



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

**PELIGRO 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

JAVIERA SOFÍA TORRES HERNÁNDEZ

PROFESOR GUÍA:

Yarko Niño Campos

PROFESOR CO-GUÍA:

Luis Zamorano Riquelme

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

Alex Garcés Catalán

Santiago Montserrat Michelini

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
Advanced Mining Technology Center y el Departamento de
Ingeniería Civil, Universidad de Chile

SANTIAGO DE CHILE

2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
POR: JAVIERA SOFÍA TORRES HERNÁNDEZ
FECHA: 2023
PROF. GUÍA: YARKO IVÁN NIÑO CAMPOS

PELIGRO DE REMOCIÓN DE RELAVES EN RÍOS ILLAPEL Y AUCÓ: SIMULACIÓN DE CRECIDAS Y ARRASTRE DE SEDIMENTOS CON DATOS EMPÍRICOS

En Chile, la calidad del agua ha ido empeorando debido a actividades productivas como la minería, cuyos desechos, entre ellos los relaves, han contribuido como fuente de entrada de contaminantes a ríos y llanuras aluviales. En la comuna de Illapel, Coquimbo, se ha presentado una importante actividad minera desde tiempos coloniales, cuando aún no existía la ley que hoy en día regula los cierres de faenas e instalaciones mineras. En esta zona, los ríos Illapel y estero Aucó han sido especialmente afectados, principalmente debido a la gran cantidad de relaves abandonados, inactivos y activos ubicados cerca de los cauces. Episodios como derrumbes de relaves sobre el estero Aucó y estudios concluyentes de existencia de contaminación en los sedimentos, hacen inminente analizar si los relaves de la zona corresponden a un peligro que se asocia a contaminación. La hipótesis de este trabajo se basa en que existe peligro de remoción de relaves en la zona, tanto desde el punto de vista de las crecidas como del arrastre de sedimentos. El análisis de las crecidas se realiza porque, ante ciertos caudales, puede existir inundación de partes de los depósitos de relaves. En cuanto al análisis del arrastre de sedimentos, este es importante de realizar debido a la dinámica que existe en la interfaz sedimento-agua en los ríos: los contaminantes que llegan a un río pueden ser adsorbidos por los sedimentos del lecho y, por ende, ser arrastrados aguas abajo en conjunto con los sedimentos.

La metodología de este trabajo está basada en la modelación hidráulica, modelación de arrastre de sedimentos y morfología del cauce para distintos caudales estimados con datos históricos de precipitaciones mediante el programa TELEMAC-2D y el nuevo módulo GAIA (de arrastre de sedimentos). En conjunto con datos empíricos de muestras de sedimento para cálculo de granulometrías e imágenes de alta resolución georeferenciadas tomadas con dron RTK para obtención de la topografía, se logran analizar las zonas de peligro. A partir de las áreas de inundación, gastos sólidos de fondo y socavaciones obtenidas en los cauces mediante este modelo, se concluye que los sectores con presencia de relaves cercanos al lecho del río denominados “Relaves Aucó” y “Relaves Estadio Illapel” pueden ser consideradas zonas de peligro de remoción de relaves una vez realizada una validación del modelo con datos de crecidas y gastos sólidos de fondo reales medidos en la zona.

*A mi papá,
quien me ayudó a convertirme en la Ingeniera que soy.*

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer enormemente al profesor Yarko Niño por sus disposición, sabiduría y confianza en mí al hacerme parte de un proyecto donde pude aprender muchísimo. Al profesor Luis Zamorano por su tremenda paciencia y disposición a enseñar. A Alex Garcés por su ayuda y entrega de conocimientos. Al profesor Santiago Monterrat, Geovanni, Salvador y Valentina por su tiempo y confianza en las salidas a terreno. A la doctora Natalia Bustamante, quien me aconsejó tocar la puerta del profesor Yarko, por sus consejos y sabiduría.

También quiero agradecer al departamento de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, donde en la oficina de memoristas pude trabajar tranquilamente y estar a un paso de las oficinas de muchos profesores a quienes recurrí. Al departamento de geología por prestarme el laboratorio de tamizaje y al AMTC por toda la organización de las salidas a terreno. También agradecer a Alvaro Torrent del departamento de Civil por ayudarme en mis problemas con los computadores. Gracias a ICARO FILMS por el excelente trabajo de aerofotogrametría en Illapel.

Gracias a unos grandes ingenieros: mis amigos Daniel Hevia y Daniel Iriarte por acompañarme con su apoyo y amistad desde un inicio en la carrera. A Jerko por su amor, contención, subidas de ánimo y por siempre creer en mí durante todo este tiempo.

Gracias mi papá por su apoyo incondicional. El mejor coach que pude pedir y a quien le debo quién soy como Ingeniera. A mi mamá por su cariño y constante preocupación por mí a pesar de estar a 600 km de distancia. A mi hermano Matías por siempre creer en mí y a mi tía Fabiola por su amor y apoyo cuando más lo necesité.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Hipótesis	3
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Contenido del informe	3
2. Marco teórico	5
2.1. Antecedentes de Estudio	5
2.2. Modelación Hidrológica	6
2.2.1. Relleno de datos anuales y mensuales	7
2.2.2. Curvas Doblemente Acumuladas	7
2.2.3. Análisis de frecuencia	7
2.2.4. Método de isoyetas para estimación de precipitaciones	7
2.2.5. Transposición de caudales	8
2.2.6. Métodos de estimación de caudales	8
2.2.6.1. Método DGA-AC	9
2.2.6.2. Método Verni y King Modificado	9
2.2.6.3. Método Fórmula Racional	10
2.3. Granulometría	11
2.4. Modelación Hidráulica	12
2.4.1. Números adimensionales	12
2.4.2. Ecuaciones que gobiernan el movimiento del fluido	12
2.4.3. Resistencia Hidráulica	14
2.5. Arrastre de sedimentos	15
2.5.1. Variables adimensionales	15
2.5.2. Gasto sólido de fondo	15
2.5.3. Ecuaciones de Exner	17
2.6. Aerofotogrametría	17
2.7. Programas	17
2.7.1. Agisoft Metashape	17
2.7.2. BlueKenue	18
2.7.3. TELEMAC-MASCARET	18
2.7.3.1. TELEMAC-2D	18
2.7.3.2. SISYPHE	18

2.7.3.3. GAIA	19
3. Caracterización de la zona de estudio	20
4. Metodología	25
4.1. Caudales	25
4.2. Topografía	27
4.3. Grilla	27
4.4. Granulometría y número de Manning	27
4.5. Condiciones de borde	30
4.6. Simulación de crecidas	31
4.7. Simulación de arrastre de sedimentos	33
5. Resultados y discusión	36
5.1. Caudales	36
5.2. Topografía	38
5.3. Grilla	41
5.4. Granulometría y número de Manning	43
5.5. Simulación crecidas	47
5.6. Simulación arrastre de sedimentos	53
6. Conclusiones	62
Bibliografía	64
Anexos	67
Anexo A. Caudales	68
Anexo B. Granulometría	75

Índice de Tablas

2.1.	Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos Zona Homogénea Kp Pluvial - Log Normal - C.Choapa.	9
2.2.	Coefficientes de Fórmulas Empíricas.	10
3.1.	Parámetros subcuencas.	21
4.1.	Áreas cuencas Inicio Modelo.	26
4.2.	Coordenadas Calicatas (UTM)	28
4.3.	Parámetros de ingreso al modelo	30
5.1.	Caudales Máximos Instantáneos Illapel en Huintil.	36
5.2.	Caudales Máximos Instantáneos Illapel en el Peral.	36
5.2.	Caudales Máximos Instantáneos Illapel en el Peral.	37
5.3.	Precipitaciones en 24 horas para T=10 años.	37
5.4.	Caudales Illapel en Huintil obtenidos con distintos métodos.	37
5.5.	Caudales Illapel en el Peral obtenidos con distintos métodos.	38
5.6.	Caudales para el Modelo en cada Cuenca.	38
5.7.	Pendientes Tramos	41
5.8.	Diámetros característicos.	44
5.9.	Clasificación de diámetros.	45
5.10.	Número de Manning por diámetro de partícula.	45
5.11.	Número de Manning.	46
5.12.	Condiciones de borde arrastre de sedimentos.	54

Índice de Ilustraciones

1.1.	Esquema de transferencia de metales entre los sedimentos del lecho y la columna de agua. Fuente: Análisis de la composición físico química de los sedimentos fluviales y su relación con la disponibilidad de metales en agua. CENMA. 2010.	2
2.1.	Curva granulométrica suelos precordilleranos.	11
2.2.	Distribución de probabilidad bimodal.	11
3.1.	Zona de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SERNAGIO-MIN y Mapoteca del BCN.	20
3.2.	subcuencas de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IDE.	21
3.3.	Relaves Aucó.	22
3.4.	Relaves San Jorge.	23
3.5.	Relaves Estadio Illapel.	24
4.1.	Cuencas Inicio Modelo.	26
4.2.	Ubicación de las Calicatas.	28
4.3.	Calicata 2	29
4.4.	Figura conceptual topografía con cajón.	32
4.5.	Figura conceptual topografía con cajón.	33
5.1.	Nube de Puntos Densa. Fuente: Icaro Films.	39
5.2.	MDE terreno. Fuente: Elaboración propia.	39
5.3.	Perfil Longitudinal Illapel Alto.	40
5.4.	Perfil Longitudinal Illapel Bajo.	40
5.5.	Perfil Longitudinal Aucó.	40
5.6.	Diferencia topografías Zona relaves Aucó. Fuente: Elaboración propia.	41
5.7.	Mallado zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.	42
5.8.	Mallado interpolado con geometría de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.	43
5.9.	Curvas granulométricas estratos 0-20 cm.	44
5.10.	Lecho Estero Aucó	46
5.11.	Resultados de crecidas Relaves Aucó.	47
5.12.	Perfiles transversales Relaves Aucó.	48
5.13.	Resultados crecidas Relaves San Jorge.	49
5.14.	Perfiles Transversales Relaves San Jorge.	50
5.15.	Resultado crecidas Relaves Estadio Illapel.	51
5.16.	Perfiles transversales Relaves Estadio Illapel.	52
5.17.	Perfil Transversal Entrada Aucó.	53
5.18.	Perfil Transversal Entrada Illapel.	53
5.19.	Morfología cauce en zona entrada Estero Aucó.	54

5.20.	Morfología cauce en zona entrada Río Illapel.	54
5.21.	Resultados T=20 Zona Relaves Aucó.	56
5.22.	Resultados T=50 Zona Relaves Aucó.	56
5.23.	Resultados T=100 Zona Relaves Aucó.	57
5.24.	Diferencia método Wilcock y Crowe (WC) y Meyer-Peter y Muller (PMM) Relaves Aucó	58
5.25.	Resultados T=20 Zona Relaves Estadio Illapel.	59
5.26.	Resultados T=50 Zona Relaves Estadio Illapel.	59
5.27.	Resultados T=100 Zona Relaves Estadio Illapel.	60
5.28.	Diferencia método Wilcock y Crowe (WC) y Meyer-Peter y Muller (PMM) Relaves Estadio Illapel	61
A.1.	CDA Illapel en Huintil Abril-Septiembre	69
A.2.	CDA Illapel en Huintil Octubre-Marzo	69
A.3.	CDA Illapel en el Peral Abril-Septiembre	70
A.4.	CDA Illapel en el Peral Octubre-Marzo	70
A.5.	Análisis de frecuencias Illapel en Huintil Abril-Sep	71
A.6.	Análisis de frecuencias Illapel en Huintil Oct-Mar	72
A.7.	Análisis de frecuencias Illapel en el Peral Abril-Sep	73
A.8.	Análisis de frecuencias Illapel en el Peral Oct-Mar	74
B.1.	Curvas granulométricas Calicata 1.	75
B.2.	Curvas granulométricas Calicata 2.	76
B.3.	Curvas granulométricas Calicata 3.	77

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

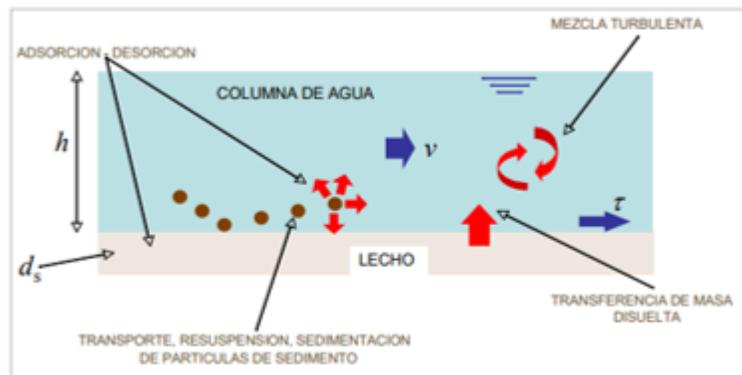
En Chile, la calidad del agua ha ido empeorando debido a actividades productivas desarrolladas en las cuencas, entre ellas la actividad minera (CENMA, 2010), cuyos procesos de molienda, obtención del mineral y almacenamiento de desechos (principalmente relaves) son la mayor fuente de entrada de contaminantes metálicos en forma de solución y partícula a ríos y llanuras aluviales (Macklin et al., 2006).

La comuna de Illapel, ubicada en la IV región de Coquimbo, ha presentado una importante actividad minera desde tiempos coloniales (Soubllette, Heyer, y Cortés, 2011), es decir, mucho antes de la aprobación de la Ley 20.551 que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras y, que permite la regulación de los tranques de relaves de mineras activas desde el 2012. Lamentablemente, la actividad en la zona se ha desarrollado en su mayoría muy cerca de la ciudad de Illapel y cajas del río Illapel y estero Aucó, generando varios depósitos de relaves en estos sectores. Hay registro de 190 mineras en la zona, principalmente de explotación de cobre y oro, destacando una concentración aguas arriba del estero Aucó. Según el catastro de Depósitos de Relaves en Chile de 2020 existen 65 depósitos: 7 en estado activo, 40 inactivos y 18 abandonados. Existen registros de distintos episodios de contaminación de las aguas. En el año 1997 el relave Tunquén se derrumbó sobre el estero Aucó luego de grandes eventos de precipitación (Garagay y Jerez, 2021). El año 2017 hubo un corte de agua por turbiedad del río, asociado a derrame de relaves luego de eventos de lluvias intensas. A esto se suman los testimonios de lugareños que insisten en que existe contaminación en el río (David Noticias, 2021).

El estudio “Caracterización Química, Física y Biológica del Agua de la Cuenca del Choapa” (2007-2008) elaborado por el INIA, estima que la calidad del agua del río Illapel presenta buenas características de calidad hasta su confluencia con el estero Aucó, el cual presenta mala calidad debido a la presencia de relaves en la ribera. Además, aisladamente, el río Illapel presenta crecidas importantes, aumentando el riesgo de arrastre fluvial de los relaves presentes (Soubllette et al., 2011). Este último punto da a conocer el interés de saber cómo se

comportan los cauces ante distintas crecidas y, si se puede considerar que existe un peligro de remoción de relaves producto de crecidas. Hasta ahora hay estudios que determinan que un tranque de relave del estero Aucó puede ser sobrepasado por la altura del flujo (Rivera, 2022) pero se hace necesario seguir profundizando los estudios.

Los sedimentos en un río influyen indirectamente en la calidad del agua a través de la dinámica interfaz sedimento-agua pues los contaminantes sedimentan, son adsorbidos y, al existir movimiento del material particulado, se puede provocar un flujo a la solución natural (desorción) (CENMA, 2010). Más de un 90 % de los contaminantes son transportados como partícula y por ende siguen el comportamiento de el sedimento natural del río (Macklin et al., 2006). Es por esta razón que es importante analizar el arrastre de sedimentos en ríos que han estado o pueden ser expuestos a eventos de contaminación. La Figura 1.1 muestra los fenómenos físicos que ocurren en la interfaz lecho-agua.



Figuras 1.1: Esquema de transferencia de metales entre los sedimentos del lecho y la columna de agua. Fuente: Análisis de la composición físico química de los sedimentos fluviales y su relación con la disponibilidad de metales en agua. CENMA. 2010.

TELEMAC-MASCARET es un sistema integrado de modelación de flujos en contornos abiertos que ha sido utilizado en cientos de estudios en el mundo. En particular, cuenta con el módulo TELEMAC 2D que permite modelar contornos abiertos en dos dimensiones resolviendo las ecuaciones de Saint-Venant mediante elementos o volúmenes finitos en mallas triangulares. TELEMAC 2D puede acoplarse con módulos de modelación de arrastre de sedimentos como GAIA (o el antiguo módulo SISYPHE). (Open Telemac, s.f.-a). En Chile se han realizado modelos de crecidas y arrastre de sedimentos en el Estuario el Maule para verificar si aumentos de gasto sólido de fondo afectan las áreas de inundación. Según este trabajo, los resultados obtenidos sirven para describir parte de la hidrodinámica del estuario y, para analizar escenarios de interés en cuanto a los cambios morfológicos de la barra y generación de zonas de inundación debido a crecidas y aumento de la carga de sedimento, de manera que, siguiendo una metodología de implementación similar a la expuesta en el estudio, se puede extrapolar este trabajo a otros estuarios de Chile con condiciones similares (Aracena, 2020).

De esta forma, la motivación de este trabajo está centrada en la actividad minera que ha dejado relaves cercanos a la riberas del ríos Illapel y Aucó, los cuales, ante crecidas importantes y la misma dinámica de la interfaz sedimento-agua, pueden contaminar los ríos.

1.2. Hipótesis

Existen zonas de peligro de remoción de relaves en los ríos Illapel y Aucó asociado a crecidas y arrastre de sedimentos. Este peligro puede identificarse a partir del análisis de resultados de modelación de crecidas y arrastre de sedimentos en el programa open-source TELEMAC y su nuevo módulo GAIA.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo principal consiste en simular crecidas y arrastre de sedimentos en un tramo del río Illapel y Estero Aucó con datos tomados en terreno y técnicas de modelación numéricas. Con los resultados de la simulación se analizará si existe un peligro de remoción de relaves mineros en la zona.

1.3.2. Objetivos específicos

El trabajo consta de 4 objetivos específicos:

1. Desarrollar un estudio hidrológico de la zona con antecedentes de caudales y precipitaciones.
2. Obtener la topografía y granulometría de los cauces con mediciones en terreno.
3. Desarrollar una modelación hidráulica de crecidas y transporte de sedimentos en los tramos de estudio.
4. Analizar los resultados obtenidos y determinar si existe peligro de remoción de relaves.

1.4. Contenido del informe

Este trabajo de título cuenta con 6 capítulos cuyo contenido se detalla a continuación:

Capítulo 1: Introducción, el cual presenta la motivación, hipótesis, objetivo general y objetivos específicos y contenidos de este informe.

Capítulo 2: Marco teórico, donde se realiza un resumen de la revisión bibliográfica realizada y un resumen de conceptos necesarios para elaborar este trabajo. Principalmente, de modelación hidrológica, hidráulica y arrastre de sedimentos.

Capítulo 3: Caracterización de la zona de estudio, donde se presenta una descripción y antecedentes de la zona de estudio.

Capítulo 4: Metodología, el cual detalla en distintas secciones lo realizado para modelar las crecidas y arrastre de sedimentos. Se presentan las metodologías de cálculo de caudales, topografía, grilla, granulometría, condiciones de borde y simulaciones de crecidas y arrastre.

Capítulo 5: Resultados y discusión, donde se presentan los resultados de crecidas, gastos sólidos de fondo y socavaciones en la zona de estudio más un análisis de estos.

Capítulo 6: Conclusiones, el cual presenta las principales conclusiones a partir de los resultados y discusión, así como también recomendaciones para mejorar los resultados.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Antecedentes de Estudio

Grandes cantidades de sedimentos finos compuestos por minerales pueden introducirse en los lechos de los ríos por erosión y cambios antropogénicos, como cambios en el uso suelo, accidentes mineros (desechos mineros como relaves o concentrado de mineral), eliminación de material dragado de actividades mineras o cambios naturales como erosión en la cuenca (Bustamante-Penagos y Niño, 2020). Los desechos mineros pueden tardar décadas o siglos en dispersarse en un sistema fluvial debido al almacenamiento en canales y llanuras aluviales (Macklin et al., 2006). Este almacenamiento ocurre porque los metales pesados tienen tendencia a formar asociaciones con sustancias minerales y, en mayor grado, con sustancias orgánicas mediante fenómenos como adsorción, intercambio iónico, quelación, etc. Esta tendencia puede resultar en concentraciones elevadas de ciertos contaminantes en los sedimentos del lecho, los cuales son transportados y pueden ser liberados a la columna de agua por cambios de las condiciones ambientales como potencial redox, oxígeno disuelto, presencia de quelatos orgánicos (Rosas, 2001), procesos de difusión, compactación, erosión y bioturbación (Förstner y Salomons, 1981). A partir de esto, se sabe que más de un 90% de los contaminantes metálicos en los ríos se transportan en forma de partículas asociadas a sedimentos (Macklin et al., 2006).

El año 2021 se presentó un modelo integrado para transporte de minerales y metales en el arroyo Yerba Loca, donde se incorporó el modelo de transporte de sedimentos. Este concluyó que una parte esencial de los metales se hunde en los sedimentos del fondo (Zegers et al., 2021). Es por esto que la dispersión, almacenamiento y removilización de metales pesados, puede estar relacionado al estudio de transporte de sedimentos (Macklin et al., 2006). Por lo general, durante caudales medios-bajos, los precipitados se mueven en pequeños coloides siguiendo el mismo camino que las fases disueltas. Sin embargo, para flujos más altos, la alta turbulencia y el esfuerzo cortante resuspenden las partículas de arena y arcilla que albergan diferentes fases minerales (desorción), lo que hace que los metales sigan el camino del transporte de sedimentos suspendidos (Zegers et al., 2021).

Los lechos de grava (muy comunes en los ríos cordilleranos chilenos), debido a su porosidad, son un reservorio para la deposición de sedimentos finos (Bustamante-Penagos y Niño, 2020). Estudios en estos lechos han comprobado que contaminantes como concentrado de cobre, poseen mayor flujo depositacional que flujo de partículas de arrastre, generando infiltración. Es por esto que durante periodos de grandes caudales se espera un transporte de carga de fondo y, por consecuencia, arrastre de cobre que infiltró en el pasado (Bustamante-Penagos y Niño, 2020).

Lamentablemente, hoy en día, luego de un accidente minero en Chile, las empresas solo recolectan los materiales mineros depositados en las márgenes de los ríos y dejan el material infiltrado en el cauce. Las autoridades ambientales, como el Ministerio del Medio Ambiente de Chile, toman muestras de la calidad del agua una vez ocurrido el derrame y lo hacen hasta que los niveles se normalizan, pero nadie toma muestras de los sedimentos en el lecho (Bustamante-Penagos y Niño, 2020).

