

Para todas las gráficas obtenidas, se muestra que el gasto sólido va disminuyendo aguas abajo producto de la deposición de material, y aumenta en cada periodo de retorno, ya que un aumento del caudal induce un mayor transporte de sedimentos.

En relación al modelo de concentrado y relave para un caudal medio anual de  $0,77 [m^3/s]$ , se obtuvo que parte del material acumulado al inicio se transporta aguas abajo y deposita a los 200 [m] aproximadamente, alcanzando una condición de equilibrio. En este caso, no existiría afectación del lecho del río Aconcagua. En la Figura 5.19 se muestra que el gasto sólido para el concentrado de cobre como sedimento cohesivo es mayor al obtenido con el modelo de cobre como sedimento no cohesivo. Aquí influye directamente la densidad del material.

Por los largos periodos de modelación que requería Telemac no fue posible modificar parámetros como el coeficiente de rugosidad, granulometría o la función de transporte para

llevar a cabo un análisis de sensibilidad. En el caso de HEC-RAS, se observó que al variar el coeficiente de Manning se generaban alteraciones importantes en la capacidad de transporte de volumen de sedimentos. Otros factores como la granulometría y función de transporte pueden alterar los resultados en distintos órdenes de magnitud. A partir de información disponible y estudios similares, se determinó que la variable más sensible en ambos modelos corresponde al coeficiente de rugosidad de Manning (Tellez, 2015). Cabe destacar que este y otros parámetros utilizados en las simulaciones debiesen ser calibrados según observaciones en terreno para poder validarlos y utilizarlos como referencia.

Es importante mencionar el efecto de la topografía en las simulaciones. Para simplificar los problemas de continuidad que surgían al momento de simular crecidas, se realizó un calado de la topografía para generar un canal a lo largo del eje del río. De esta forma, la geometría en todo el cauce es uniforme. Por otro lado, las grillas definidas para HEC-RAS y Telemac estaban condicionadas a la capacidad computacional. Se crearon mallados más finos pero estos fallaban al momento de modelar por falta de memoria computacional. Este método permite modelar geometrías complejas discretizando el dominio en elementos finitos. Mientras más pequeños sean estos elementos, los resultados serán más precisos. Por un lado, se utilizaron elementos cuadrados en HEC-RAS, mientras que en Telemac, la malla estaba compuesta de elementos triangulares. Estas últimas son más flexibles ya que pueden adaptarse a geometrías irregulares con mayor facilidad (Díaz, 2000). En el caso del mallado en HEC-RAS, los elementos cuadrados facilitan la interpolación cuando la geometría es regular. El caso estudiado en este trabajo se centra en el río Blanco, un cauce prácticamente recto y sin curvas ni meandros, lo que permite la aplicabilidad de ambos tipos de mallas. Otro factor importante es que se consideró como punto inicial el lugar de la rotura de tubería. Para permitir que el flujo se desarrolle es recomendable tomar como inicio un punto más arriba. Pese a ello, la primera sección transversal se consideró aguas abajo este punto por el mismo efecto.

En relación al estudio hidrológico, las distribuciones de probabilidad y las pruebas de bondad de ajuste, como la prueba del chi-cuadrado, desempeñan un papel esencial en la determinación de caudales de crecida en modelos de transporte de sedimentos. En cuencas con régimen nival, la relación entre las lluvias y la erosión sigue siendo relevante a lo largo del año, ya que las precipitaciones pueden manifestarse en cualquier estación (Parra, 2009). Estas pruebas de bondad de ajuste se utilizan para evaluar si las distribuciones de probabilidad propuestas se ajustan adecuadamente a los datos observados de lluvia, deshielo y crecida nival. En un análisis incorrecto, la distribución no se adaptará de manera adecuada a los datos observados, lo que resultará en estimaciones erróneas de los caudales de crecida, tasas de erosión, depósitos de material y el transporte sólido de partículas. Además, puede introducir sesgos sistemáticos en el modelo, lo que implica que los resultados se alejarán constantemente de la realidad. Esto obstaculiza la capacidad del modelo para predecir con precisión los eventos de crecida y transporte de sedimentos.

# Capítulo 7

## Conclusiones

Este trabajo de título abarcó el transporte de sedimentos de concentrado de cobre y relave para tres periodos de retorno, con la finalidad de evaluar la afectación del río Aconcagua. Para ello se realizó un modelo numérico en dos softwares diferentes: HEC-RAS y Telemac con el propósito de comparar los resultados.