Niveles elevados de metales pesados asociados a sedimentos también pueden presentar peligros para la integridad del ecosistema, afectando a organismos acuáticos o limitar el recurso por parte de consumidores humanos (FDEP, 1994).

Actualmente en Chile no existe una legislación para determinar si un suelo se encuentra contaminado por metales. Estudios determinan que debido a altas concentraciones naturales de metales en los suelos del país, la regulación que se implemente debe considerar las condiciones locales como línea base, tipo de suelo y condiciones climáticas. La futura legislación chilena respecto a la contaminación del suelo debe basarse en evaluaciones de riesgo ambiental para la biota y/o la salud humana en vez de valores umbrales específicos basados en concentraciones totales o parciales de metales presentes en el suelo. La línea base de la cuenca Aconcagua (cuenca donde no se realizan actividades humanas) presenta concentraciones de Cobre en los suelos de 134 mg/kg por lo que concentraciones mayores a esta pueden considerarse como contaminaciones en esta cuenca (Neaman, Ginocchhio, Tapia, y Novoselov, 2021). En el caso del río Illapel, no se han realizado muestras en sectores donde no exista actividad minera para establecer una línea base. No obstante, muestras de suelos del río Illapel muestran concentraciones de hasta 800 mg/kg (0,08 %) mientras que una muestra de un relave de la zona alcanzan los 4300 mg/kg (0,43 %).

2.2. Modelación Hidrológica

La modelación hidrológica se basa en la estimación de caudales para distintos puntos de interés y distintos periodos de retorno a partir de data existente de precipitaciones y/o caudales. A continuación se presentan distintos puntos importantes para la modelación hidrológica.

2.2.1. Relleno de datos anuales y mensuales

Cuando una estación no posee datos en algunos años y/o meses, se debe realizar un relleno de datos tomando una estación base, la cual se elige mediante un estadístico estimador de dispersión de datos. Por simplicidad, se realiza una regresión lineal y se elige la estación que posea el mayor valor de estadístico de dispersión de datos r^2 . La estación se debe rellenar mediante algún método, siendo más simple mediante regresiones lineales (que es utilizado en este trabajo). En el caso de la precipitación, los rellenos se hacen tanto mensuales como anuales y se debe hacer una corrección de tal forma que la suma de los datos mensuales sea igual a la anual. En el caso de caudales, solo se realiza relleno mensual. (Quevedo, Mendoza, Vásquez, y Vargas, 2019)

2.2.2. Curvas Doblemente Acumuladas

Para un análisis de consistencia de datos rellenados, se realizan Curvas Doblemente Acumuladas (CDA). Esto consiste en generar una estación patrón con el promedio de estaciones candidatas. Luego, se realiza la curva acumulada para la estación rellenada y la patrón y se grafica. De existir quiebres en la CDA (es decir, una pendiente M1 que cambia a M2), se deben corregir los datos luego del quiebre por α . (Quevedo et al., 2019).

$$\alpha = \frac{M1}{M2} \quad (2.1)$$

Donde:

- α : Parámetro de corrección
- M1: Pendiente recta 1
- M2: Pendiente recta 2

2.2.3. Análisis de frecuencia

Los análisis de frecuencia permiten obtener caudales o precipitaciones para distintos periodos de retorno. Se analizan los datos y se ve cual distribución se adecúa más a los datos mediante el test Chi-Cuadrado. Entre las distribuciones más comunes a analizar son la Normal, Log-Normal, Pearson y Gumbel. Es importante destacar que este método se basa en estimar precipitaciones a futuro a partir de data histórica y no considera aspectos como cambio climático (Chow, 1994a).

2.2.4. Método de isoyetas para estimación de precipitaciones

Dada una cuenca que cuente con información de isoyetas, es posible estimar la precipitación media de esta mediante un promedio ponderado. El método consiste en calcular la precipitación promedio entre dos isoyetas y el área entre ellas (Chow, 1994a). Luego, la

precipitación estará dada por:

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \sum A_i \cdot P_i \quad (2.2)$$

Donde:

\bar{P} [mm] :	Precipitación media en la cuenca
A_i [km ²] :	Área i entre isoyetas
P_i [mm]:	Precipitación i entre isoyetas
A [km ²]:	Área de la cuenca

2.2.5. Transposición de caudales

La finalidad es encontrar caudales para una cuenca en base a otra de similares características (Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, 2000) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_1}{A_1 \cdot P_1} = \frac{Q_2}{A_2 \cdot P_2} \quad (2.3)$$

Donde:

A_1 [km ²]:	Área zona 1
A_2 [km ²]:	Área zona 2
Q_1 [m ³ /s]:	Caudal para A_1
Q_2 [m ³ /s]:	Caudal para A_2
P_1 [mm]:	Precipitación para A_1
P_2 [mm]	Precipitación A_2

2.2.6. Métodos de estimación de caudales

De acuerdo al Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos para cuencas sin información fluviométrica, se tienen distintas metodologías que permiten calcular caudales. Para aquellas que requieran información de la precipitación diaria para un periodo de retorno de 10 años, es posible utilizar las isoyetas del estudio "Precipitaciones. Máximas en 1, 2 y 3 días"(Ministero de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 1995), la cual se encuentra como archivo *shape* en la base de datos de la Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE Chile) como "*Precipitaciones máximas diarias*" (Ministero de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 1995).

2.2.6.1. Método DGA-AC

Este método es válido para cuencas con áreas pluviales o pluvionivales entre 20 y 10.000 km^2 (Ministero de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 1995). Para cuencas ubicadas entre la III y IV región de Chile, rige la siguiente ecuación:

$$Q_{10} = 1,94 \cdot 10^{-7} \cdot A_p^{0,776} \cdot (P_{24}^{10})^{3,108} \quad [m^3/s] \quad (2.4)$$

Donde:

- $Q_{10} [m^3/s]$: Caudal para un periodo de retorno de 10 años
- $A_p [km^2]$: Área pluvial de la cuenca
- $P_{24}^{10} [mm]$: Precipitación diaria para un periodo de retorno de 10 años

Multiplicando los valores de la 2.1 por $Q(10)$ es posible obtener el $Q(T)$.

Tabla 2.1: Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos Zona Homogénea Kp Pluvial - Log Normal - C.Choapa.

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q(T)/Q(10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,24	0,48	0,13
5	0,60	0,78	0,50
10	1,00	1,00	1,00
20	1,61	1,77	1,49
25	1,82	1,96	1,67
50	2,61	3,03	2,33
75	3,19	3,82	2,66
100	3,67	4,47	2,81

Fuente: Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos para cuencas sin información fluviométrica (1998).

2.2.6.2. Método Verni y King Modificado

Este método es válido para cuencas con áreas pluviales o pluvionivales entre 20 y 10.000 km^2 (Ministero de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 1995). El cálculo se realiza en base a la siguiente fórmula:

$$Q(T) = C(T) \cdot 0,00618 \cdot P_{24}^{T1,24} \cdot A_p^{0,88} \quad (2.5)$$

Donde:

$Q(T)$ [m^3/s]:	Caudal para un periodo de retorno de T años
A_p [km^2]:	Área pluvial de la cuenca
P_{24}^{10} [mm]:	Precipitación diaria para un periodo de retorno de 10 años
$C(T)$:	Coefficiente empírico de periodo de retorno de T años

$C(T)$ se obtiene a partir de $C(T = 10)$ y la relación $C(T)/C(10)$ presente en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2: Coeficientes de Fórmulas Empíricas.

PERIODO DE RETORNO “T” (años)	C(T)/C(10)
	IV Choapa
2	0,33
5	0,68
10	1,00
20	1,38
25	1,54
50	2,00
100	2,56
$C(T=10)$	0,20

Fuente: Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos para cuencas sin información fluviométrica

2.2.6.3. Método Fórmula Racional

Este método es válido para cuencas entre 20 y 10.000 km^2 de área (Ministero de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 1995) y se basa en la siguiente ecuación:

$$Q(T) = \frac{C(T) \cdot I_{tc}(T) \cdot A_p}{3,6} \quad (2.6)$$

Donde:

$Q(T)$ [m^3/s]:	Caudal para un periodo de retorno de T años
A_p [km^2]:	Área pluvial de la cuenca
$I_{tc}(T)$ [mm/hr]:	Intensidad media de la lluvia para un periodo de retorno T y duración igual a tc (tiempo de concentración)
$C(T)$:	Coefficiente de escorrentía para el periodo de retorno T

$C(T)$ se obtiene en base a la misma Tabla 2.2 pero en este caso $C(T = 10) = 0,08$ para la IV región-Cuenca Choapa (Ministero de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 1995).

2.3. Granulometría

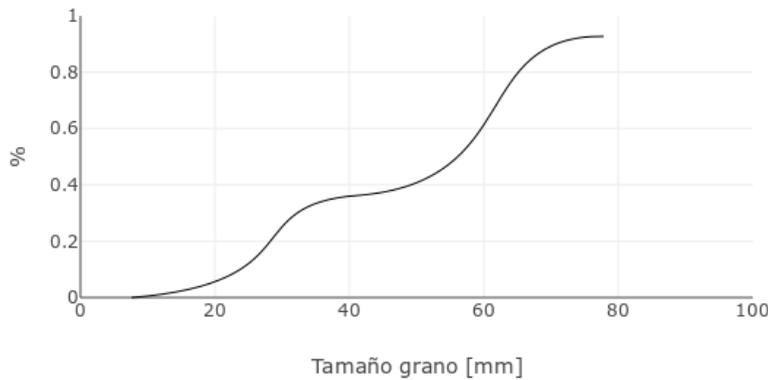
Los sedimentos de un lecho se pueden clasificar de acuerdo al tamaño de sus granos. La curva que representa esto se llama curva granulométrica, la cual grafica el porcentaje de sedimento que pasa (basado en pesos) cierto mallado versus el diámetro de la malla (tamaño del grano) (Niño, 2019). También se define, dado un tamaño del grano D , la escala ψ :

$$\psi = \frac{\ln(D)}{\ln(2)} \quad (2.7)$$

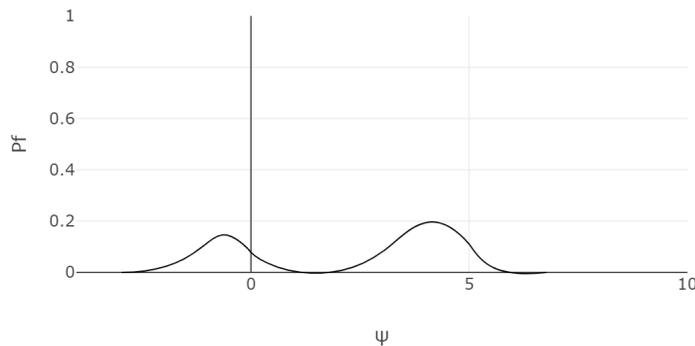
Se puede definir la densidad de probabilidad p_f y la distribución de probabilidad P_f de acuerdo a la siguiente definición:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(\psi) d\psi = 1; \quad P_f = \int_{-\infty}^{\psi} p(\psi) d\psi \quad (2.8)$$

En los ríos precordilleranos lo usual es que las granulometrías tengan una distribución bimodal (dos peaks) (Niño, 2019). La Figura 2.1 representa la curva granulométrica para un suelo precordillerano y la Figura 2.2 su distribución.



Figuras 2.1: Curva granulométrica suelos precordilleranos.



Figuras 2.2: Distribución de probabilidad bimodal.

A partir de la curva granulométrica se definen diámetros característicos del tipo D_s donde s representa el porcentaje asociado a ese diámetro en la curva, es decir, el porcentaje de suelo que es menor a ese diámetro. También es posible calcular el diámetro medio de la muestra d_{sm} (no confundir con el D50, el cual corresponde al diámetro bajo el cual se encuentra el 50% de la muestra) (Niño, 2019).

2.4. Modelación Hidráulica

2.4.1. Números adimensionales

En la hidráulica de canales abiertos, existen parámetros adimensionales que permiten caracterizar el flujo. Para comparar la relación entre fuerzas inerciales y viscosas existe el número de Reynolds (R_e):

$$R_e = \frac{UR_h}{\nu} \quad (2.9)$$

Donde U es la velocidad media del flujo, R_h el radio hidráulico y ν la viscosidad cinemática. Para valores de R_e menores a 1000 se dice que los flujos son laminares (dominan fuerzas viscosas) y para valores de R_e mayores a 3000, turbulento (dominan fuerzas inerciales). Puede existir un flujo en transición laminar-turbulenta.

La relación entre fuerzas inerciales y gravitacionales está dada por el número de Froude (F_r):

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{gR_h}} \quad (2.10)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad. Cuando $F_r = 1$, se dice que el flujo es crítico y tiene asociada una altura crítica. Por ende, si $F_r > 1$ el flujo es supercrítico (altura flujo bajo h_c) y, si $F_r < 1$, es subcrítico (altura flujo sobre h_c). Cuando el flujo es supercrítico (también llamado torrente) está dominado por condiciones aguas arriba y, cuando es subcrítico (también llamado río), por condiciones aguas abajo.

2.4.2. Ecuaciones que gobiernan el movimiento del fluido

La ecuación de Navier Stokes es la ecuación que gobierna el movimiento del un fluido. Para fluidos newtonianos incompresibles está dada por:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) = -\nabla \hat{p} + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (2.11)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.12)$$

Con ρ la densidad del fluido, $\hat{p} = p + \rho gh$ (con p presión, g aceleración de gravedad y h altura del fluido), μ la viscosidad dinámica y \vec{u} la velocidad y t tiempo (Niño, 2019).

Las ecuaciones de Saint-Venant son obtenidas a partir de un promedio en la vertical de las “*Reynolds Average Navier Stokes Equations*” (RANS), que descomponen las velocidades en cada eje en un promedio más una fluctuación. Se basa principalmente en 4 hipótesis: presión hidrostática, velocidad vertical despreciable, impermeabilidad en la superficie y fondo y, finalmente, la regla de integración de Liebnitz (Hervouet, 2007).

A continuación se presentaran las fórmulas “no-conservativas” que permiten tomar en cuenta discontinuidades (Hervouet, 2007). Definiendo $\vec{v} = (u_1, u_2, u_3)$, de las ecuaciones RANS se tiene que:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (2.13)$$

Donde \bar{u}_i es un promedio de conjunto de la velocidad, el cual sigue siendo dependiente del tiempo (es por esto que la derivada en el tiempo de \bar{u} en la ecuación 2.11 no desaparece).

Para las ecuaciones de Saint-Venant, podemos definir un nuevo vector $\vec{V} = (U_1, U_2)$, donde:

$$U_i = \frac{1}{h} \int_{Z_f}^{Z_s} \bar{u}_i dz \quad (2.14)$$

Z_f y Z_s corresponden a las cotas de fondo y superficie respectivamente, cuya resta da una altura h . De esta forma, del promedio de la ecuación de continuidad en la vertical se obtiene que:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla(h) + h \nabla \cdot (\vec{V}) = S_{ce} \quad (2.15)$$

Del promedio de las ecuaciones de momentum en la vertical se obtiene:

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla U_1 = -g \frac{\partial Z_s}{\partial x} + F_x + \frac{1}{h} \nabla \cdot (h \nu_e \nabla(U_1)) \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla U_2 = -g \frac{\partial Z_s}{\partial y} + F_y + \frac{1}{h} \nabla \cdot (h \nu_e \nabla(U_2)) \quad (2.17)$$

Donde:

t [s]:	Tiempo
S_{ce} [m/s]:	Entradas o descargas de agua en el dominio
g [m/s]:	Aceleración de gravedad
ν_e [m ² /s]:	Coficiente de difusión turbulenta
F_y y F_x [m/s ²]:	Fuerzas y términos fuente

F_y y F_x pueden representar viento, fuerzas de Coriolis, fricción de fondo y fuente de momentum (inducidas por fuentes de descarga) (Hervouet y Ata, 2020b).

2.4.3. Resistencia Hidráulica

De acuerdo a la Ley de Resistencia Hidráulica se tiene:

$$\tau = C_f \rho U^2 \quad (2.18)$$

Donde τ es el esfuerzo de corte en el fondo, C_f el coeficiente de fricción adimensional y U la velocidad media del flujo.

Definiendo la velocidad de corte como $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$ se obtiene que:

$$\frac{U}{u_*} = \sqrt{\frac{1}{C_f}} \quad (2.19)$$

Según la ecuación de Manning:

$$U = \frac{\sqrt{S}}{n} R_h^{2/3} \quad (2.20)$$

Con n el coeficiente de Manning.

Juntando la ecuación 2.19 y 2.20 se obtiene que:

$$C_f = \left(\frac{\sqrt{gn}^{1/6}}{R_h} \right)^2 \quad (2.21)$$

Strickler definió una relación entre el número de Manning y el diámetro representativo del sedimento (d_s).

$$n = \frac{d_s^{1/6}}{26,4} \quad (2.22)$$

Además define un número adimensional llamado número de Strickler:

$$S_t = \frac{\sqrt{gn}}{d_s^{1/6}} \quad (2.23)$$

Juntando las ecuaciones 2.22 y 2.23 da un número constante de $S_t = 0,12$, el cual solo rige para un $R_h/d_s > 10$. Dado que el río Illapel y Aucó se encuentran en la precordillera, lo más probable es que gobiernen ecuaciones para sedimentos gruesos donde $R_h/d_s < 10$. Si se cumple esto, se dice que el escurrimiento es macro-rugoso y la ecuación 2.23 deja de ser válida. Existen varias ecuaciones que modelan este escurrimiento. En particular, Ayala y Oyarce analizaron el río Mapocho Alto obteniendo una ecuación que refleja una transición suave entre flujo macro-rugoso y rugoso (Niño, 2019):

$$S_t = \frac{(R_h/d_s)^{1/6}}{3,33(R_h/d_s)^{0,57}} \quad (2.24)$$

Donde definieron $d_s = D_{90}$.

El número de Manning depende de otros factores además del sedimento por lo que puede ser estimado como:

$$n = n_0 + n_s \quad (2.25)$$

Donde n_s es el Manning debido al tamaño del sedimento y n_0 una corrección por otros factores influenciados como la vegetación.

2.5. Arrastre de sedimentos

2.5.1. Variables adimensionales

Para el arrastre de sedimentos existen variables adimensionales que describen el proceso.

El Reynolds de partícula está dado por:

$$Re_{*p} = \frac{u_* d_s}{\nu} \quad (2.26)$$

El esfuerzo de corte adimensional se define como:

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{gRd_s} \quad (2.27)$$

Donde $u_* = \sqrt{gR_h S}$ es la velocidad de corte ya definida en la sección anterior y $R = (\rho_s - \rho)/\rho$ la densidad relativa sumergida con ρ_s la densidad de la partícula y ρ la densidad del fluido.

Se define también el esfuerzo de corte adimensional crítico τ_{*c} , el cual está asociado a una velocidad crítica u_{*c} . Cuando el esfuerzo de corte sobre la partícula es mayor que el crítico, comienza el arrastre de estas (Niño, 2019).

2.5.2. Gasto sólido de fondo

El gasto sólido es el volumen o peso seco por unidad de tiempo que pasa por una sección transversal. En particular, el gasto sólido de fondo (q_s) está asociado a las partículas transportadas que siguen en contacto con el lecho (Niño, 2019). Se define el gasto sólido de fondo adimensional (q_s^*) como:

$$q_s^* = \frac{q_s}{\sqrt{gRd_s^3}} = W_s^* \tau_*^{3/2} \quad (2.28)$$

Donde W_s^* es la tasa de transporte adimensional. Para sedimentos uniformes, una de las fórmulas clásicas es la de Peter-Meyer y Muller (1948) expresada en función de q_s^* como:

$$q_s^* = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{3/2} \quad (2.29)$$

O en función de W_s^* como:

$$W_s^* = 8(1 - \tau_c/\tau)^{3/2} \quad (2.30)$$

Los ríos precordilleranos como el Illapel y Aucó se caracterizan por poseer granulometrías extendidas (no uniformes) en la que se forma una coraza en la superficie del lecho. Para estas granulometrías, en la ecuación de Meyer-Peter y Muller se recomienda usar el tamaño medio del sedimento, tal que $d_s = d_{sm}$. No obstante, no logra modelar el efecto de la coraza (Niño, 2019). Parker (1990) y Wilcock y Crowe (2003) incorporan este efecto. Las ecuaciones de Wilcock y Crowe están basadas en las de Parker pero incorporan el efecto adicional de las arenas.

El gasto sólido de fondo total se calcula como la suma de los gastos de sólido de fondo asociado a cada fracción granulométrica i de diámetro d_{si} y porcentaje retenido F_i :

$$q_s = \sum q_{si} \quad (2.31)$$

Cada gasto sólido tiene asociado un valor de W_{si}^* definido por:

$$W_{si}^* = \frac{q_{si}^*}{F_i \tau_i^{*3/2}} = \frac{R g q_{si}}{u_*^3 F_i} \quad (2.32)$$

Definiendo $\phi = \tau/\tau_{ri}$ con τ_{ri} un valor de τ tal que W_{si}^* es un número pequeño cercano a 0,002, Wilcock y Crowe (2003) plantean que:

$$\frac{\tau_{ri}}{\tau_{rm}} = \left(\frac{d_{si}}{d_{sm}} \right)^b \quad (2.33)$$

$$b = \frac{0,67}{1 + \exp(1,5 - d_{si}/d_{sm})} \quad (2.34)$$

Donde d_{sm} es el diámetro medio del sedimento y τ_{rm} el esfuerzo de corte asociado al diámetro medio, el cual se relaciona con el esfuerzo adimensional y el porcentaje de arenas (F_s) mediante las siguientes fórmulas:

$$\tau_{rm}^* = \frac{\tau_{rm}}{\rho g R d_{sm}} = 0,021 + 0,015 \exp(-20 F_s) \quad (2.35)$$

Finalmente:

$$W_{si}^*(\phi) = \begin{cases} 0,002 \phi^{7,5} & \text{si } \phi < 1,35 \\ 14(1 - 0,894/\phi^{0,5})^{4,5} & \text{si } \phi \geq 1,35 \end{cases} \quad (2.36)$$

2.5.3. Ecuaciones de Exner

Las ecuaciones de Exner modelan la conservación de sedimento en el lecho. Dado un datum z_b del fondo del lecho y el gasto sólido q_b , las ecuaciones en X e Y se pueden expresar en una sola ecuación dada por:

$$(1 - \lambda) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \nabla \cdot q_b = 0 \quad (2.37)$$

Donde λ corresponde a la porosidad de los sedimentos.

2.6. Aerofotogrametría

La fotogrametría es una técnica que permite determinar la forma y dimensiones de objetos a partir de fotografías. Se determina aerofotogrametría cuando la cámara fotográfica se transporta en un un vehículo aéreo, como por ejemplo, un dron (Galindo, 1970).

En cuanto a los drones, existen drones PPK (Post Processed Kinematic) y RTK (Real Time Kinematics). El primer tipo de dron posee un GPS a bordo o receptor junto a la cámara y obtiene las posiciones de la cámara trilateral de los satélites. Esto conlleva a imprecisiones de varios metros, sobre todo en el eje Z (DJI, 2017). Es por esto que se emplean estaciones base y de control distribuidas en el espacio de interés para mejorar la precisión en un programa de postprocesado de las fotografías. El dron RTK, en cambio, se conecta a una estación base o de referencia virtual haciendo que las posiciones de la cámara se calculen en tiempo real, teniendo como referencia la ubicación de la estación base. Esto permite reducir el error a 2 o 3 centímetros sin la necesidad de contar con más estaciones base y de control (DJI, 2017).

2.7. Programas

2.7.1. Agisoft Metashape

Agisoft Metashape es un producto de software independiente que realiza el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales y genera datos espaciales en 3D para su uso en la aplicación GIS (Agisoft, 2021). A partir de la imágenes georeferenciadas, con este programa se obtiene el Modelo de Elevación Digital (MED) o nube de puntos a utilizar.

2.7.2. BlueKenue

Blukenue es un programa gratuito del National Research Council Canada. Es una herramienta avanzada de preparación, análisis y visualización de datos para modeladores hidráulicos. Proporciona una interfaz de última generación, que integra datos geoespaciales con datos de entrada y resultados del modelo (National Research Council Canada, 2022). Este programa permitirá un preprocesamiento de la nube de puntos que consistirá en un mallado de la topografía del terreno, la cual debe ser lo suficientemente pequeña para modelar el comportamiento del flujo pero lo suficientemente grande para que el modelo pueda correr.

2.7.3. TELEMAC-MASCARET

TELEMAC-MASCARET es un sistema integrado de modelación de flujos en contornos abiertos que ha sido utilizado en cientos de estudios en el mundo. (Open Telemac, s.f.-a). Sus módulos de simulación se basan principalmente el método de elementos finitos, evitando el uso sistemático de modelos integrados como el método de diferencias finitas. Tiene numerosas aplicaciones en hidráulica de ríos y marítima. Fue desarrollado por el Laboratoire National d'Hydraulique, un departamento de Electricité de France's Research and Development Division. Se encuentra disponible como OpenSource y es desarrollado por Open Telemac-Mascaret Consortium. (Open Telemac, s.f.-a).

2.7.3.1. TELEMAC-2D

TELEMAC-MASCARET cuenta con el módulo TELEMAC 2D que permite modelar contornos abiertos en dos dimensiones resolviendo las ecuaciones de Saint-Venant mediante elementos (default) o volúmenes finitos en mallas triangulares. TELEMAC 2D puede acoplarse con módulos de modelación de arrastre de sedimentos como GAIA (o el antiguo módulo SISYPHE) (Open Telemac, s.f.-b).

2.7.3.2. SISYPHE

SISYPHE es un módulo que forma parte de TELEMAC y permite modelar el arrastre de sedimentos así como también la morfodinámica de los lechos. SISYPHE es aplicable tanto a sedimentos cohesivos como no cohesivos, los cuales se pueden representar como un número finito de clases, representadas por su diámetros medio, densidad y velocidad de sedimentación. Respecto a transporte de sedimentos, permite modelar carga de fondo y carga suspendida. Para la carga de fondo utiliza las formulas clásicas de arrastre de sedimentos como la fórmula de Meyer-Peter y Müller, Engelund-Hansen y Einstein-Brown y permite incluir efectos como pendientes del lecho, corrientes secundarias, lechos rígidos, entre otros. Para cargas suspendidas resuelve una ecuación adicional para la concentración de sedimentos promediada en profundidad. En cuanto a la morfodinámica, resuelve la ecuación de Exner mediante elementos y volúmenes finitos. (Open Telemac, 2020).

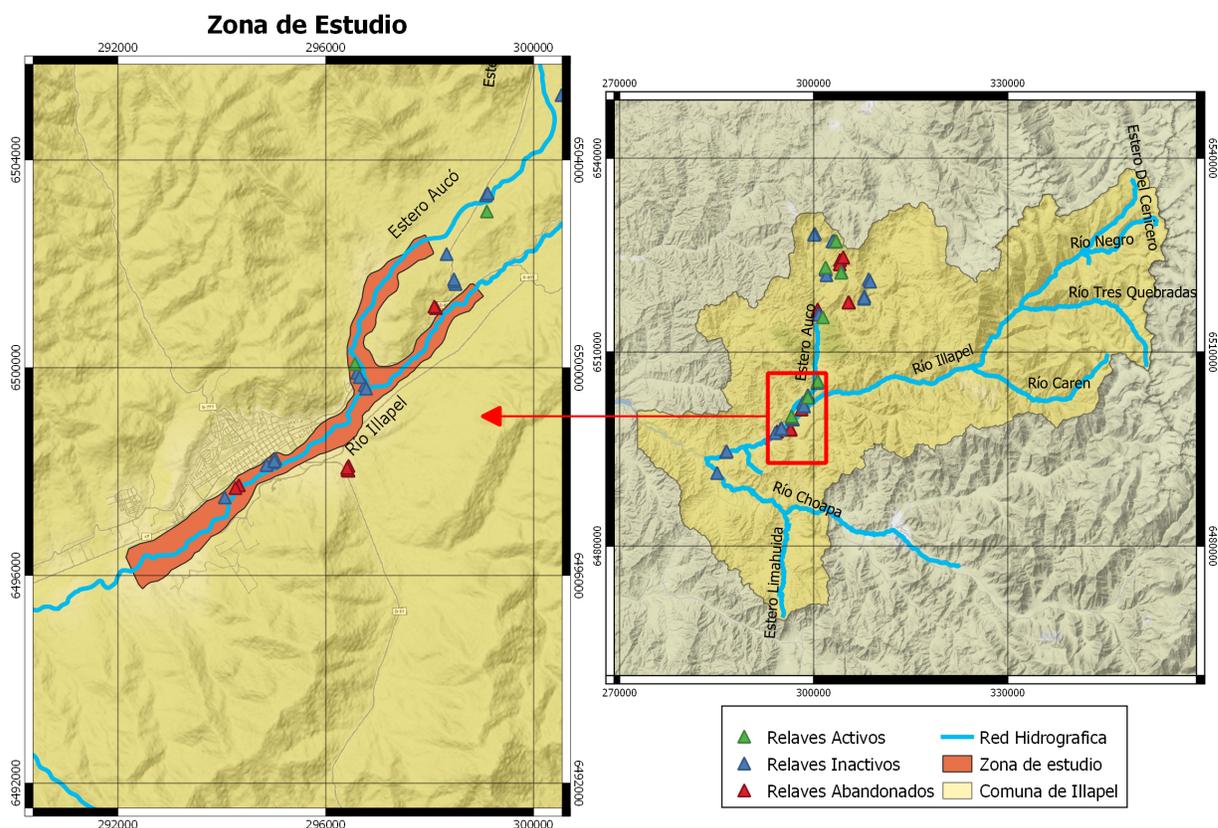
2.7.3.3. GAIA

GAIA es un nuevo modulo basado en SISYPHE pero con mejoras, correcciones y optimizaciones (Benson et al., 2019). Incluye 10 fórmulas de gasto sólido de fondo, entre ellas la de Wilcock y Crowe (2003) (Hervouet y Ata, 2020a), la cual permite modelar el efecto de coraza que se produce en lechos de granulometría extendida (Niño, 2019).

Capítulo 3

Caracterización de la zona de estudio

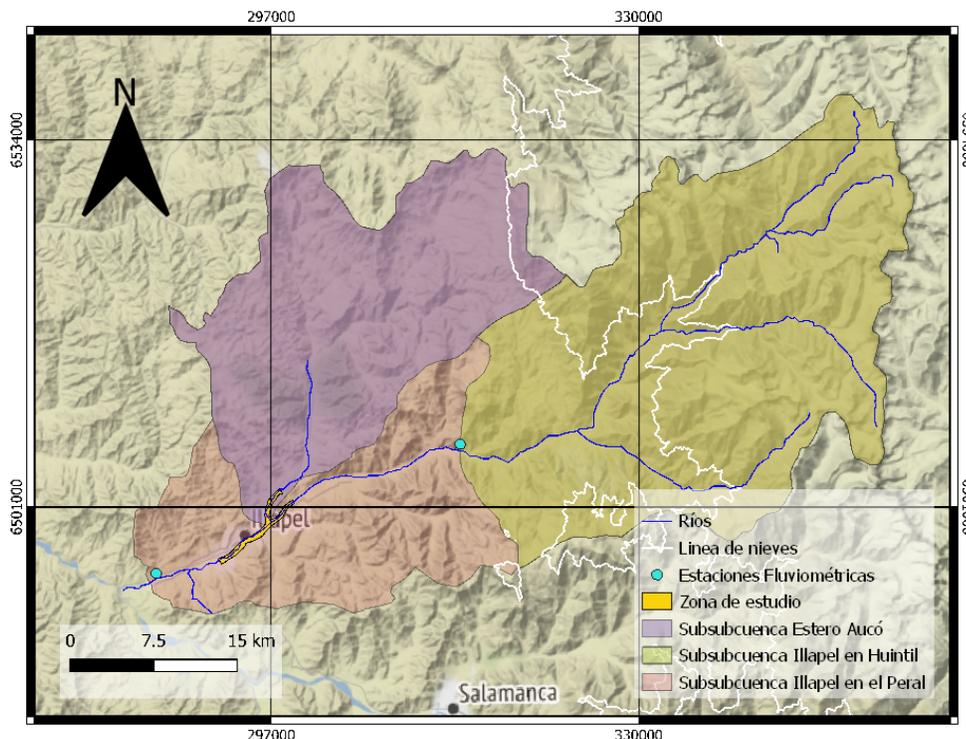
La zona de estudio se encuentra ubicada en la comuna de Illapel, IV región de Coquimbo. Corresponde a aproximadamente 12 km de cauce y 521 hectáreas que comprenden una zona del río Illapel y estero Aucó, ubicados en la Subcuenca del Río Illapel (Figura 3.1).



Figuras 3.1: Zona de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SERNAGIOMIN y Mapoteca del BCN.

En la comuna de Illapel, según el catastro de Depósitos de Relaves en Chile de 2020, existen 65 depósitos: 7 en estado activo, 40 inactivos y 18 abandonados. Estos se ubican muy cercanos a las cajas de los cauces de los ríos y se concentran aguas arriba del Estero Aucó. En la zona de estudio, se cuenta con 10 relaves que pueden observar en la Figura 3.1.

La subcuenca del Río Illapel es una cuenca pluvio-nival con una línea de nieve ubicada a 2190 m.s.n.m según Peña y Vidal (Ministero de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 1995). Esta se puede subdividir en la subcuenca Río Illapel en el Peral, la cual contiene a las subcuencas Río Illapel en Huintil y Estero Aucó (Figura 3.2). Los parámetros importantes de cada una de estas se presentan en la Tabla 3.1.



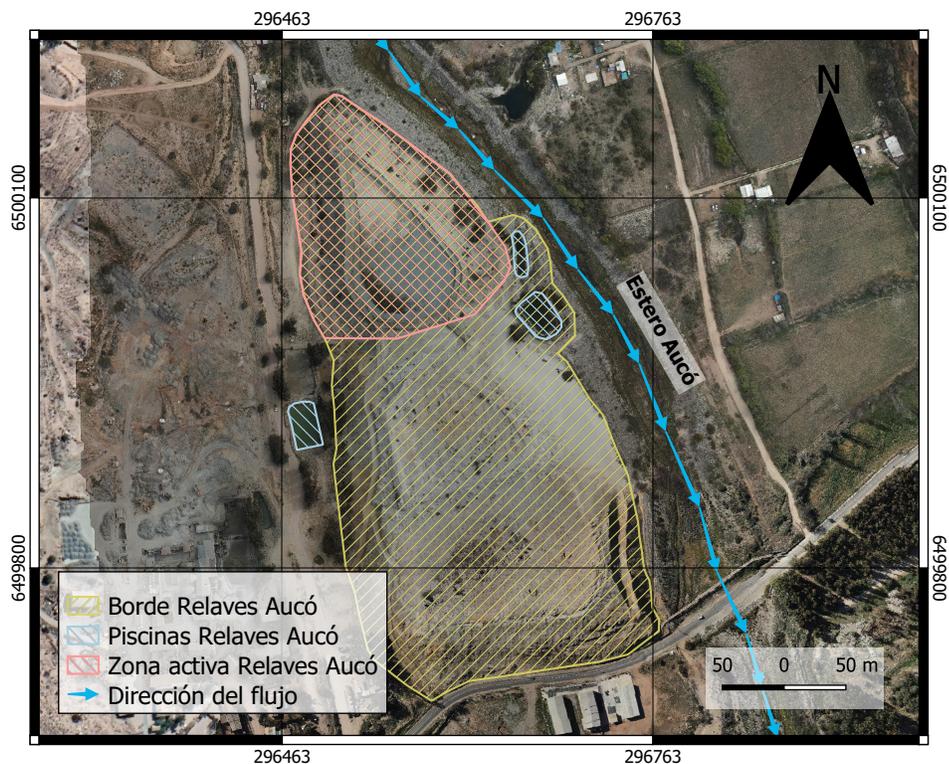
Figuras 3.2: subcuencas de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IDE.

Tabla 3.1: Parámetros subcuencas.

subcuenca	Illapel en Huintil	Illapel en el Peral	Estero Aucó
Área Total [km^2]	1035,59	2045,64	587,18
Área Pluvial A_p [km^2]	338,40	1323,94	565,50
Longitud Cauce L [km]	49,10	80,89	45,14
Máximo desnivel ΔH [m]	2657	3125	2125

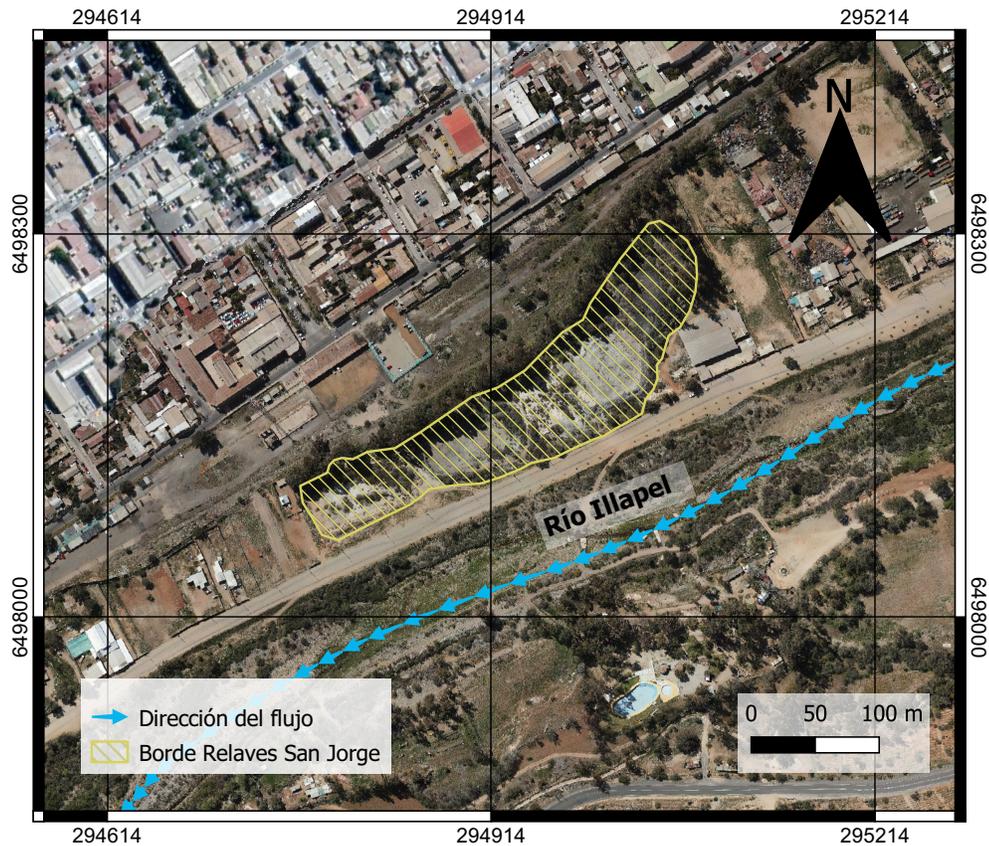
Como se estableció anteriormente, la zona de estudio cuenta con 10 relaves de gran interés por su cercanía a los cauces de los ríos. Para facilitar su análisis, se subdividen en tres grupos:

El primer grupo será llamado en conjunto “Relaves Aucó” (Figura 3.3). Se encuentra ubicado a un costado del Estero Aucó, justo antes del cruce con el Río Illapel. Este se compone de 3 depósitos de relaves apegados. Dos son del año 1987, actualmente inactivos y pertenecientes a una faena de explotación de cobre y oro. Ambos fueron construidos con el método aguas arriba, actualmente prohibido en Chile debido a su inestabilidad sísmica (Ramírez, 2007). El tercero, del año 1990 y elaborado mediante método de eje central, aún se encuentra activo y pertenece la faena El Arenal de explotación de oro. Se observa que este tranque cuenta con algunas piscinas de acumulación de aguas y, en su lado oeste, mucho relave seco derramado sobre suelo no perteneciente al tranque.



Figuras 3.3: Relaves Aucó.

El segundo grupo será llamado “Relaves San Jorge” (Figura 3.4), ubicado frente a la ciudad de Illapel y a un costado del Río Illapel. Este está compuesto por 4 relaves inactivos construidos con el método aguas arriba entre 1985-1988. Tres de estos pertenecieron a la faena San Jorge de explotación de Cobre.



Figuras 3.4: Relaves San Jorge.

El tercer grupo será llamado “Relaves Estadio Illapel” (Figura 3.5), ubicados frente al Estadio Illapel y a un costado del Río Illapel. Este se compone de 3 relaves. Dos de ellos, de 1987, se encuentran en estado abandonado y pertenecieron a faenas de explotación de cobre-oro. El tercero, construido con el método de embalse en el 2014, se encuentra en estado inactivo y también perteneció a una faena de explotación de cobre-oro. Hay que destacar que los embalses abandonados se encuentran bastante manipulados por el hombre, funcionando como basural, depósito de autos y neumáticos, entre otros usos.



Figuras 3.5: Relaves Estadio Illapel.

Capítulo 4

Metodología

4.1. Caudales

Para dar inicio al modelo de crecidas y arrastre de sedimentos, es necesario calcular el caudal para distintos periodos de retorno en los contornos aguas arriba de la zona de estudio. Como se observa en la Figura 3.1, esta cuenta con dos contornos, uno ubicado en el río Illapel y otro ubicado en el Estero Aucó.

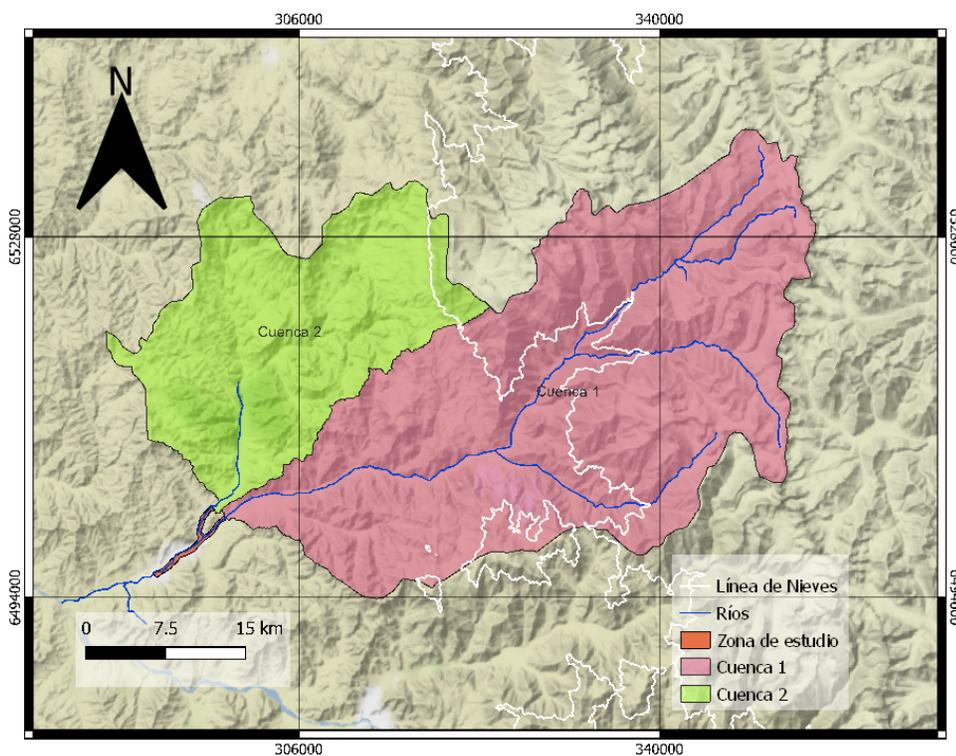
En primer lugar, se procedió a calcular el caudal (Q) para distintos periodos de retorno en cada subcuenca. En el caso de la subcuenca Illapel en Huintil, se realizó un relleno de datos de los caudales máximos medios diarios (QMd) de la estación fluviométrica Illapel en Huintil con las estaciones Illapel en el Peral e Illapel en las Burras como estaciones candidatas. Además, se realizó un análisis de consistencia de datos con curvas doblemente acumuladas. Se decidió tomar datos entre los años hidrológicos¹ 1981-1982 y 2007-2008 pues en el año 2012 comenzó la operación del embalse el Bato, ubicado aguas arriba de la estación, el cual ha influido en las toma de datos desde su construcción hasta hoy. Además, dado que la cuenca es nivo-pluvial, se separó en periodo pluvial (abril-septiembre) y periodo nival (octubre-marzo). Mediante una regresión lineal entre los caudales máximos medios diarios y los datos de caudales máximos instantáneos (QMi) existentes, se calculó el caudal máximo instantáneo para todos los años. Finalmente se realizó un análisis de frecuencia de los QMi que permitió obtener los caudales para distintos periodos de retorno. El mismo procedimiento y para los mismos años fue realizado en la subcuenca Illapel en el Peral con los datos de la estación Illapel en el Peral. En el Anexo A se presentan las ecuaciones utilizadas para rellenar cada estación junto al estadístico r^2 . También se presenta el detalle de correcciones mediante CDA y las ecuaciones para la obtención del QMi.