La baja resolución de la topografía introdujo inestabilidades a los modelos. Se realizaron mejoras a la resolución e incluso se generó un canal a lo largo del eje del río para obligar al flujo a irse por él. Para disminuir las inestabilidades, se simuló con pasos temporales variables que dependían del número de Courant. En cuanto al modelo hidrodinámico, tanto HEC-RAS como Telemac consiguieron resultados similares, convergiendo al mismo volumen de agua, pero con discrepancias en cuanto a las velocidades y alturas obtenidas, afectando directamente la estimación de gasto sólido. Por otro lado, el modelo morfodinámico 2D se logró realizar en Telemac, mientras que para HEC-RAS se debió crear un modelo unidimensional.

En HEC-RAS se consideraron las clases de grano cuyos diámetros fueran similares a los materiales estudiados. El primer modelo de Telemac consideraba el concentrado de cobre como sedimento cohesivo. El problema de lo anterior es que el programa asigna valores asociados a arcillas o limos, por lo que pueden mantenerse en suspensión por tiempo indefinido. El concentrado de cobre presenta propiedades cohesivas pero debido a su alto peso específico sedimenta y percola en el lecho rápidamente, por lo que no es comparable con una arcilla o limo. Debido a los efectos de escondimiento producidos por la capa activa, existe una resistencia a la re suspensión (la grava protege al sedimento fino). Solamente cuando se tiene una crecida que pueda socavar el lecho es posible que el concentrado de cobre vuelva a suspenderse y transportarse aguas abajo. El modelo de Telemac que simulaba el concentrado como sedimento no cohesivo muestra que el transporte va disminuyendo aguas abajo, debido al peso específico del material. Este es el comportamiento esperado en el caso de metales pesados, donde además tiene una gran influencia la profundidad de percolación en el lecho.

De los resultados obtenidos, se muestra que el gasto sólido del modelo para el lecho y relave tienen comportamientos similares en ambos softwares. Tanto el concentrado como el relave son transportados aguas abajo y se van depositando en las riberas del río. Se enfatiza en este resultado ya que responde al comportamiento debido al perfil de velocidades que se tiene en un canal trapezoidal, donde las velocidades más bajas se encuentran en las orillas y como consecuencia, disminuye el movimiento de partículas y estas sedimentan. Como se



mencionó al comienzo de este trabajo, luego del accidente ocurrido en 2016, fue necesario realizar actividades de limpieza en la escuela Río Blanco, ubicada a más de 5 [km] bajo el punto de descarga. Por lo tanto, los resultados concuerdan con las evidencias e indican que se estaría movilizando concentrado de cobre y relave hacia las aguas del río Aconcagua, contaminando su lecho. Es importante recordar que este tipo de materiales, como otros metales pesados, tienen tiempos de retención altos en el lecho (González, 1994), por lo que pueden ser desplazados por mucho tiempo, incluso años después de ocurrido el incidente.

Dado que la investigación se fundamentó únicamente en datos bibliográficos y satelitales, este proyecto podría caracterizarse como un análisis preliminar del comportamiento de los sedimentos de concentrado y relave después de un evento de crecida. Para tener un modelo fidedigno es necesario contar con una topografía de detalle, de esta forma se pueden generar mallados más densos que a su vez requieren mayor memoria computacional. Es fundamental la visita de terreno para obtener muestras de suelo con la finalidad de generar curvas granulométricas en distintos puntos a lo largo del río, y además, estudiar la presencia de cobre y relave en el lecho y riberas. Para elaborar un modelo robusto se requiere de la calibración de parámetros, como el coeficiente de Manning. Por último, se propone la formulación de un código que pueda ser anexado a Telemac, y permita simular de mejor manera el comportamiento del concentrado, utilizando tanto su peso específico como diámetro característico, y que además incorpore la dinámica de percolación en el lecho. Como se consideró una superficie no erosionable, se propone trabajar con la granulometría del lecho natural en combinación con el derrame de concentrado para analizar las condiciones en las que se erosiona el canal, y por ende, cambia su geometría. En el caso de HEC-RAS, se propone definir una zona a la cual se le pueda asignar la granulometría del concentrado y relave, para modelarlo como una acumulación de sedimentos y no como una clase de grano perteneciente a la granulometría natural del lecho.

Es imperativo reconocer que los resultados obtenidos en este estudio están vinculados a diversas fuentes de incertidumbre. Los caudales de crecida están sujetos a posibles errores asociados con los métodos de estimación y la calidad de los datos hidrológicos disponibles. Además, los supuestos relacionados con las condiciones del lecho del río y la geometría del canal también son factores que introducen incertidumbre a los modelos. La capacidad computacional también desempeña un papel crucial, ya que restricciones en la resolución espacial y temporal pueden afectar la confiabilidad de las simulaciones. El cálculo del gasto sólido se ve afectado por diversos elementos, como el caudal, la velocidad, el coeficiente de Manning, la geometría del canal, entre otros. Por ende, cualquier error en la estimación de alguno de estos parámetros puede conllevar a una estimación incorrecta del gasto sólido. La precisión en la determinación de estas variables es esencial para obtener resultados fiables en este tipo de modelos, ya que pequeñas desviaciones en dichos parámetros pueden tener un impacto significativo en el transporte de sedimentos.

Finalmente, se concluye que el objetivo planteado al comienzo de este trabajo fue cumplido. Es decir, en base a la información disponible se logró modelar y analizar la dinámica del transporte de partículas de concentrado de cobre y relave, de la cual se determinó que existe afectación del lecho del río Aconcagua. Como siguientes pasos, se recomienda realizar un análisis de las crecidas en el río Aconcagua con el propósito de evaluar la movilización de sedimentos y las consecuentes deformaciones en el río debido a la sedimentación y ero-

sión, además de llevar a cabo un análisis de la calidad del agua, tomando en cuenta otros parámetros como ph y temperatura.

# Bibliografía

- [1] Arias, A. (2015). *Estudio experimental de la evolución geomorfológica en corrientes con lecho de grava y arena, debido a cambios de caudal sólido o líquido*. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la ingeniería, mención recursos y medio ambiente hídrico, Universidad de Chile.
- [2] ATA, R., Goeury, C., y Hervouet, J. M. (2014). *Telemac 2d software user manual*.
- [3] Benson, T., Wallingford, H. R., Huybrechts, N., Audouin, Y., Benson, T., Delinares, M., Walther, R. (2019). *Introducing GAIA, the brand new sediment transport module of the Telemac-MASCARET system*.
- [4] Beschta, R., y Jackson, W. (1979). The Intrusion of Fine Sediments into a Stable Gravel Bed. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 36, 204–210.
- [5] Brunner, G. (2016). *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual*
- [6] Bustamante-Penagos, N., Tapia, C. y Niño, Y. (2017). *Dinámica del concentrado de cobre en lechos de gravas*. V Jornadas de Ingeniería del Agua, Universidad de la Coruña.
- [7] Bustamante-Penagos, N., Niño, Y. (2020). *Suspension and infiltration of copper concentrate in a gravel bed: A flume study to evaluate the fate of a potential spill in a Chilean river*. *Environ. Earth Sci.* 79, 530.
- [8] Bustamante-Penagos, N., Niño, Y. (2021). *Profundidad de infiltración de partículas minerales en ríos de lecho de grava..* *Minerales*,11, 1285.
- [9] CAMELS-CL (Center for Climate and Resilience Research). (s.f.). <https://camels.cr2.cl/>
- [10] CENMA. (2008). *Análisis de la composición físico química de los sedimentos fluviales y su relación con la disponibilidad de metales en agua. Cuenca del río Aconcagua*. Tomo IV de V.
- [11] Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. (No. 627.13 C552h). Bogotá, CO:McGraw-Hill.
- [12] Cui, Y. y Parker, G. (1998). The arrested gravel front: stable gravel-sand transitions in rivers Part 2: General numerical solution. *Journal of Hydraulic Research*, 36(2), 159–182.
- [13] Díaz, A. (2000). *Métodos de mallado y algoritmos adaptativos en dos y tres dimensiones para la resolución de problemas electromagnéticos cerrados mediante el método de los elementos finitos*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia.
- [14] Dirección General de Aguas (DGA).(2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Aconcagua*. Recuperado de: <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Aconcagua.pdf>
- [15] Dirección General de Aguas (DGA). (s.f.). *Información Oficial Hidrometeorológica y de*