En la subcuenca Estero Aucó, dado que no se posee control fluviométrico, se calculó la precipitación para un periodo de retorno de 10 años (P_{24}^{10}) mediante las isoyetas del estudio “Precipitaciones. Máximas en 1, 2 y 3 días”. A partir de esta, se calcularon los caudales para distintos periodos de retorno con el método DGA-AC, Verni y King Modificado y fórmula

¹ Un año hidrológico comprende desde abril hasta marzo del siguiente año

racional. Para validar el uso de las isoyetas, se realizó el mismo procedimiento con la sub-cuenca Illapel en Huintil e Illapel en el Peral y se comparó con los resultados obtenidos en el análisis de frecuencia. El método a utilizar se basa en aquel que posea lo menores errores positivos (es decir, entrega caudales mayores a lo real, nunca menores).

Elegido el método, mediante trasposición de caudales, se obtuvo el caudal en los contornos aguas arriba del modelo. Para el contorno en el Río Illapel (que comprende la Cuenca 1), se utilizó el caudal de la cuenca Río Illapel en Huintil y, para el contorno en el Estero Aucó (que comprende la Cuenca 2), el caudal de la subcuenca Estero Aucó. Para esto, fue necesario calcular el área correspondiente de cuenca en hasta los contornos, los cuales se observan en la Figura 4.1 y 4.1.



Figuras 4.1: Cuencas Inicio Modelo.

Tabla 4.1: Áreas cuencas Inicio Modelo.

Cuenca	Cuenca 1	Cuenca 2
Área Total [km^2]	1232,75	559,35
Área Pluvial A_p [km^2]	536,721	535,967

4.2. Topografía

Para la obtención de la topografía se ejecutó un vuelo con Dron con sistema Real Time Kinematics (RTK) con la finalidad de obtener menores errores de georeferenciación (entre 2 a 3 cm). Este vuelo fue realizado a fines de Septiembre del año 2022. Las imágenes georeferenciadas obtenidas fueron analizadas en el programa Agisoft Metashape Professional donde se realizó la alineación de imágenes, obtención de nube de puntos, filtrado de vegetación y edificaciones y, finalmente, obtención del Modelo de Elevación Digital (MED) de terreno.

Mediante el programa BlueKenue se trazaron perfiles longitudinales y transversales para continuar con el cálculo del número de Manning. Dado el perfil longitudinal, se realizó una interpolación lineal la cual permite obtener una pendiente promedio de terreno.

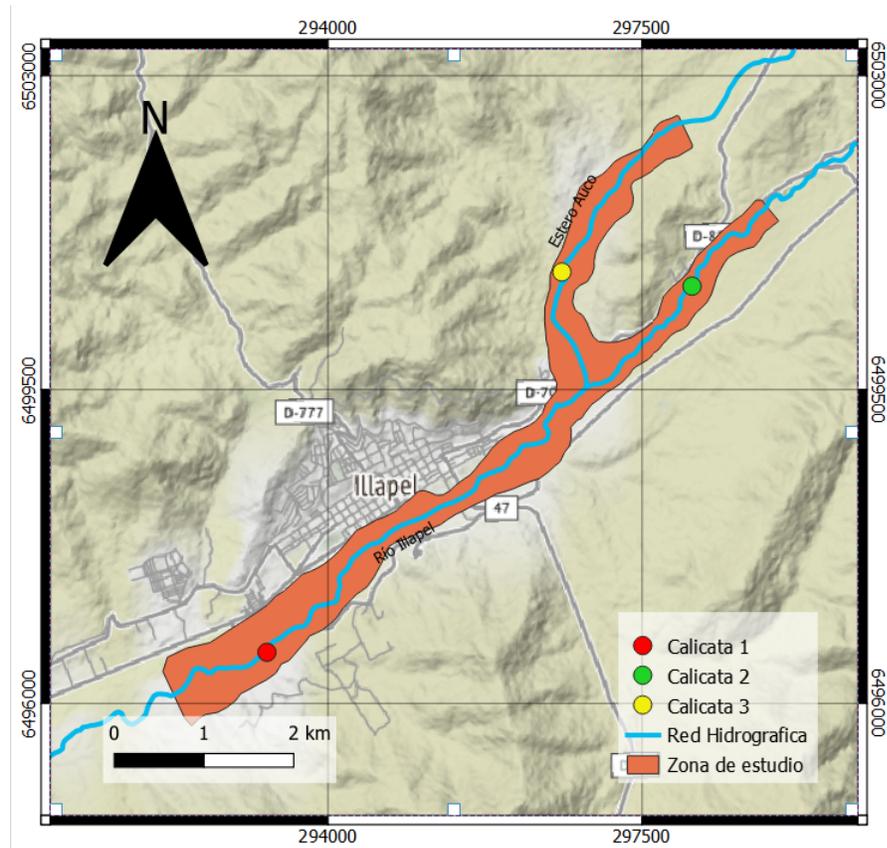
4.3. Grilla

Para realizar la grilla para los modelos de crecidas y arrastre de sedimentos se utiliza el programa Bluekenue, el cual permite obtener grillas no estructurada en base a elementos triangulares. Para el cauce principal se malló en la dirección del flujo considerando 30 nodos a lo ancho y nodos cada 10 metros a lo largo. En zonas de inundación se estableció una grilla de triángulos de 10 metros de lado y, para los depósitos de relaves, un mallado denso alcanzando triángulos de hasta 1 metro de lado. Para obtener una menor cantidad de nodos y optimizar el modelo, se redujo el dominio de la grilla a un tamaño menor al MED de terreno obtenido, considerando como bordes límite las áreas de inundación para los mayores caudales posibles.

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

4.4. Granulometría y número de Manning

Para la obtención de la granulometría de la zona se realizaron tres calicatas en terreno. La ubicación de estas se presenta en la Figura 4.2 y Tabla 4.2.



Figuras 4.2: Ubicación de las Calicatas.

Tabla 4.2: Coordenadas Calicatas (UTM)

Nombre	Este [m]	Norte [m]
Calicata 1	293312.9	6496566.5
Calicata 2	298065.8	6500651.4
Calicata 3	296600.9	6500809.3

Las calicatas fueron realizadas de una dimensión de $0,6 \times 0,6 \times 0,6 [m^3]$ en el centro del lecho de los ríos (Figura 4.3).



Figuras 4.3: Calicata 2

Se tomaron muestras cada 20 centímetros, las cuales dan origen a tres curvas granulométricas por calicata. La metodología realizada para tamizar las muestras fue la siguiente:

1. Tamizado los primeros 20 centímetros de calicata por una malla de 2,6”.
2. Pesaje del total mallado y el retenido.
3. Pesaje de bolones mayores a 2,6” aparte y cálculo de su diámetro promedio.
4. Cuarteo y análisis en laboratorio en tamices bajo norma ASTM de las muestras que pasan la malla de 2,6”.
5. Repetir desde el paso 1 a 4 con las siguientes dos capas de 20 centímetros.

A partir de los pesos y tamaños de los sedimentos sobre la malla de 2,6” medidos en terreno, se formó una curva granulométrica. Esta se unió a la curva creada por los sedimentos analizados en laboratorio, los cuales se pasaron a peso equivalente de terreno. Las curvas granulométricas permitieron obtener distintos diámetros característicos como el D_{90} utilizado para el cálculo del número de Manning y diámetros de distintas clases de sedimentos para el arrastre de sedimentos.

Se propone la siguiente metodología de cálculo de Manning para los cauces, el cual es iterativo (Rivera, 2022):

A partir de la geometría representativa del cauce, caudales en los cauces para distintos periodos de retorno y pendiente en cada tramo se procede de la siguiente forma:

1. Se calcula n_s mediante la ecuación 2.22.
2. Se asume un $n_0=0$ y se calcula n con la ecuación 2.25.
3. Reemplazando Q , A ($Q/A = U$), S , R_h y n en la ecuación 2.20 se obtiene un h_n . Dado que R_h y A dependen de h_n se debe utilizar algún solver.
4. Con el valor de h_n se calcula el R_h .
5. Reemplazando D_{90} y R_h en la ecuación 2.24 se obtiene S_t .
6. Reemplazando S_t , g y D_{90} en la ecuación 2.23 se obtiene un nuevo n .
7. Se calcula un nuevo $n_{s(i+1)}$ con la ecuación 2.25.
8. Se calcula la diferencia entre el n_{si} y $n_{s(i+1)}$. De ser pequeña se mantiene el valor de n_{si} , de ser alta, se vuelve a iterar desde el punto 2 con el nuevo valor de n_s

Hay que destacar que se debe verificar que R_h/D_{90} sea menor que 10, de lo contrario $S_t = 0, 12$

En las áreas de inundación se establecieron Mannings distintos de acuerdo a criterios de tipo de suelo.

A la grilla realizada se le asignaron los valores de los números de Manning, permitiendo obtener el archivo necesario para la simulación del modelo (parte del archivo SELAFIN).

4.5. Condiciones de borde

Para las condiciones de borde de crecidas es necesario saber si los flujos en las entradas y salida del modelo son supercríticos ($Fr > 1$) o subcríticos ($Fr < 1$). Dependiendo de si es entrada o salida y el tipo de flujo, se deben ingresar distintos parámetros. Estos se indican en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Parámetros de ingreso al modelo

Tipo Flujo	Borde Entrada	Borde Salida
Supercrítico	Caudal y Elevación	Opcional: Elevación
Subcrítico	Caudal o Elevación	Caudal o Elevación

También se calcula el espejo de agua para ingresar un tamaño de condición de borde igual o mayor al espejo de agua real, permitiendo que ingrese de forma correcta el caudal. Para esto, se modelan las crecidas en el programa HEC-RAS, los cuales entregan un aproximado de espejo de agua, así como también cotas de crecidas.

Para las condiciones de borde de arrastre de sedimentos, es necesario calcular los gastos sólidos de fondo (en $kg/(ms)$) en las entradas mediante las formulas presentadas en la Sección 2.5.2. Esto es necesario para evitar lo más posible socavaciones del lecho o acumulaciones de sedimentos en las entradas. Para su cálculo son necesarios los diámetros obtenidos en las calicatas, perfiles de crecidas en los bordes para radios hidráulicos y pendientes en las entradas.

4.6. Simulación de crecidas

Para cada simulación de crecidas se utiliza el modulo de TELEMAC-2D con el predeterminado solver que resuelve las ecuaciones de Saint-Venant para elementos finitos. Para esto se crea un archivo **.CAS** (*modelo.cas*) en el cual son necesarios 2 archivos:

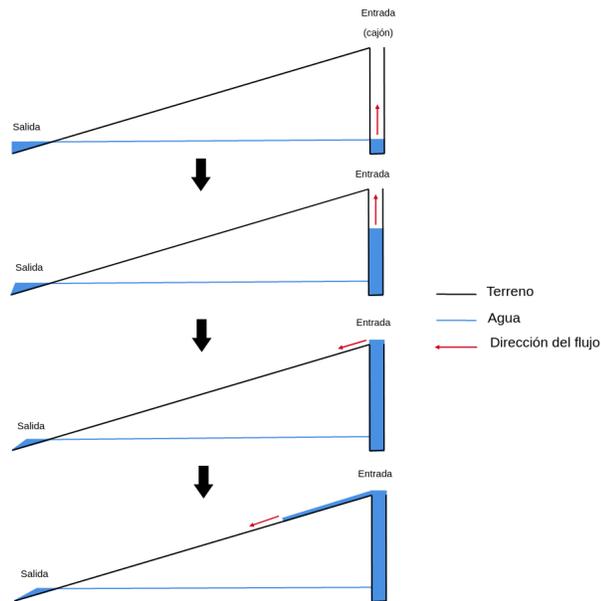
1. **GEOMETRY FILE:** Archivo *Geometria.slf* que contiene la grilla del modelo interpolada con la topografía y números de Manning.
2. **BOUNDARY CONDITIONS FILE:** Archivo *CondicionesBorde.cli* que contiene el tamaño y tipo de las condiciones de borde.

Algunos parámetros importantes a definir son:

1. **PRESCRIBED FLOWRATES:** Permite ingresar los caudales de entrada y salida del modelo. En este caso se modela un pulso de caudal con duración de 5 horas, lo cual se traduce en un hidrograma cuadrado². El modelo al alcanzar 1 hora de de crecidas, no aumenta su área de inundación. Por esta razón se deja correr por unas horas más, con el fin de asegurar que no existan cambios en la crecida.
2. **PRESCRIBED ELEVATIONS:** Permite definir los valores de alturas de flujo en los bordes. En este caso, se ingresan solo a la salida y no en la entrada pues se imponen flujos subcríticos. En Telemac, es necesario que el modelo esté “mojado” para comenzar a correr. Una opción es inundar todo el modelo como si fuera una laguna imponiendo una altura mayor o igual a la máxima del terreno y esperar que se estabilice el flujo. No obstante, esta opción tarda mucho en estabilizarse y deja sectores “mojados” que en una crecida no deberían estarlo, dificultando un análisis correcto de inundaciones. Es por esto que se implementa otra opción, la cual consiste en incorporar un cajón en las entradas del modelo de una profundidad igual a la de la salida del modelo. El efecto de

² Se asume un hidrograma cuadrado puesto que el hidrograma correspondiente de cada caudal no fue calculado

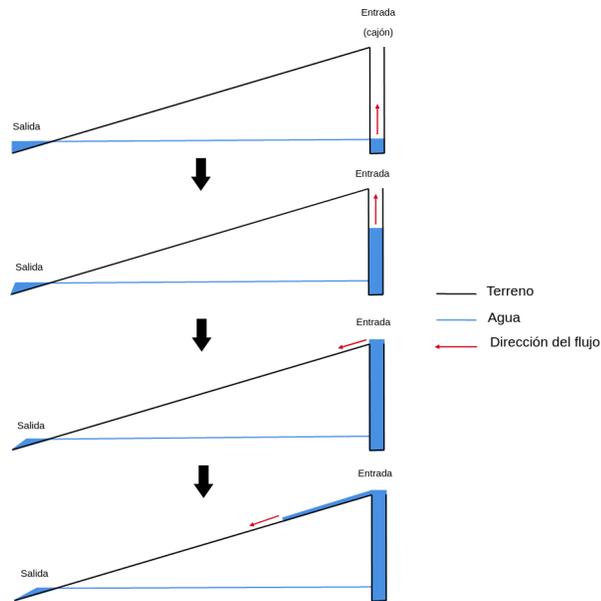
este cajón se explica en la Figura 4.5. Esta opción permite imponer flujos subcríticos a la entrada del modelo.



Figuras 4.4: Figura conceptual topografía con cajón.

3. **VELOCITY PROFILES:** Se ingresa un valor de 1 para todos los bordes, lo cual significa imponer un vector de velocidad normal al borde.
4. **OPTION FPOR 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* (**RESULTS FILE**) que contiene las velocidades (WATER VELOCITY), profundidad del agua (WATER DEPTH), superficie libre (FREE SURFACE), Froude (FROUDE NUMBER) y Courant (COURANT NUMBER).



Figuras 4.5: Figura conceptual topografía con cajón.

De esta forma, en el modelo se ingresan en las entradas los caudales y en la salida una cota de agua estimada con HEC-RAS.

4.7. Simulación de arrastre de sedimentos

Para el arrastre de sedimentos se utilizó el complemento GAIA-MORPHODINAMICS, el cual también resuelve las ecuaciones de Exner para la morfología del cauce. Para esto, es necesario tener el modelo de crecidas. No obstante, el cajón realizado en el modelo a la entrada anteriormente simularía una acumulación de sedimentos en los bordes incorrecta. Es por esto que se opta por realizar una modificación a los modelos de crecidas: se reduce el tamaño a la entrada del modelo, unos metros más aguas abajo, donde ya no se encuentra el cajón y, en ese sector, se extraen las alturas y tamaños de las condiciones de borde de la crecida obtenidas anteriormente. Así, se opta por un inicio con entradas de caudal y cota de agua en las entradas y cota fija a la salida. Para este modelo se decidió modificar de valor de **OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES** a 2, el cual calcula velocidades mediante el método de Thompson y toma las alturas en los bordes solo como sugerencias (Hervouet y Ata, 2020b). Esto se realiza porque la cota de agua impuesta, si bien se extrae de los resultados anteriores de crecidas, es un promedio dado que no es constante transversalmente debido al modelo de turbulencia.

Así, se copia el archivo **.CAS** de la simulación anterior y se modifica lo ya mencionado. Para simular el arrastre de sedimento se acopla el modelo a GAIA-MORPHODINAMICS

adicionando el comando **COUPLING WITH : 'GAIA'** y un archivo **.CAS** que modela los sedimentos llamado *gaia-morphodynamics.cas*. Algunos parámetros importantes de este último archivo son:

1. **CLASSES TYPE OF SEDIMENT**: Permite ingresar el tipo de sedimento. En este caso se define como no-cohesivo (NCO) dado el bajo porcentaje de arcillas presentes en la muestra de suelos.
2. **CLASSES SEDIMENT DIAMETERS**: Permite ingresar los diámetros de los sedimentos, los cuales se separaron en tres clases: bolones, gravas y arenas.
3. **CLASSES INITIAL FRACTION**: Define la fracción de cada clase sedimento.
4. **CLASSES SEDIMENT DENSITY**: Define la densidad del sedimento. En este caso se establece un valor de 2.680 kg/m^3 para todos los sedimentos.
5. **BED-LOAD TRANSPORT FORMULA FOR ALL SANDS**: Define la fórmula de arrastre de sedimentos a utilizar. En este caso se ha utilizado la ecuación de Wilcock y Crowe, para la cual corresponde el número 10. Para demostrar diferencias con otro método, se eligió la fórmula de Peter-Meyer y Muller, para la cual corresponde el número 1.
6. **PRESCRIBED SOLID DISCHARGES**: Define el gasto sólido de fondo a las entradas del modelo en $[\text{kg/m/s}]$, los cuales se calcularon a partir de las fórmulas de Wilcock y Crowe presentadas en la 2.5.2.
7. **NUMBER OF LAYERS FOR INITIAL STRATIFICATION y LAYERS INITIAL THICKNESS**: Permite describir la cantidad de capas activas presentes y su espesor. En este caso se ha definido solo una capa activa, de espesor igual al d_{90} . Hay que destacar que cuando se trata de erosiones, sólo se toma en cuenta la masa disponible en la capa activa (Hervouet y Ata, 2020a).

GAIA permite realizar correcciones de la magnitud y dirección del gasto sólido debido a tres factores: pendiente local del lecho, corrientes secundarias y división del esfuerzo de corte por fricción superficial y fuerzas de arrastre por efecto de forma del lecho.

En cuanto a la dirección, las correcciones se realizan en base a la fórmula de van Bendegon que relaciona el ángulo entre la dirección x y dirección del gasto sólido de fondo (α) con el ángulo entre la dirección del gasto sólido y flujo (δ) y, pendientes transversales ($\partial Z_b/\partial x$) y longitudinales ($\partial Z_b/\partial y$) del lecho :

$$\tan\alpha = \frac{\sin\delta - \frac{1}{f(\theta)}\partial Z_b/\partial x}{\sin\delta - \frac{1}{f(\theta)}\partial Z_b/\partial y} \quad (4.1)$$

En cuanto a $f(\theta)$, corresponde a una función que le da peso a la influencia de la pendiente transversal del lecho, a partir del parámetro de Shield θ . En cuanto a esta corrección, se decide dejar el default el cual asigna esta corrección mediante la fórmula de Kosh y Flokstra:

$$f(\theta) = \frac{3}{2\theta} \quad (4.2)$$

Se puede realizar una corrección por corrientes secundarias para el ángulo δ pero se ha decidido no considerarla (default del programa). En cuanto a la corrección por el esfuerzo de corte, se asume que tanto la componente por fricción como forma del lecho afectan al gasto sólido de fondo (y no solo la componente por fricción, lo cual ocurre realmente).

Respecto a la corrección de la intensidad del gasto sólido de fondo, se ha optado por el default, el cual utiliza la fórmula de Kosh y Flokstra con un parámetro $\beta = 1,3$ (Hervouet y Ata, 2020a):

$$Q_b^* = Q_b \left(1 + \beta \left(\frac{\partial Z_b}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial Z_b}{\partial y} \sin \alpha \right) \right) \quad (4.3)$$

Capítulo 5

Resultados y discusión

5.1. Caudales

Los caudales para distintos periodos de retorno y periodos nivales-pluviales de las subcuencas con control fluviométrico se presentan en la Tabla 5.1 para Illapel en Huintil y la Tabla 5.2 para Illapel en el Peral. En estas se presenta también la distribución elegida en el análisis de frecuencia, cuyo criterio de selección se basó en aquella distribución que se acercara más a la data para los caudales más grandes.

Tabla 5.1: Caudales Máximos Instantáneos Illapel en Huintil.

Illapel en Huintil		
	Abr-Sept	Oct-Mar
Periodo de retorno (T) [Años]	QMi [m^3/s]	QMi [m^3/s]
2	15,8	14,9
5	43,8	40,4
10	74,8	57,4
20	116,1	73,6
50	190,7	94,7
100	265,3	110,4
Distribución	Log-Normal	Gumbel

Tabla 5.2: Caudales Máximos Instantáneos Illapel en el Peral.

Illapel en el Peral		
Periodo de retorno (T) [años]	Abr-Sept	Oct-Mar
	QMi [m^3/s]	QMi [m^3/s]
2	25,64	5,3
5	73,45	23,6

Tabla 5.2: Caudales Máximos Instantáneos Illapel en el Peral.

Illapel en el Peral		
Periodo de retorno (T) [años]	Abr-Sept	Oct-Mar
	QMi [m^3/s]	QMi [m^3/s]
10	127,24	51,5
20	200,15	97,9
50	333,00	201,6
100	467,35	326,2
Distribución	Log-Pearson	Log-Pearson

El detalle de los rellenos de datos, CDA, regresiones lineales y análisis de frecuencia se presenta en el Anexo A. Los valores de caudales presentados dan a conocer que la cuenca es pluvio-nival, alcanzando sus mayores caudales en la época de invierno.

Las precipitaciones en 24 horas para un periodo de retorno de 10 años (Pp_{24}^{10}) obtenidas para cada subcuenca mediante isoyetas se presentan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Precipitaciones en 24 horas para T=10 años.

Subcuenca	Illapel en Huintil	Illapel en el Peral	Estero Auc
Pp_{24}^{10} [mm]	107,18	94,72	92,94

La Tabla 5.4 muestra los resultados de caudales obtenidos con distintos métodos para la subcuenca Illapel en Huintil junto al error de cada método comparado con los datos obtenidos en el periodo de abr-sept presentados en la Tabla 5.1. La Tabla 5.5 presenta los resultados obtenidos para Illapel en el Peral con el error comparado con los datos de abr-sept presentados en la Tabla 5.2.

Tabla 5.4: Caudales Illapel en Huintil obtenidos con distintos métodos.

Illapel en Huintil						
T [años]	DGA-AC		Verni y King Mod.		Método Racional	
	QMi [m^3/s]	Error [%]	QMi [m^3/s]	Error [%]	QMi [m^3/s]	Error [%]
2	26,37	40 %	10,21	-55 %	15,26	-4 %
5	65,94	34 %	35,40	-24 %	47,87	8 %
10	109,90	32 %	68,43	-9 %	87,77	15 %
20	176,93	34 %	118,40	2 %	145,34	20 %
50	286,83	34 %	221,25	14 %	258,56	26 %
100	403,32	34 %	335,56	21 %	379,50	30 %

Tabla 5.5: Caudales Illapel en el Peral obtenidos con distintos métodos.

Illapel en el Peral						
T [años]	DGA-AC		Verni y King Mod.		Método Racional	
	QMi [m^3/s]	Error [%]	QMi [m^3/s]	Error [%]	QMi [m^3/s]	Error [%]
2	31,66	19 %	29,08	12 %	41,32	38 %
5	79,15	7 %	100,87	27 %	129,58	43 %
10	131,92	4 %	195,01	35 %	237,61	46 %
20	212,40	6 %	337,39	41 %	393,48	49 %
50	344,32	3 %	630,48	47 %	700,00	52 %
100	484,16	3 %	956,24	51 %	1027,39	55 %

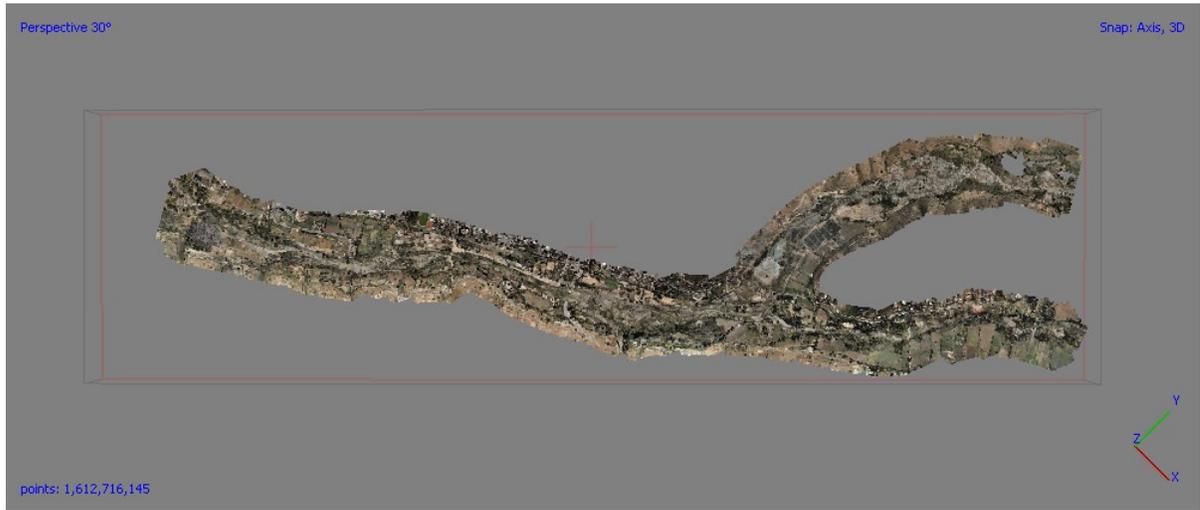
Finalmente, se elige el método DGA-AC para la subcuenca Illapel en Huintil y se obtienen los siguientes resultados para las cuencas del modelo:

Tabla 5.6: Caudales para el Modelo en cada Cuenca.

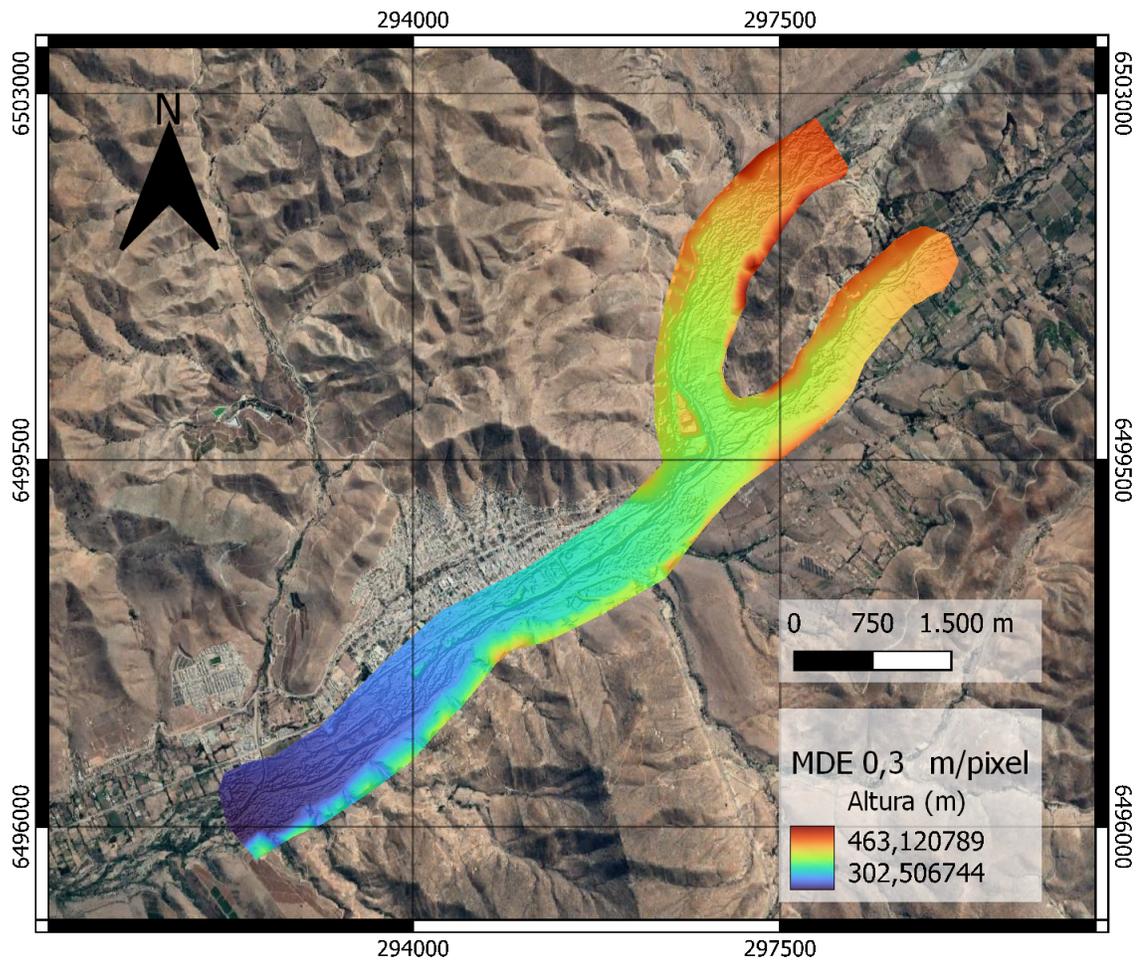
T [años]	Cuenca 1	Cuenca 2
	QMi [m^3/s]	
2	25,08	8,31
5	69,54	20,78
10	118,57	34,63
20	184,22	55,75
50	302,42	90,37
100	420,82	127,08

5.2. Topografía

Luego del filtrado de vegetación y edificaciones se obtuvo una nube densa de 1.612.716.145 puntos (Figura 5.1), la cual permitió obtener un MDE de 6,57 cm por pixel. No obstante, para un procesamiento más eficaz, se exportó en resolución de 0,3 m por pixel (Figura 5.2).

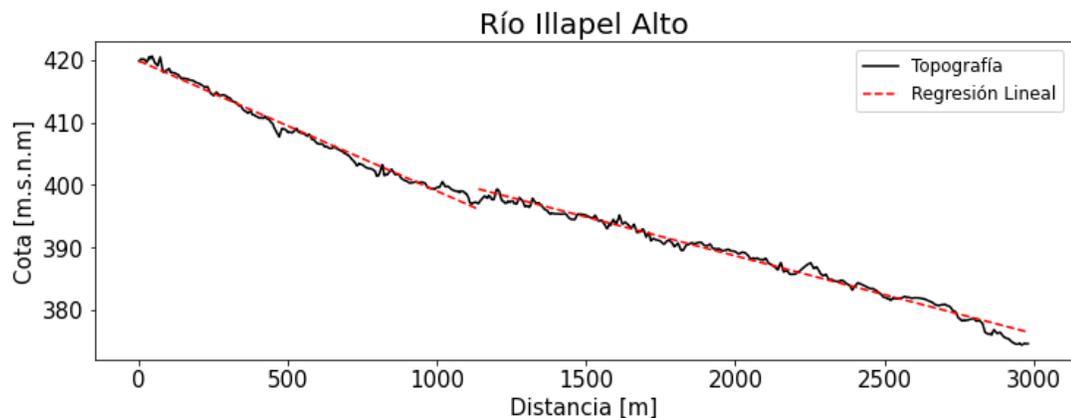


Figuras 5.1: Nube de Puntos Densa. Fuente: Icaro Films.

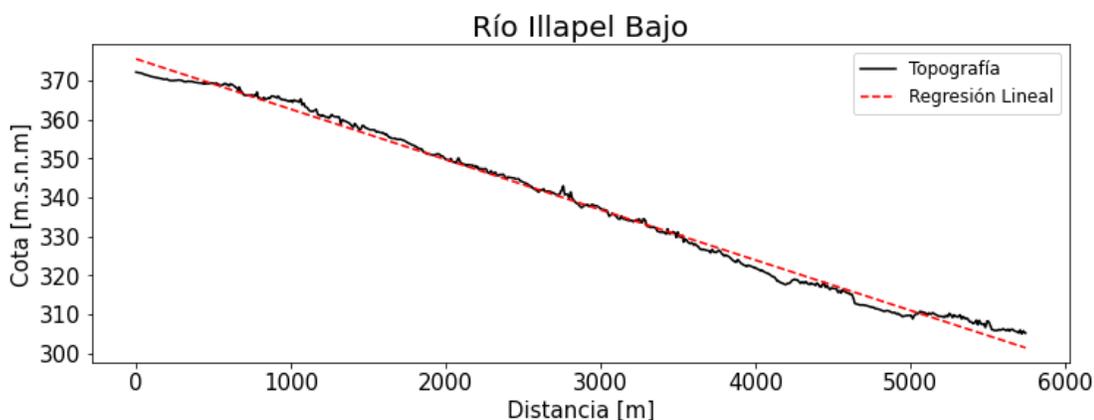


Figuras 5.2: MDE terreno. Fuente: Elaboración propia.

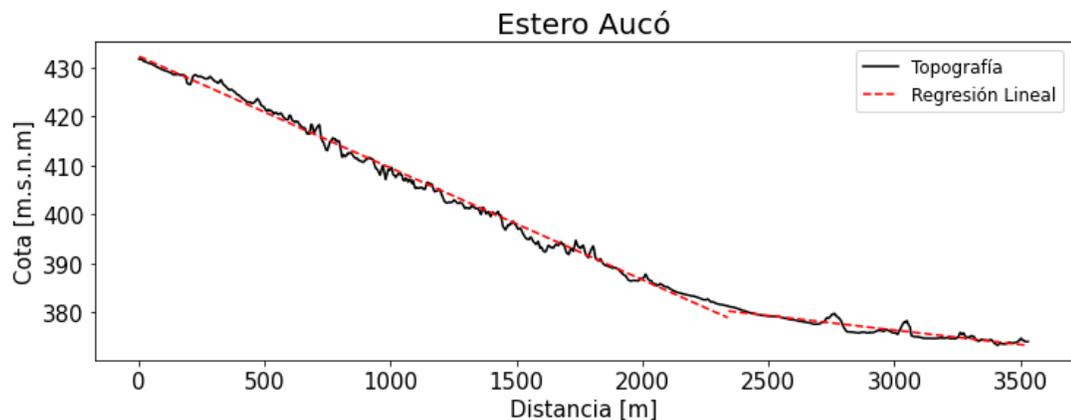
Se trazaron perfiles longitudinales en el eje medio de los ríos en BlueKenue permitiendo obtener la pendiente de cada tramo (Figura 5.3 a Figura 5.5) y los resultados se presentan en la Figura 5.7. Se le llama Illapel Alto al tramo del río Illapel ubicado aguas arriba del cruce con el estero Aucó y, Illapel Bajo, al ubicado aguas abajo.



Figuras 5.3: Perfil Longitudinal Illapel Alto.



Figuras 5.4: Perfil Longitudinal Illapel Bajo.

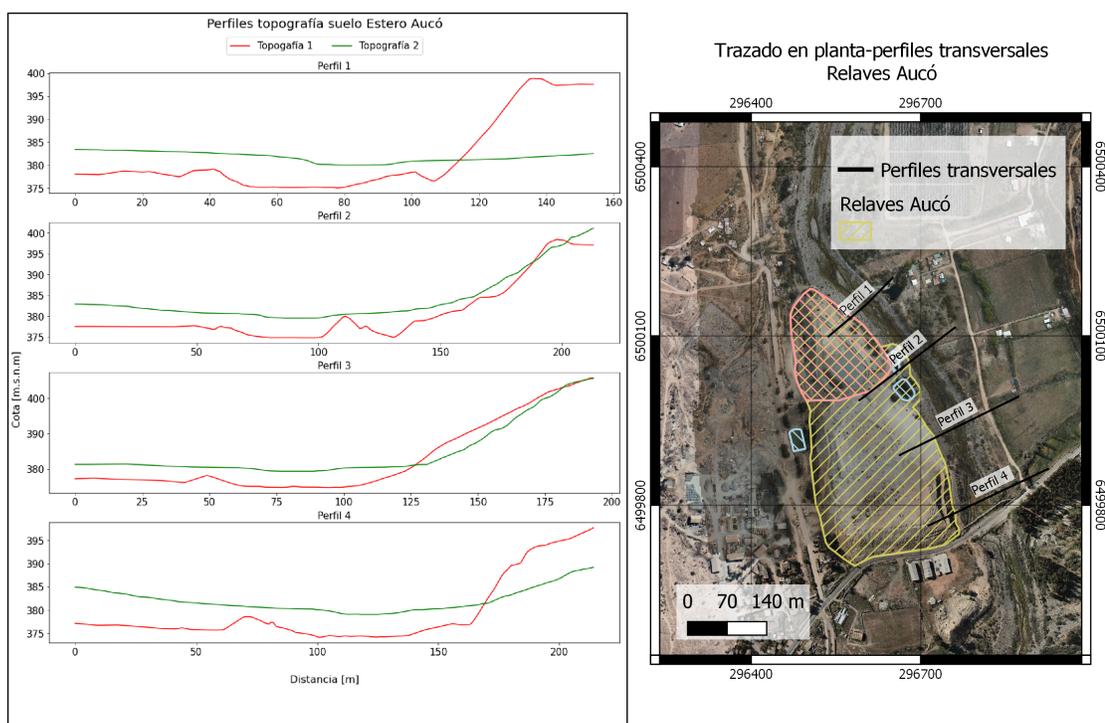


Figuras 5.5: Perfil Longitudinal Aucó.

Tabla 5.7: Pendientes Tramos

Tramo	Pendiente 1	Pendiente 2
Illapel Alto	0,0208	0,0124
Illapel Bajo	0,0129	
Aucó	0,0228	0,0059

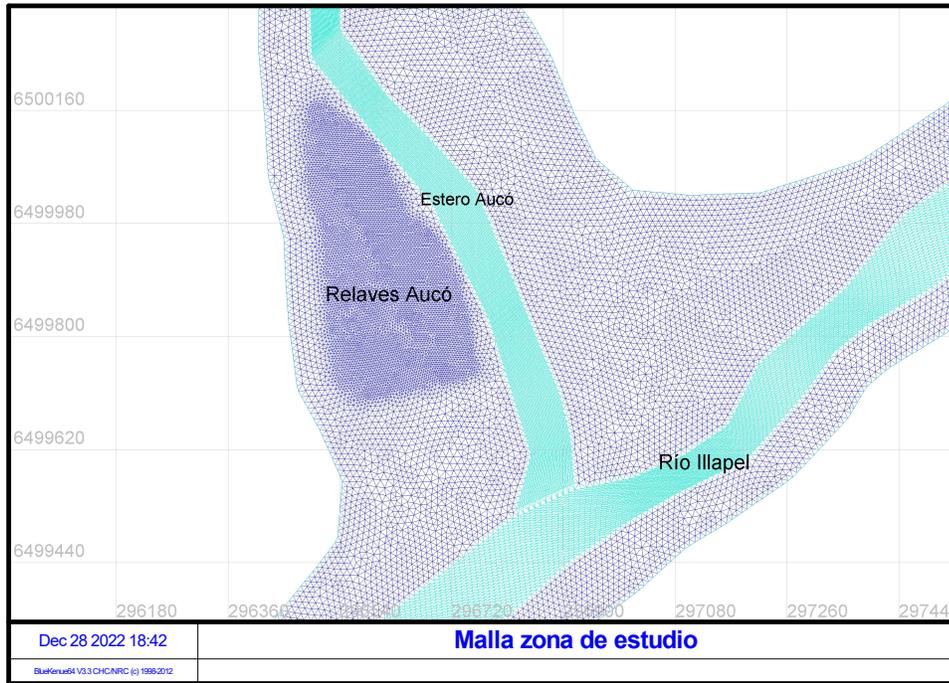
Se realizó una comparación con la topografía obtenida en el estudio de Rivera (2022). La Figura 5.6 muestra la diferencia de la topografía obtenida en este estudio (topografía 1) y la obtenida por Rivera (2022) (topografía 2) en la zona de los relaves Aucó. Aquí es importante observar la diferencia de detalles en los perfiles, pues la diferencia de cotas de fondo del cauce se mantiene en todos los perfiles. La topografía obtenida en este estudio muestra un mayor detalle del encauce generado. Además, específicamente, en el perfil 1 y 4 se logra captar el borde de los relaves Aucó, no captados en el estudio de Rivera (2022).



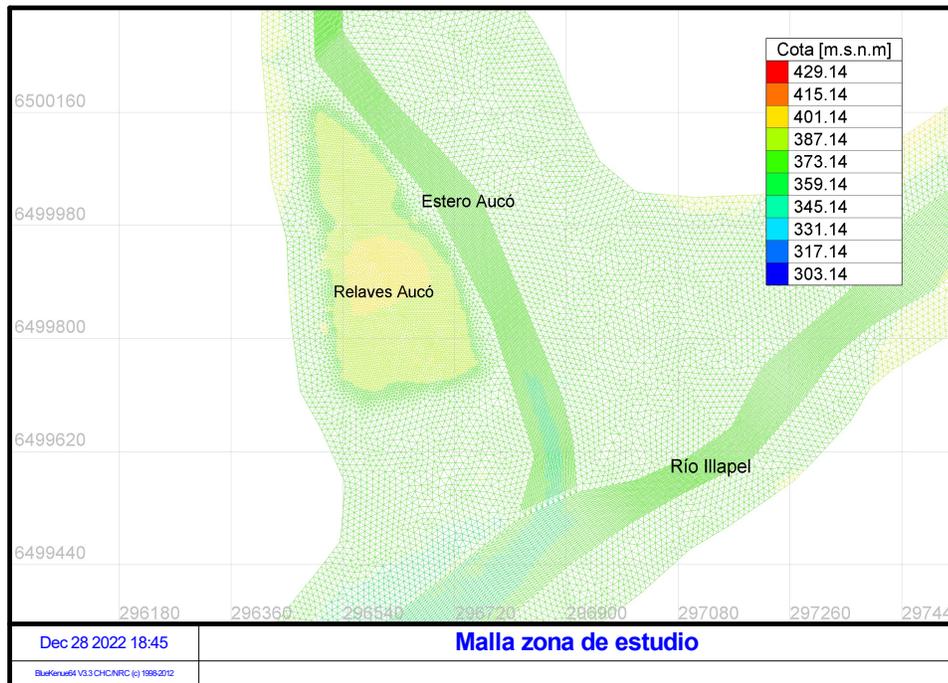
Figuras 5.6: Diferencia topografías Zona relaves Aucó. Fuente: Elaboración propia.

5.3. Grilla

El detalle de una zona de la grilla se presenta en la Figura 5.7. Esta muestra en detalle el cruce del estero Aucó y río Illapel y los “Relaves Aucó”. El mismo detalle de la grilla interpolada con la topografía se presenta en la Figura 5.8



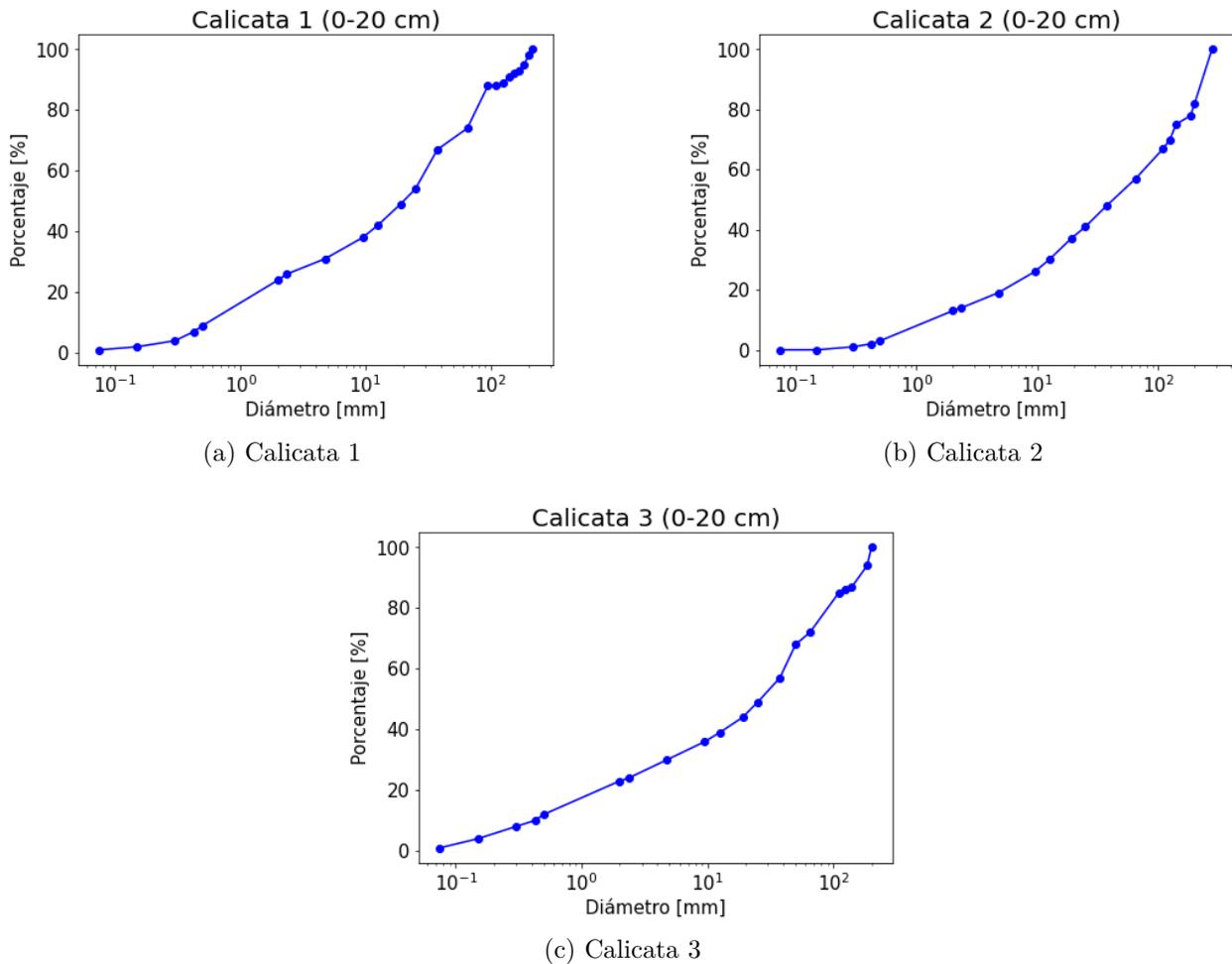
Figuras 5.7: Mallado zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.