- Calidad de Aguas en Línea*. Disponible en: <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>
- [16] Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas (MOP). (1995). *Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica*.
- [17] Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). (2023). *Reporte anual de la evolución del clima en Chile*.
- [18] Diplas, P., y Parker, G. (1985). Pollution of Gravel Spawning Grounds due to Fine Sediment. University of Minnesota Digital Conservancy. <https://hdl.handle.net/11299/113315>
- [19] Godfrid, J., Damonte, G. y Godoy, A. (2020). *Nuevos atributos en los protocolos de emergencia ambiental a considerar en el ámbito de la minería*. [Análisis y Propuestas, 53]. Lima: GRADE.
- [20] González, S. (1994). *Geoquímica de metales pesados en Chile*. VI Simposio sobre contaminación ambiental.
- [21] Hydro-Informatics. (s.f.). Basic Setup of Gaia. [Sitio web]. <https://hydro-informatics.com/numerics/gaia-basics.html>
- [22] Instituto Nacional de Normalización. (2005). *NCh409: Agua potable - Requisitos*.
- [23] Instituto Nacional de Normalización. (1987). *NCh1333: Requisitos de calidad de agua para diferentes usos*.
- [24] Leliavsky, S. (1966). *Introducción a la hidráulica Fluvial*. Ediciones Omega S.A.
- [25] Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2018). *Manual de Carreteras, Volumen N°3: Instrucciones y Criterios de Construcción*.
- [26] N. Aceituno. (2017). *Estudio experimental del transporte de relaves mineros debido a accidentes en un flujo con lecho de grava*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- [27] Niño, Y. (2005). *Hidráulica fluvial y transporte de sedimentos*. Curso FCFM, Universidad de Chile.
- [28] NRC-CHC. (2009). *Blue Kenue Reference Manual*. National Research Council - Canadian Hydraulics Centre. [Software]. Disponible en <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/chc/doc/kenue/BlueKenue.pdf>
- [29] Obrador, P. (2016). *Greenpeace difunde reveladora imagen del derrame en Los Andes y acusa "indiferencia"*. Biobío Chile.
- [30] Observatorio Latinoamericano de Conflictos Ambientales (OLCA). (2019). *Derrame de relave minero de Codelco Andina se registra en sector alto de río Blanco de Los Andes*. Disponible en: <https://olca.cl/articulo/nota.php?id=107569>
- [31] Open Telemac. (2021). *Open Telemac-Mascaret the Mathematically superior suite of solvers*. (Versión 8p0r0). [Software]. Disponible en <https://www.open-telemac.org/>
- [32] Parra, K. (2009). *Análisis crítico de los modelos para estimar caudales en cuencas sin registro fluviométrico y propuestas de ajustes para su aplicación en cuencas del sur de Chile*. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles, Universidad Austral de Chile.

- [33] Partheniades, E. (2009). *Cohesive sediments in open channels*. Properties, transport, and applications. Editorial Butterworth-Heinemann.
- [34] Pérez, J. (s.f.). *Conceptos generales de la mecánica de suelos*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura (ETSA), Universidad de Coruña, España.
- [35] QGIS Development Team. (2009). QGIS Geographic Information System (Versión 3.32.2). [Software]. Open Source Geospatial Foundation. Disponible en <http://qgis.org>
- [36] Ríos, J. D. (2023). *Comparación de los modelos hecras 1D y 2D para la simulación de ríos urbanos*. Revista EIA, 20(40), pp. 1-14.
- [37] Rivera, X. (2022). *Impacto de la remoción de pasivos mineros en crecidas y aluviones: aplicación a la cuenca del río Illapel*. Memoria para optar al título de Ingeniera Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- [38] Sociedad Nacional de Minería (SONAMI). (2019). *Información de la minería*.
- [39] Taki, K. (2001). *Critical shear stress for cohesive sediment transport*. Department of Civil Engineering Chiba Institute of Technology, 2-17-1, Tsudanuma, Narashino, 275-8588, Japan.
- [40] Tamburrino, A., Niño, Y. (2013). *Propiedades de los sedimentos*. Transporte hidráulico de sólidos. Curso FCFM, Universidad de Chile.
- [41] Tapia, C. (2018). *Evaluación experimental del transporte e infiltración de concentrado de cobre sobre un lecho mixto de gravas y arenas*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- [42] Tassi, P., y Villaret, C. (2014). *Sisyphé v6.3 user's manual*.
- [43] Tellez, J. (2015). *Hidrodinámica y comportamiento del sedimento en una bifurcación de un río*. Tesis para optar al grado de maestría en ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [44] Torres, J. (2022). *Riesgo de remoción de relaves en ríos Illapel y Aucó: Simulación de crecidas y arrastre de sedimentos con datos empíricos*. Memoria para optar al título de Ingeniera Civil, Universidad de Chile.
- [45] US Army Corps of Engineers. *Bed Change Options*. Sitio web. Recuperado de: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rassed1d/1d-sediment-transport-user-s-manual/entering-and-editing-sediment-data/sediment-properties-options/bed-change-options>
- [46] U.S. Army Corps of Engineers. (2023). *textitHEC-RAS 1D Sediment Transport*. (Versión 6.3.1). [Software]. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office. Disponible en: <https://www.hec.usace.army.mil/software/HEC-RAS/download.aspx>