Figuras 5.8: Mallado interpolado con geometría de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

5.4. Granulometría y número de Manning

A partir del análisis realizado en terreno y en laboratorio se obtienen las curvas granulométricas presentadas de la Figura 5.9 para los primeros 20 cm. Las curvas para demás estratos pueden encontrarse en el Anexo B.



Figuras 5.9: Curvas granulométricas estratos 0-20 cm.

Las curvas obtenidas presentan un leve comportamiento bimodal, el cual es esperable en ríos precordilleranos. Los diámetros característicos obtenidos para cada calicata en los primeros 20 cm se presentan en la Tabla 5.8. Esta muestra diámetros similares para las calicatas 1 y 3 mientras que la calicata 2 se escapa de estos valores. Esto se condice con lo visto en terreno en la zona de la calicata 2, donde los bolones de gran tamaño fueron más abundantes. En la Tabla 5.9 se presenta una clasificación de tipos de sedimentos junto con sus porcentajes asociados para cada calicata (también para los primeros 20 cm) y un promedio de estas, importantes para el arrastre de sedimentos. Aquí se puede visualizar detalladamente el comportamiento de los bolones en la calicata 2, donde no solo su porcentaje es mayor que en las otras calicatas sino que también el diámetro promedio de estos.

Tabla 5.8: Diámetros característicos.

Calicata	Rango[cm]	D90 [m]	d_{sm} [m]
Calicata 1	0-20	0,13	0,037
Calicata 2	0-20	0,23	0,071
Calicata 3	0-20	0,16	0,042

Tabla 5.9: Clasificación de diámetros.

Calicata	Tipo de sedimento	Diámetro promedio [m]	Porcentaje de cada sedimento
Calicata 1	Bolones	0,1103	26 %
	Grava	0,0177	49 %
	Arena	0,0005	25 %
Calicata 2	Bolones	0,1474	43 %
	Grava	0,0174	43 %
	Arena	0,0006	14 %
Calicata 3	Bolones	0,1128	28 %
	Grava	0,0211	48 %
	Arena	0,0004	24 %
PROMEDIO	Bolones	0,1235	32 %
	Grava	0,0187	47 %
	Arena	0,0005	21 %

Se realizó una comparación de los D90 obtenidos en terreno con los obtenidos en el estudio de Rivera (2022) donde los diámetros se calcularon mediante los datos de Ruz (1999) que analiza la variación del tamaño de los sedimentos del cauce con la pendiente, en diferentes ríos chilenos (Rivera, 2022). De la comparación se concluye que la metodología de Ruz subestima los diámetros. En el caso de la calicata 1 lo subestima en un 16 % mientras que la calicata 2 y 3 en un 44 % y 24 % respectivamente.

La metodología para el cálculo de Manning se realizó para distintos perfiles transversales a lo largo de los cauces y se promediaron. Los resultados obtenidos de n_s (Manning por diámetro de partícula) para cada tramo se presentan en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10: Número de Manning por diámetro de partícula.

Número de manning por diámetro de partícula [n]			
Periodo de retorno [T]	Illapel Bajo	Illapel Alto	Aucó
2	0,042	0,054	0,049
5	0,038	0,046	0,042
10	0,035	0,047	0,039
20	0,033	0,044	0,036
50	0,031	0,042	0,034
100	0,030	0,040	0,032

Se considera un $n_0 = 0,005$ por vegetación baja (Chow, 1994b) en todos los tramos (ver Figura 5.10) . Así, se logra obtener el valor final de número de Manning.



Figuras 5.10: Lecho Estero Aucó

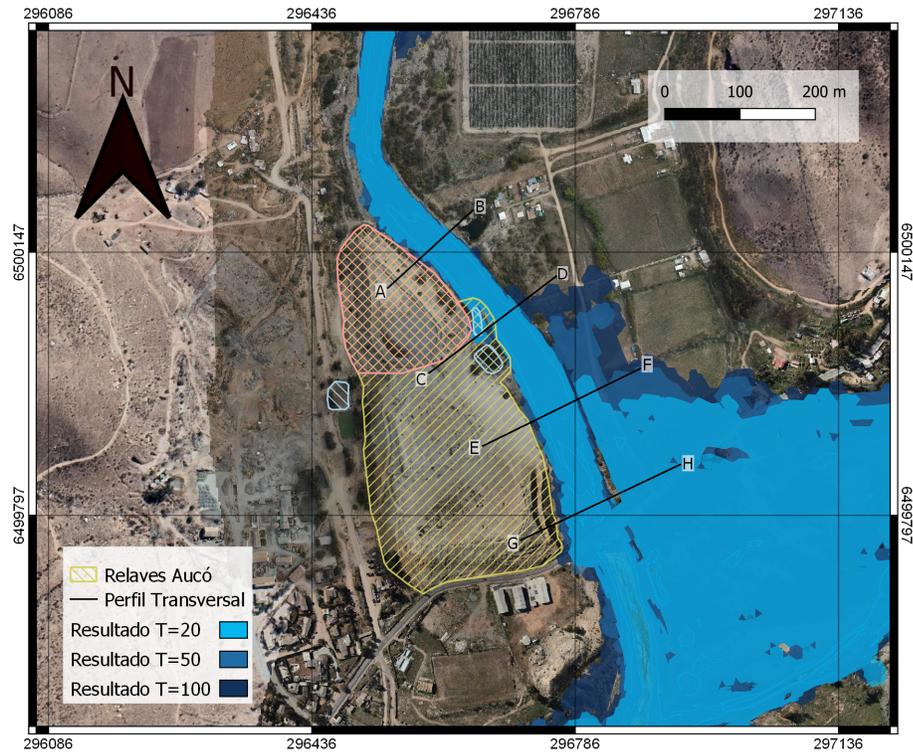
Tabla 5.11: Número de Manning.

Número de manning [n]			
Periodo de retorno [T]	Illapel Bajo	Illapel Alto	Aucó
2	0,047	0,059	0,054
5	0,043	0,051	0,047
10	0,040	0,052	0,044
20	0,038	0,049	0,041
50	0,036	0,047	0,039
100	0,035	0,045	0,037

Para las zonas que no corresponden al cauce se establece un Manning distinto. Para la zonas de inundación se establece un valor de 0,05 mientras que para los tranques de relaves un valor de 0,1.

5.5. Simulación crecidas

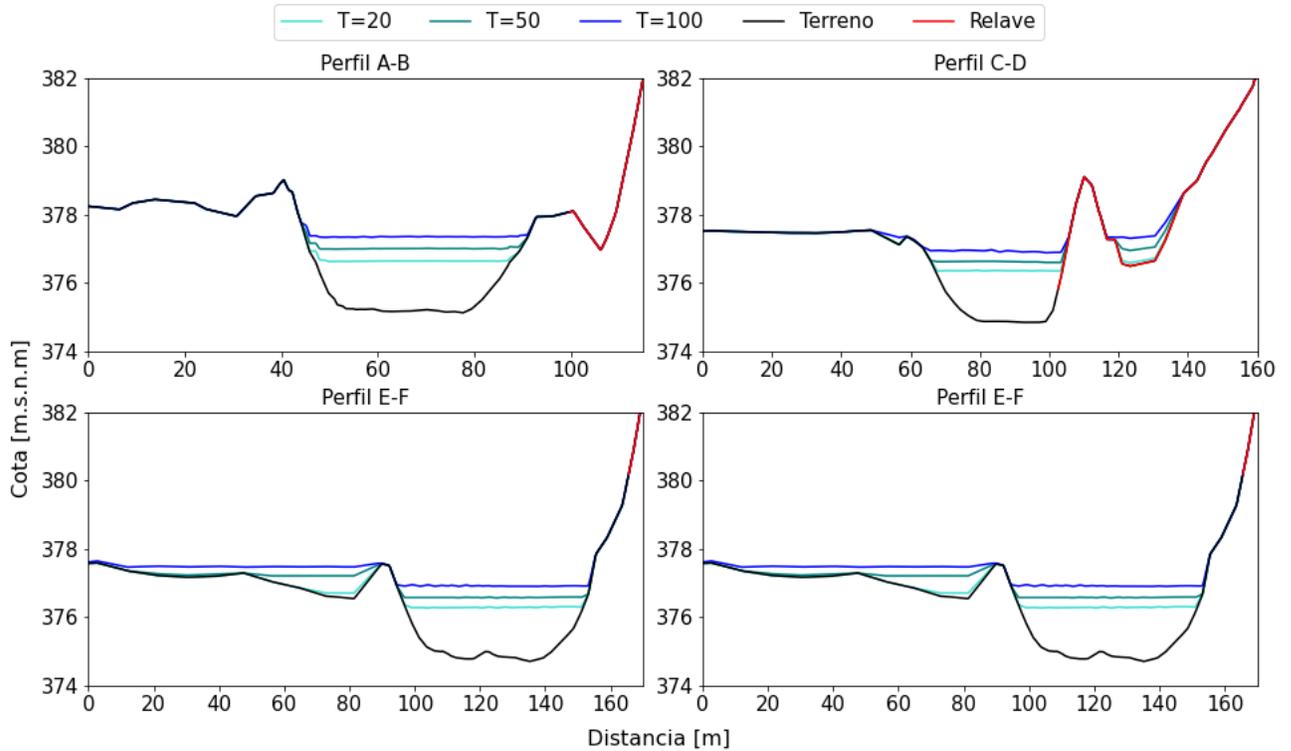
Luego de la simulación se observaron las crecidas en las zonas de los relaves en estudio. La Figura 5.11 detalla la zona de inundación cercana a los relaves Aucó. Esta imagen muestra que las tres crecidas se acercan bastante al límite establecido de los relaves, alcanzando a inundar una de las piscinas.



Figuras 5.11: Resultados de crecidas Relaves Aucó.

La Figura 5.12 muestra un detalle de los perfiles transversales, donde el perfil C-D destaca la inundación de la piscina. Los perfiles demuestran un encauce natural del río que permite que las crecidas no desborden e inunden el relave.

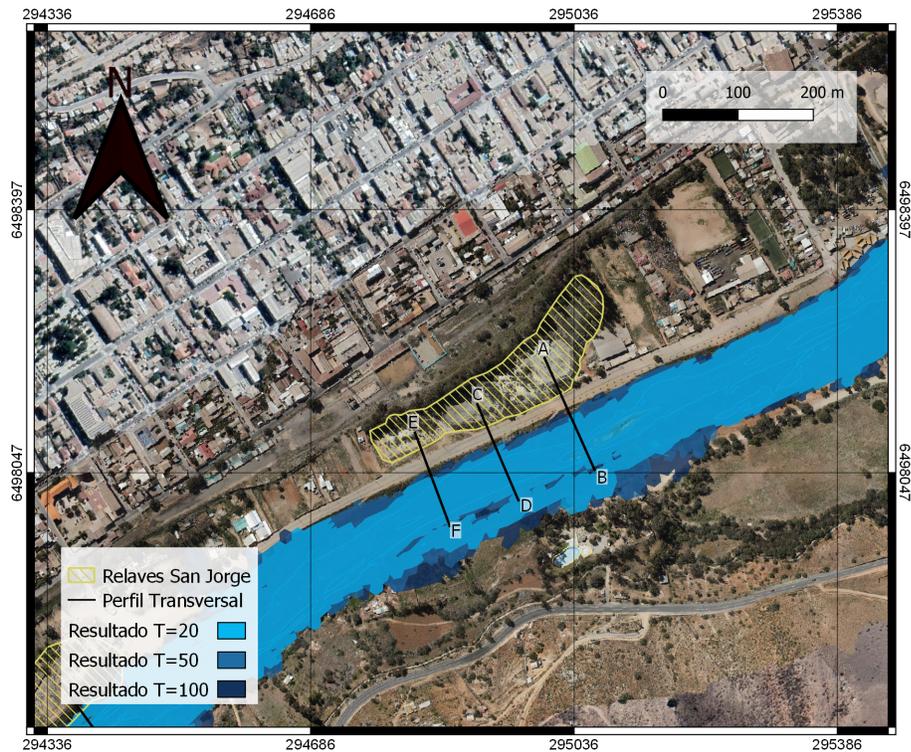
Perfiles transversales Relaves Auco



Figuras 5.12: Perfiles transversales Relaves Aucó.

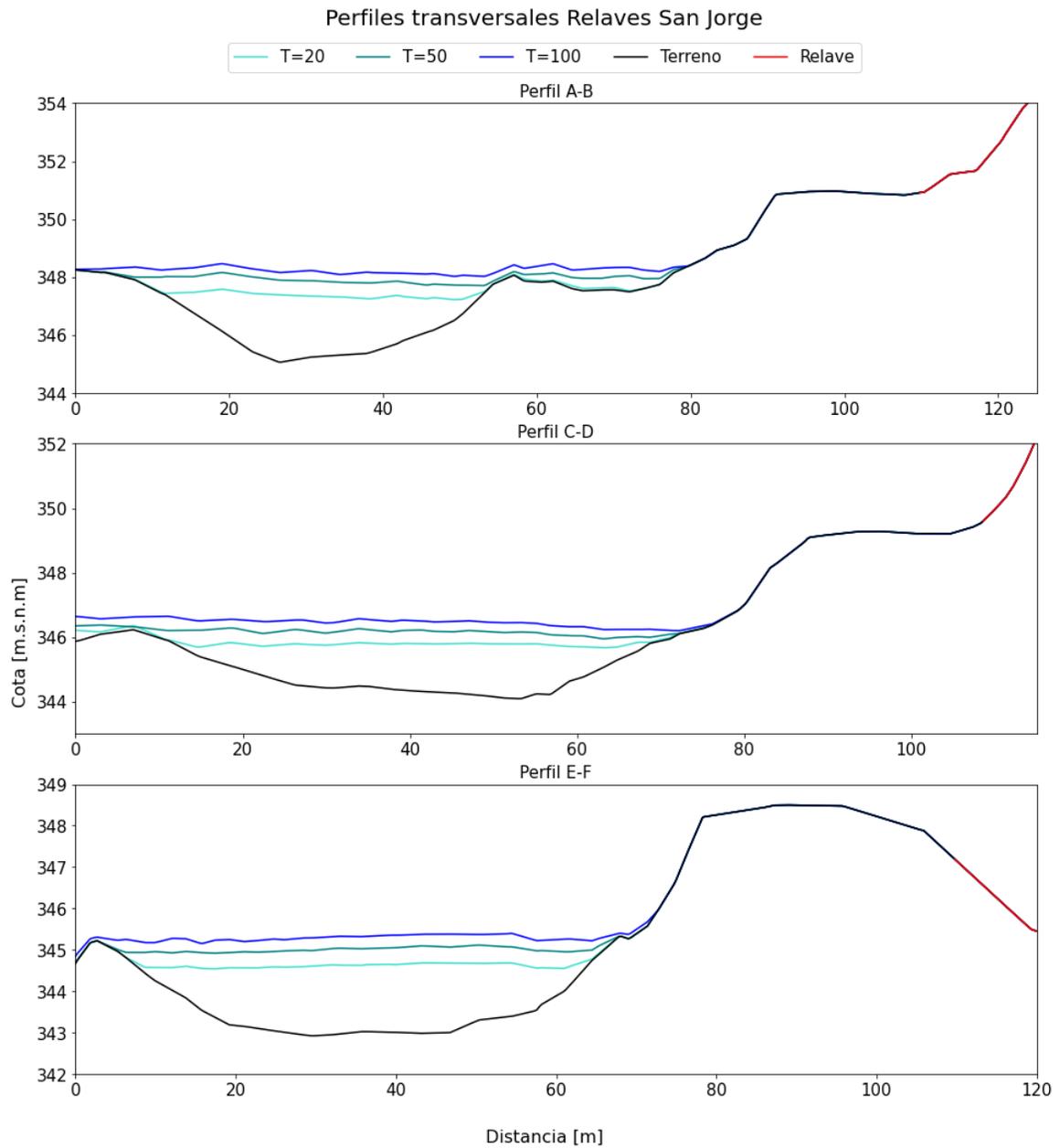
Hay que destacar que el borde establecido para el relave se basó en el límite visible de separación de sedimento de río con relave. Dado que no se cuenta con un muro de separación, este límite puede estar sujeto a errores. Cabe la posibilidad que incluso se encuentre en la mitad del cauce visible dado que las crecidas pueden depositar sedimento de río sobre el relave mismo. La inexistencia de un muro puede facilitar que eventos de precipitación que generen escurrimientos de flujos con relaves alcancen el cauce, incluso para crecidas mucho más pequeñas que la de un periodo de retorno de 20 años.

La Figura 5.13 muestra los resultados de crecidas cercana a los relaves San Jorge. Esta muestra que los relaves no alcanzan a ser sobrepasados por las crecidas.



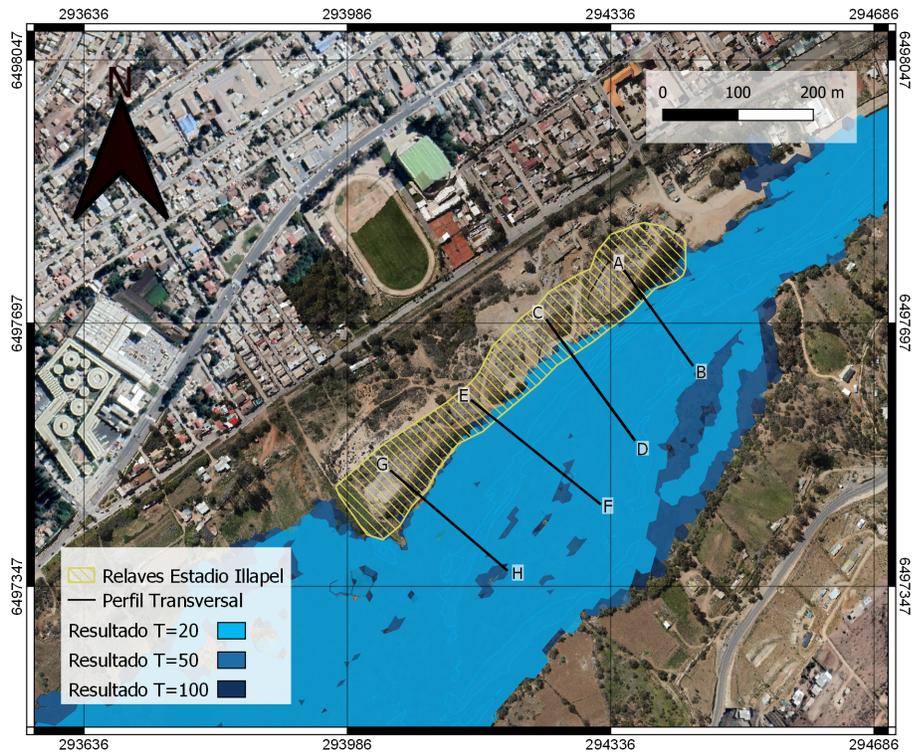
Figuras 5.13: Resultados crecidas Relaves San Jorge.

Un factor importante que evita la inundación de este relave es el encauce no natural del río debido a la calle ubicada entre el relave y el río. Imágenes satelitales del año 2003 muestran que esta calle no existía como tal y las crecidas se desviaban pasando muy cerca del relave. La Figura 5.14 muestra el efecto de barrera de esta calle entre los metros 85 y 110. Además, esta calle permite que los flujos de relaves producidos por eventos de precipitación no lleguen directamente al cauce y se desvíen por la calle antes de encontrar un lugar donde conectar con el río.

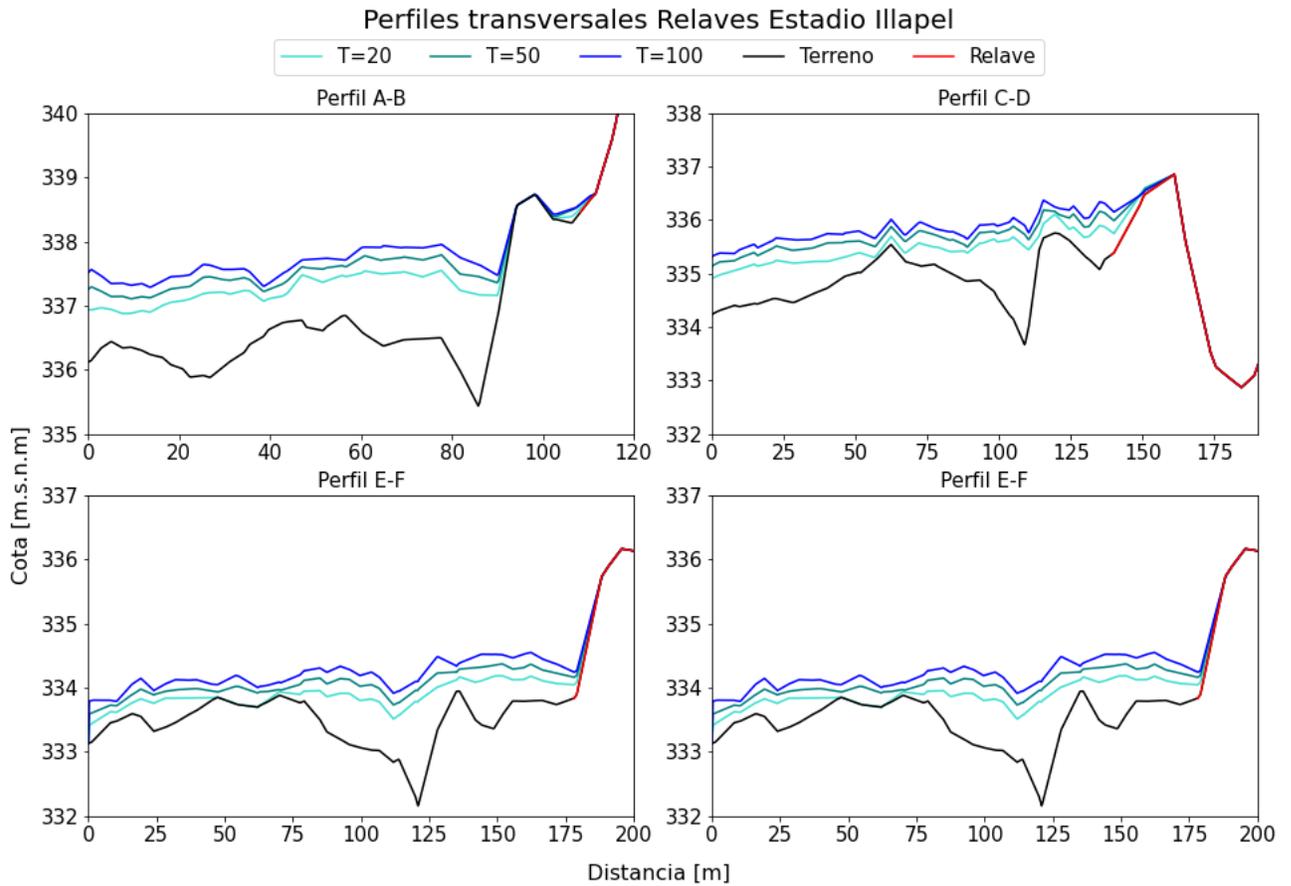


Figuras 5.14: Perfiles Transversales Relaves San Jorge.

La Figura 5.15 detalla la zona de inundación cercana a los relaves Estadio Illapel. En esta se visualiza que los relaves son parte de la zona de inundación del río sin la existencia de calles que separen cauce de relave. Es por esto que las crecidas alcanzan partes del relave como se puede ver en los perfiles C-D y E-F de la Figura 5.16.



Figuras 5.15: Resultado crecidas Relaves Estadio Illapel.



Figuras 5.16: Perfiles transversales Relaves Estadio Illapel.

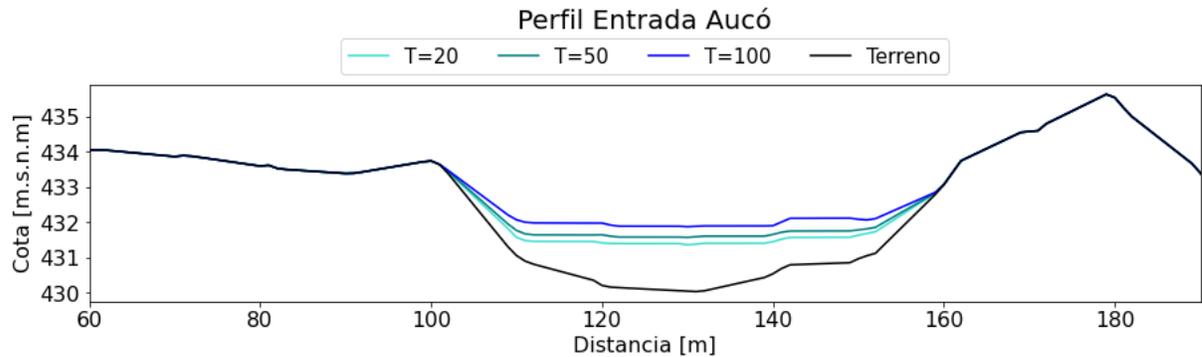
Al igual que para los relaves Aucó, este relave no posee un muro de separación con el río porque ante eventos de precipitación los flujos de relave pueden llegar directamente al río incluso cuando los eventos de crecidas son menor a los presentados para un periodo de retorno de 20 años.

Es importante señalar que este análisis se realiza basado en el supuesto de que el modelo permite simular las crecidas de una forma realista. Dada la falta de información de crecidas junto a sus alturas de escurrimiento reales en la zona, no se realizó una validación del modelo, impidiendo asegurar que los resultados obtenidos son reales en su totalidad.

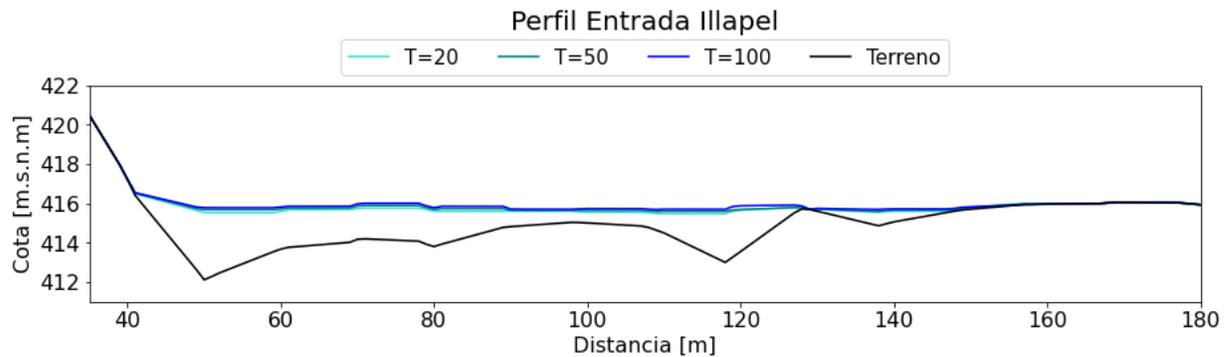
Se realizó un análisis de resultados para los distintos periodos de retorno utilizando el número de manning obtenido en el estudio de Rivera (2022) a partir de diámetros característicos obtenidos mediante el método de Ruz (1999). Estos resultados no muestran un cambio en las áreas de inundación y las diferencias de alturas flujo son del orden de $10^{-7}[m]$, es decir, son casi nulas. Esto implica que los cambios de hasta un 44 % en los diámetros característicos de las zonas no influyen significativamente a los resultados de inundación.

5.6. Simulación arrastre de sedimentos

Los perfiles transversales de las entradas del modelo, necesarias para el cálculo de las condiciones de borde, se presentan en las Figuras 5.17 y 5.18. La pendiente asociada a cada una, calculada para los primeros 50 metros aguas abajo, es de $0,0199 \text{ m/m}$ para ambas condiciones de borde.



Figuras 5.17: Perfil Transversal Entrada Aucó.

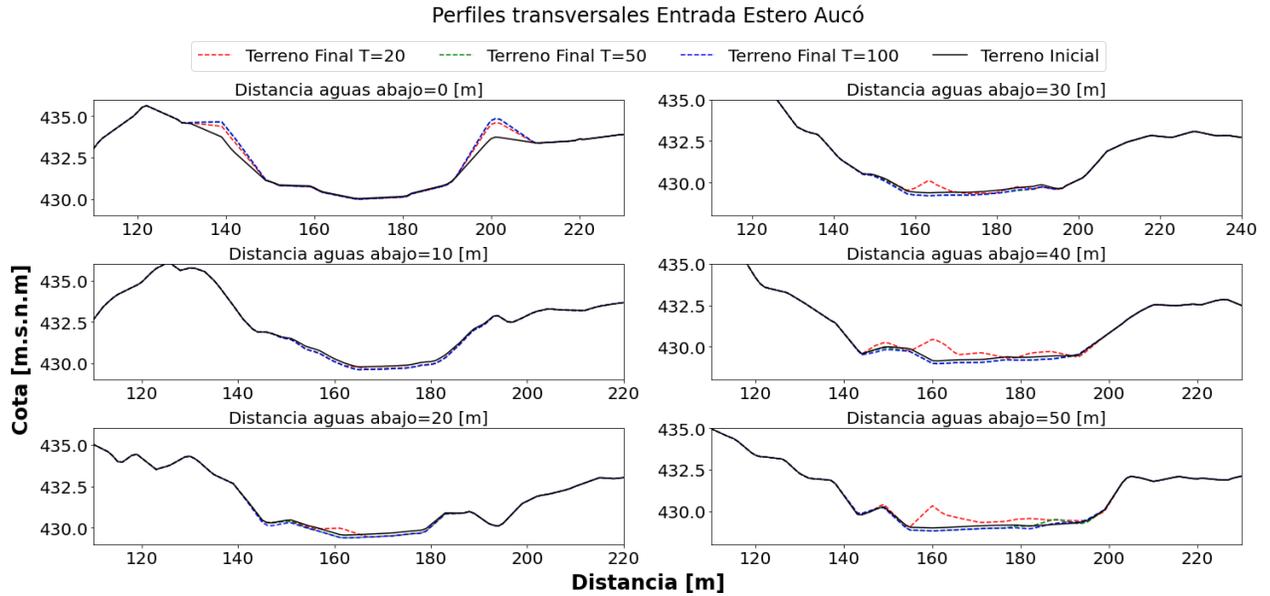


Figuras 5.18: Perfil Transversal Entrada Illapel.

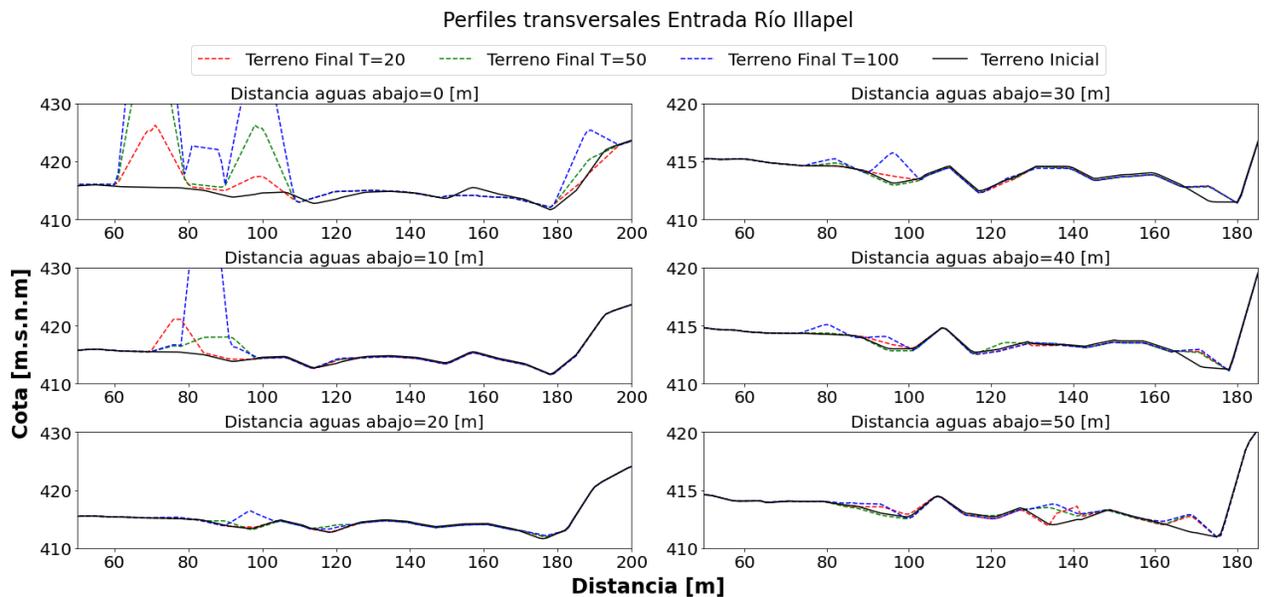
Los valores de gasto sólido de fondo inicial para cada entrada, obtenidos mediante Wilcock y Crowe, se presentan en la Tabla 5.12. Estos valores calculados no permiten calzar con una nula socavación del lecho o acumulación de sedimento en los bordes iniciales del modelo. Es por esto que se extraen los perfiles en las primeros 50 metros para observar su comportamiento. Estos se presentan de la Figura 5.19 a Figura 5.20.

Tabla 5.12: Condiciones de borde arrastre de sedimentos.

Perfil	Gasto sólido	T=20	T=50	T=100
Entrada Aucó	q_s [m^2/s]	0,011	0,016	0,023
	q_s [$kg/m/s$]	28,91	43,76	61,37
Entrada Illapel	q_s [m^2/s]	0,025	0,028	0,033
	q_s [$kg/m/s$]	67,35	75,63	88,71



Figuras 5.19: Morfología cauce en zona entrada Estero Aucó.

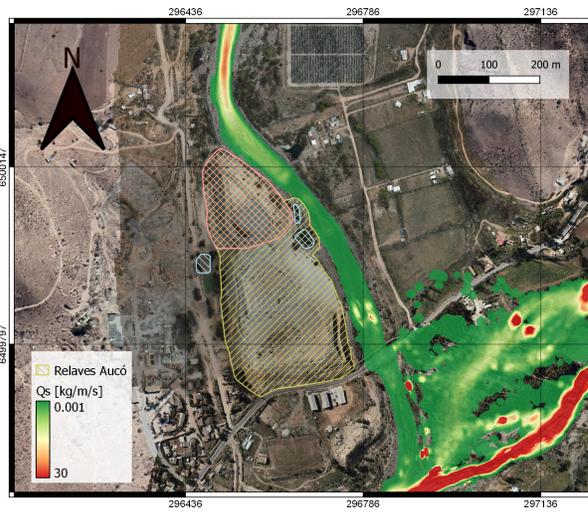


Figuras 5.20: Morfología cauce en zona entrada Río Illapel.

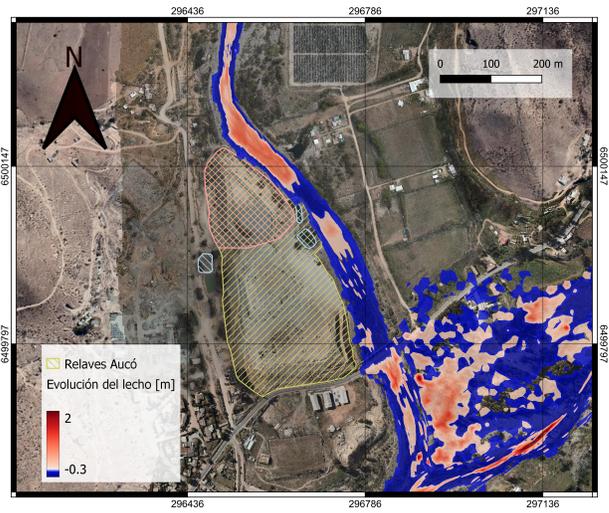
En la Figura 5.19 se observa que en el perfil inicial (0 m) existe una acumulación notoria de sedimentos (de 1 m aproximadamente) para todas las crecidas en los bordes del cauce. Normalmente en las entradas de un modelo siempre se está sujeto a errores, es por esto una acumulación o socavación notoria es esperable. Si se observan los demás perfiles, estos están sujetos a socavaciones o acumulaciones muy pequeñas. En particular, el perfil a los 10 metros indica un buen inicio del modelo. La Figura 5.20 muestra acumulaciones excesivas de sedimento en el borde izquierdo del cauce (superando los 20 metros) tanto para el perfil a los 0 m como el de los 10 m. Como estas acumulaciones no pueden ser reales, se asocia a un error de borde de TELEMAC en los primeros 10 metros de entrada, donde el programa intenta acomodar los sedimentos. Desde los 20 metros aguas abajo, se observa un comportamiento más estable con acumulaciones menores de hasta 3 metros. Queda propuesto probar valores mayores de gasto sólido de entrada al menos para el periodo de retorno de $T=100$ pues probablemente sus valores fueron subestimados dado que se generan mayores acumulaciones.

En cuanto los resultados de arrastre de sedimentos y morfología del cauce obtenidos mediante las fórmulas de Wilcock y Crowe (2003), hay que recalcar el modelo está siendo analizado para una crecida que ocurre sobre la topografía obtenida en Septiembre del 2022. De existir una crecida que vuelva a modificar la topografía, es normal que el comportamiento de los sedimentos sea distinto al obtenido en esta modelación. Además, los análisis de los resultados se basan en el supuesto de que el modelo permite simular las crecidas y arrastres mediante la fórmula de Wilcock y Crowe de forma realista. Dado la falta de datos reales de crecidas y arrastres de sedimentos en la zona, no se realizó una calibración del modelo, impidiendo asegurar que los resultados son reales en su totalidad. Tomando en cuenta esto, los gastos sólidos de fondo y evoluciones del lecho se analizan en las zonas de estudio de los relaves Aucó y Estadio Illapel, pues, dados los resultados de crecidas, estos pueden presentar contacto con los relaves.

De la Figura 5.21 a Figura 5.23 se presentan los resultados para la zona de los relaves Aucó. En estas figuras se observa un comportamiento similar para los 3 periodos de retorno. En cuanto a los gastos sólidos de fondo obtenidos a un costado del relave, la mayoría es menor a los 1 kg/m/s . En lo que respecta a evolución del lecho, se presentan zonas de erosión y depositación. Aguas arriba del relave se observa una gran zona de acumulación, con valores de hasta 1 m, lo cual puede ocurrir debido a suelo erosionado más aguas arriba. Además, se puede asociar esta acumulación al cambio de pendiente (disminución) que ocurre justo llegando a la zona de los relaves. La mayoría de la zona, no obstante, presenta erosión, alcanzando valores de $-0,17 \text{ m}$, correspondiente al ancho que fue dado de la capa activa del lecho (igual al D_{90}). Esto demuestra que el ancho de la capa activa puede haber sido subestimado. Queda propuesto aumentar el ancho de la capa activa para visualizar la socavación que puede ser alcanzada. De todas formas, esta socavación implica que en el caso de ser suelo contaminado, este estaría siendo erosionado y arrastrado.

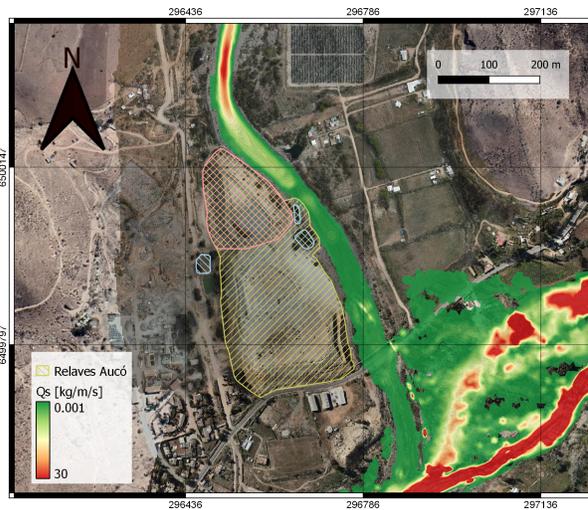


(a) Gasto sólido

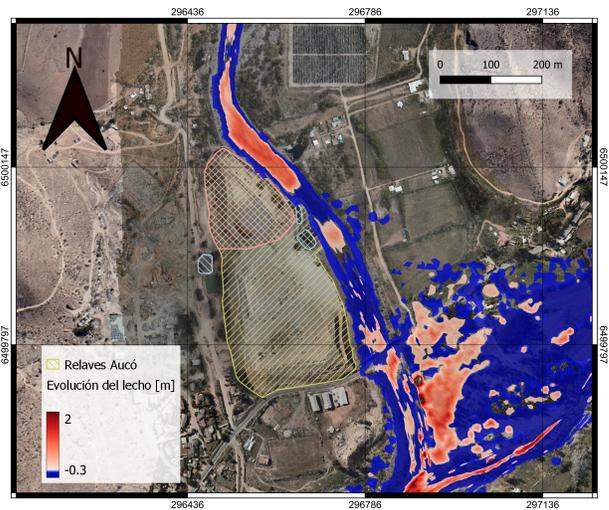


(b) Socavación

Figuras 5.21: Resultados T=20 Zona Relaves Aucó.

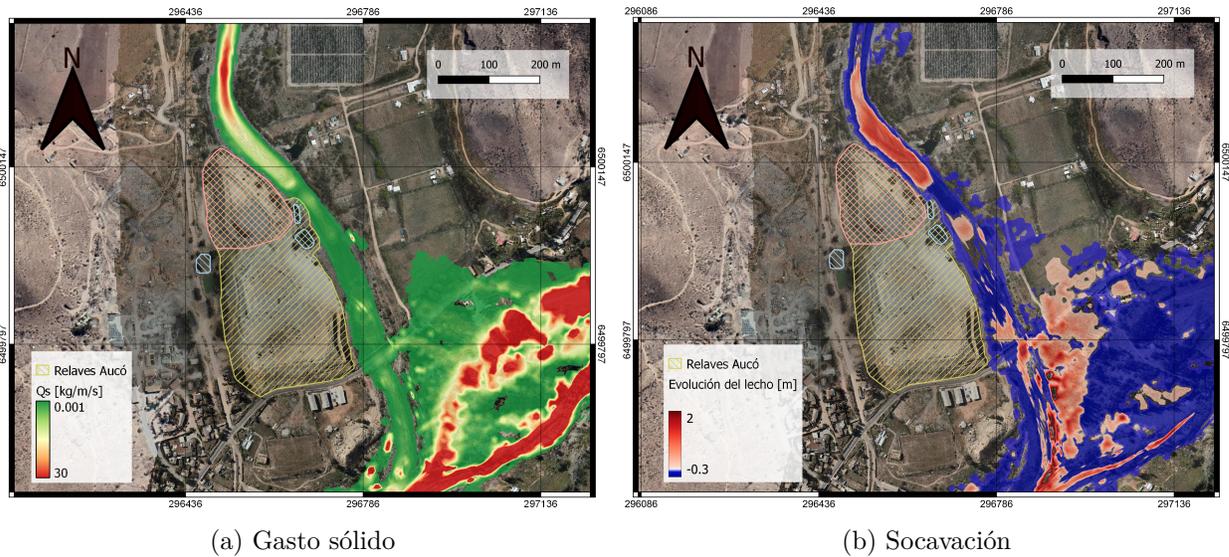


(a) Gasto sólido



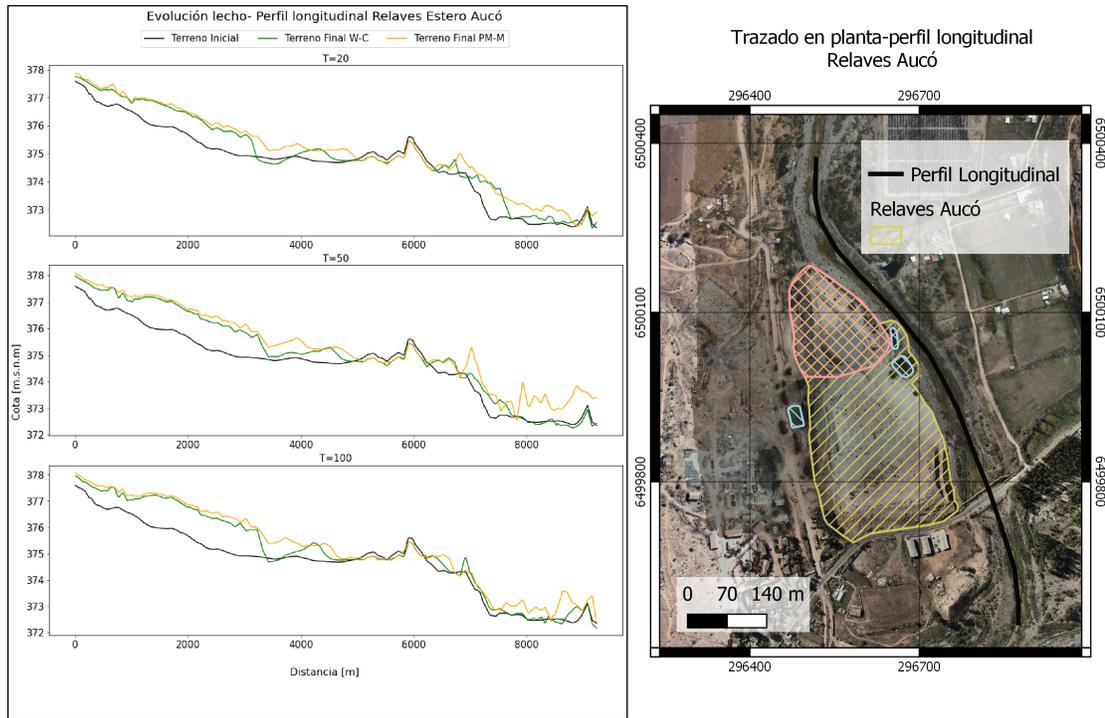
(b) Socavación

Figuras 5.22: Resultados T=50 Zona Relaves Aucó.



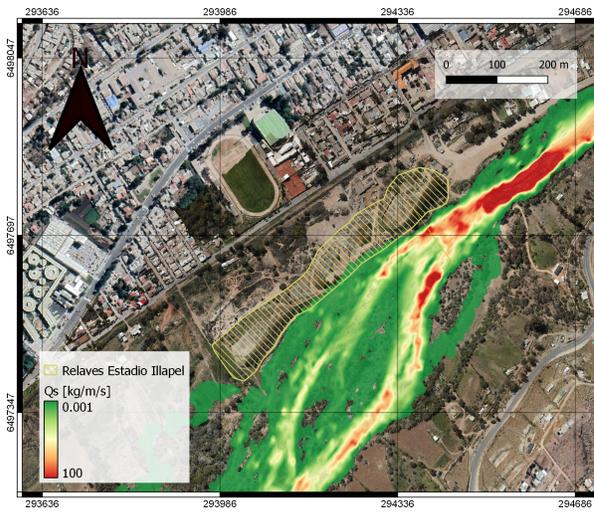
Figuras 5.23: Resultados T=100 Zona Relaves Aucó.

Tal como se presentó en la metodología, se realizó una comparación de la metodología de Wilcock y Crowe con Meyer-Peter y Muller. La Figura 5.24 muestra la evolución del lecho de un perfil longitudinal trazado en el cauce adyacente a los relaves Aucó para ambas metodologías. Esta muestra que la fórmula de Wilcock y Crowe presenta menores acumulaciones de sedimento y mayores socavaciones que la fórmula de Meyer-Peter y Muller. La diferencia promedio varía entre cada periodo de retorno de crecida y se toma valores entre los 15 y 30 cm. Si bien la fórmula de Wilcock y Crowe simula mejor los efectos en suelos de granulometría extendida (Niño, 2019), no se puede asegurar que esta entrega un valor más cercano al real que la fórmula Meyer-Peter y Muller pues no se ha realizado una validación del modelo con datos de gasto sólido de fondo medidos en terreno.

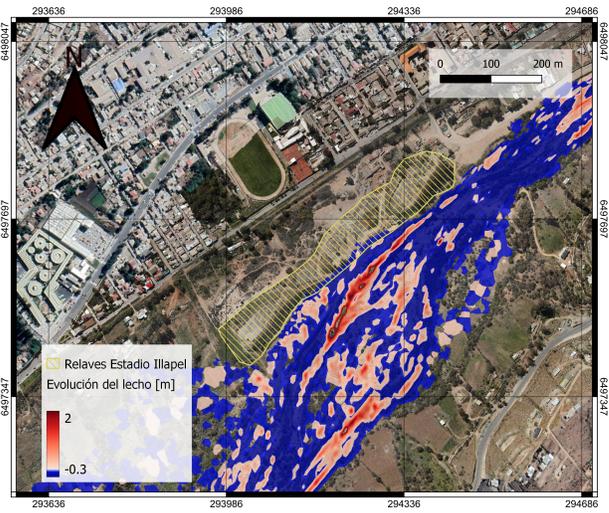


Figuras 5.24: Diferencia método Wilcock y Crowe (WC) y Meyer-Peter y Muller (PMM) Relaves Aucó

De la Figura 5.25 a Figura 5.27 se presentan los resultados para los relaves Estadio Illapel. En cuanto a los gastos sólidos, se presentan comportamientos similares en los tres periodos de retorno con una tendencia a aumentar a medida que aumenta el caudal. En la zona de aguas arriba del relave es donde dominan los mayores valores de gasto sólido alcanzando los 350 kg/m/s . Aguas abajo, estos valores disminuyen alcanzando valores que rondan los 30 kg/m/s . En cuanto a la evolución del lecho, predominan las erosiones de un valor máximo de $-0,17 \text{ m}$ al igual que en la zona de los Relaves Aucó, por lo que también se observa que el ancho de la capa activa puede haber sido subestimado.

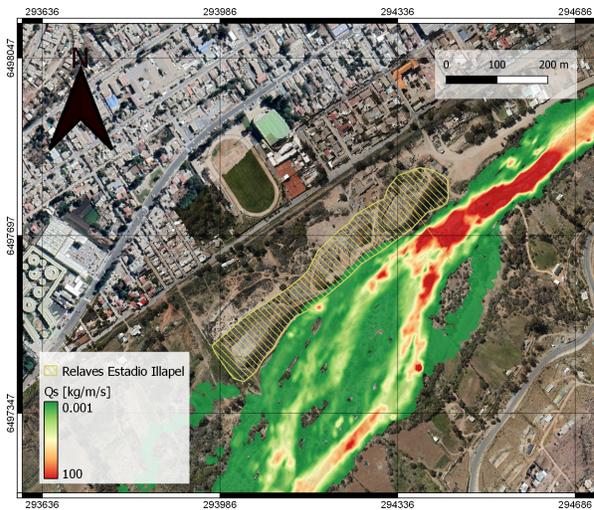


(a) Gasto sólido

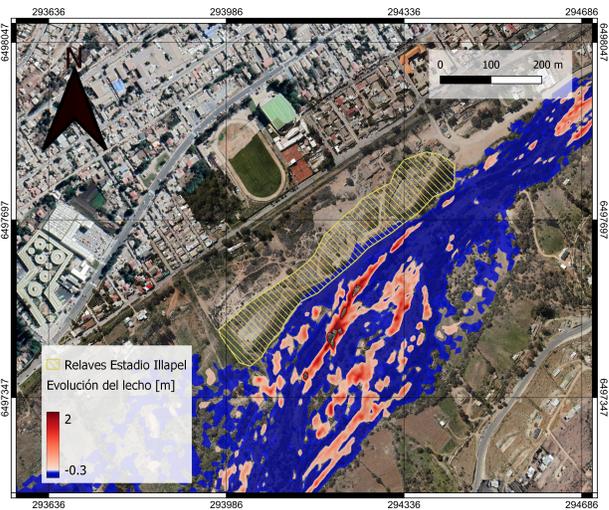


(b) Socavación

Figuras 5.25: Resultados T=20 Zona Relaves Estadio Illapel.

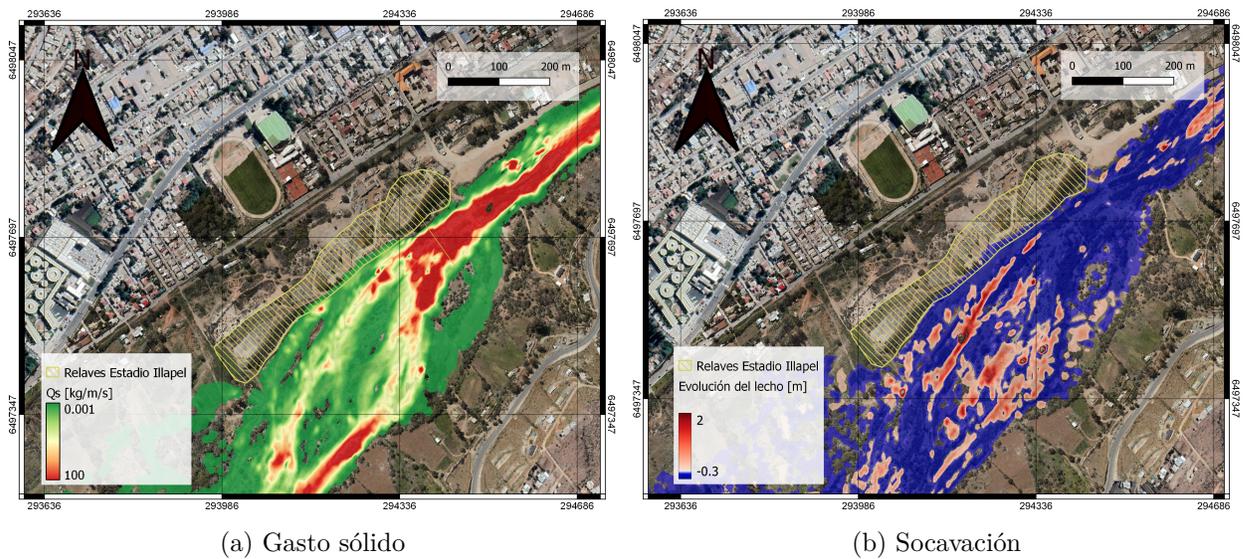


(a) Gasto sólido



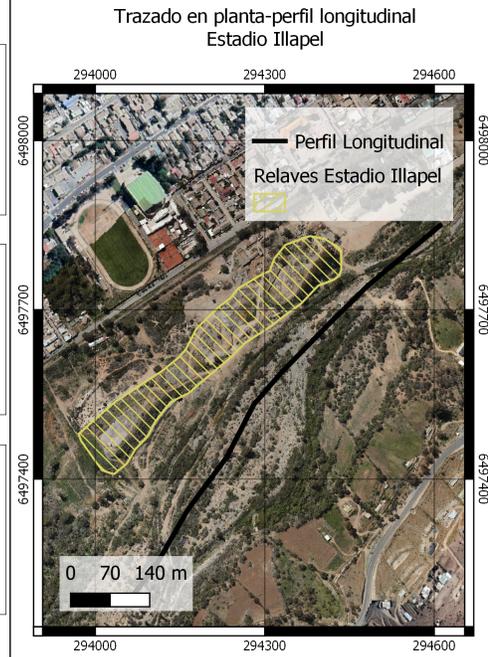
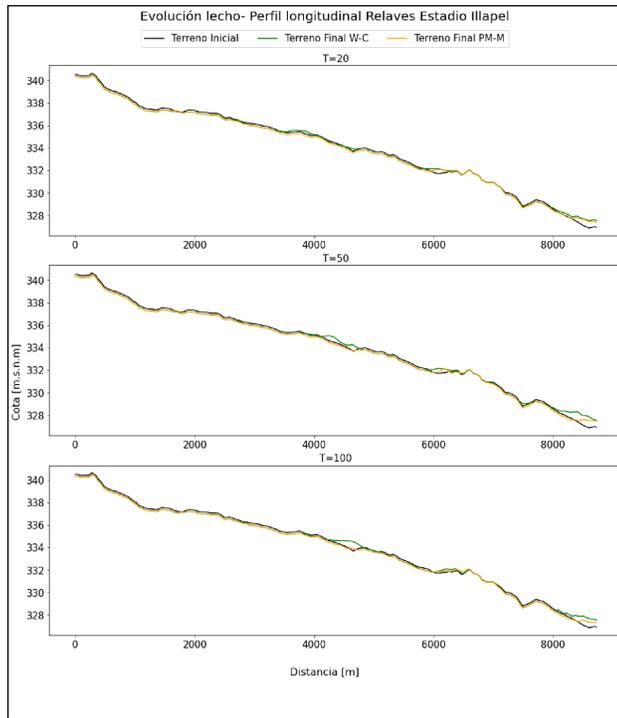
(b) Socavación

Figuras 5.26: Resultados T=50 Zona Relaves Estadio Illapel.



Figuras 5.27: Resultados T=100 Zona Relaves Estadio Illapel.

También se realizó una comparación de la metodología de Wilcock y Crowe con Meyer-Peter y Muller. La Figura 5.28 muestra la evolución del lecho de un perfil longitudinal trazado en el cauce adyacente a los relaves Estadio Illapel para ambas metodologías. Esta muestra que la fórmula de Wilcock y Crowe, a diferencia de lo obtenido para los relaves Aucó, presenta mayores acumulaciones de sedimento y menores socavaciones que la fórmula de Meyer-Peter y Muller. La diferencia promedio varía entre cada periodo de retorno de crecida y toma valores pequeños entre 5 a 10 centímetros por lo que ambas metodologías simulan de una forma similar para esta zona.



Figuras 5.28: Diferencia método Wilcock y Crowe (WC) y Meyer-Peter y Muller (PMM) Relaves Estadio Illapel

Capítulo 6

Conclusiones

Respecto al objetivo específico de estudio hidrológico, fue posible modelar el comportamiento de las cuencas con control y sin control fluviométrico con errores bajo un 40 % mediante los modelos del manual de crecidas para cuencas sin control fluviométrico. No obstante, este manual no incorpora cambio climático, lo cual sería de gran interés para verificar si existe cambio en el comportamiento de las cuencas. La última actualización del Balance Hídrico Nacional del 2020 muestra que los caudales de la época de deshielo (verano) se desfasan levemente al invierno, debido a la disminución de precipitación sólida, haciendo que escurra más volumen durante invierno (Montes, 2021).

Respecto a la topografía, se concluye que la fotogrametría con drones permite obtener mayor detalle de los cauces y elementos de interés como lo son los relaves. El vuelo con dron realizado en este proyecto permite obtener resoluciones de MED de 3 cm, sin embargo, esta es muy pequeña y no agiliza los tiempos de modelación. Resoluciones de 30 cm, como la utilizada, muestran una mejoría en comparación con los MED del satélite ALOS PALSAR, el cual fue utilizado en el estudio de Rivera (2022), el que concluyó que se necesitaban resoluciones topográficas más finas.

En cuanto a los resultados granulométricos obtenidos, si bien se ha demostrado que existen diferencias entre los diámetros característicos obtenidos mediante muestras en terreno con los obtenidos con el método de Ruz (1999), es importante realizar más análisis de sensibilidad para demostrar para qué variaciones de manning el modelo cambia sus resultados significativamente.

Se demostró que TELEMAC permite obtener un modelo de crecidas y arrastre de sedimentos de forma sencilla. En los resultados del modelo de crecidas se demuestran un peligro de remoción de relaves en la zona de los relaves Aucó y Estadio Illapel, principalmente debido a su cercanía y nula separación con el cauce. En cuanto al modelo de arrastre de sedimentos, se concluye que este también contribuye al peligro de contaminación dado la capacidad de transporte y socavaciones obtenidas. A inicios de junio del 2022, para un proyecto paralelo a este donde se busca estudiar la infiltración de contaminantes en el lecho, se tomaron muestras de sedimento en varios puntos del cauce de la zona de estudio, así como también de los

mismos relaves. Luego de un análisis en laboratorio, se demostraron composiciones similares entre relaves y sedimentos en los lechos del cauce, por lo que se demuestra que existe contaminación en los sedimentos. Si bien no se puede concluir que la contaminación presentada en la muestra de sedimentos se produjo debido a un arrastre de sedimentos o crecidas que inundaron los relaves, se puede concluir que ante las crecidas calculadas en este modelo, los sedimentos contaminados pueden ser arrastrados. Hay que destacar que los resultados analizados se basan en un modelo que no contó con calibración ni validaciones de los resultados con datos tomados en terreno por lo que el peligro encontrado debe ser validado.

Finalmente, si bien el modelo presentado condice con la hipótesis de este trabajo pues revela un peligro de remoción de relaves por crecidas y arrastre de sedimentos en las zonas de “Relaves Aucó” y “Relaves Estadio Illapel”, la hipótesis no puede ser confirmada sin haber realizado una validación del modelo con datos reales medidos de caudales y gastos sólidos de fondo en la zona de estudio.

Bibliografía

- Agisoft. (2021). Metashape. Intelligent photogrammetry. Descargado de https://www.agisoft.com/pdf/metashape_presentation.pdf
- Aracena, G. (2020). Implementación de un modelo hidrodinámico 2D en el estuario del Maule, Chile, para el análisis del efecto de inundación sobre las zonas aledañas, producto de la variación en la tasa de sedimentos.
- 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*. Descargado de <https://www.researchgate.net/publication/336126793>
- Bustamante-Penagos, N., y 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. *Environmental Earth Sciences*, 79. doi: 10.1007/s12665-020-09274-y
- CENMA. (2010). *Análisis de la composición físico química de los sedimentos fluviales y su relación con la disponibilidad de metales en agua. Introducción- Metodología*.
- Chow, V. T. (1994a). *Hidrología aplicada*. McGraw Hill.
- Chow, V. T. (1994b). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw Hill.
- David Noticias. (2021). *Illapel sufre corte de agua por turbiedad del Río Illapel y derrame de relaves pasivos*. Descargado de <https://www.davidnoticias.cl/illapel-sufre-corte-agua-potable-turbiedad-del-rio-illapel-derrame-relaves-pasivos/>
- DJI. (2017). ¿Los drones RTK/PPK dan mejores resultados? Descargado de <https://www.pix4d.com/es/blog/los-drones-rtk-ppk-le-dan-mejores-resultados-que-el-uso-de-gcp/>
- Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción. (2000). *Análisis Hidrológico*.
- FDEP. (1994). *Approach to the assessment of sediment quality in florida coastal waters volume 1-development and evaluation of sediment quality assessment guidelines*.
- Förstner, U., y Salomons, W. (1981). Trace metal analysis on polluted sediments Part I: Assessment of Sources and Intensities. *Environmental Technology Letters*, 1, 494.
- Galindo, C. (1970). Fotogrametría Aplicada a la Ingeniería. Descargado de http://132.248.52.100:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/4004/decd_0038.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Garagay, J., y Jerez, S. (2021). El 60% de los relaves abandonados de Chile se concentra en la IV región: Vacío legal impide fiscalización del Sernageomin. *El desconcierto*. Descargado de <https://www.eldesconcierto.cl/medio-ambiente-y-naturaleza/2021/02/16/el-60-de-los-relaves-abandonados-de-chile-se-concentra-en-la-iv-region-vacio-legal-impide-fiscalizacion-del-sernageomin.html>
- Hervouet, J.-M. (2007). *Hydrodynamics of free surface flows : modelling with the finite element method*. Wiley.
- Hervouet, J.-M., y Ata, R. (2020a). *GAIA User Manual*. (V8P2)
- Hervouet, J.-M., y Ata, R. (2020b). *TELEMAC-2D User Manual*. (V8P2)
- Macklin, M. G., Brewer, P. A., Hudson-Edwards, K. A., Bird, G., Coulthard, T. J., Dennis, I. A., ... Turner, J. N. (2006, 9). A geomorphological approach to the management of rivers contaminated by metal mining. *Geomorphology*, 79, 423-447. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.06.024
- Ministerio de Obras Públicas. (1999). *EIA Proyecto: "Embalse Illapel"*.
- Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. (1995). *Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos para cuencas sin información fluviométrica*.
- Montes, C. (2021). *Balance Hídrico Nacional proyecta escasez de agua de hasta 50 %*. Descargado de <https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/balance-hidrico-nacional-proyecta-escasez-de-agua-de-hasta-50/BKI3A342JNGKDENXQXYNAY74RQ/>
- National Research Council Canada. (2022). BlueKenue: software tool for hydraulic modellers. Descargado de <https://nrc.canada.ca/en/research-development/products-services/software-applications/blue-kenuetm-software-tool-hydraulic-modellers>
- Neaman, A., Ginocchhio, R., Tapia, Y., y Novoselov, A. (2021). Metales en los suelos. *Induambiente*, 169.
- Niño, Y. (2019). *Transporte hidráulico de sólidos*. Curso FCFM, Universidad de Chile.
- Open Telemac. (s.f.-a). *General presentation. The TELEMAC-MASCARET modelling system*. Descargado de <http://www.opentelemac.org/index.php/presentation>
- Open Telemac. (s.f.-b). *TELEMAC-2D - Two-dimensional hydrodynamic*. Descargado de <http://www.opentelemac.org/index.php/presentation?id=17>
- Open Telemac. (2020). *SISYPHE User Manual*. Descargado de http://wiki.opentelemac.org/doku.php?id=user_manual_sisyphen
- Quevedo, M., Mendoza, P., Vásquez, N., y Vargas, X. (2019). *Extensión de registros fluviométricos en Chile utilizando principios de similitud*.
- Ramírez, N. (2007). *Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves*. Descargado de <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/12/GuiaTecOperacionDepRelaves.pdf>
- 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.

- Rosas, H. (2001). *Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca de llobregat*. Descargado de <http://hdl.handle.net/10803/6978>
- Soublette, N., Heyer, J., y Cortés, I. (2011). *Informe Final: "Investigación preliminar y confirmatoria de suelos con potencial presencia de contaminantes (SPPC). Comuna de Illapel"*.
- Zegers, G., Navarro, L., Lagos, M., Álvaro Navarrete, A., Caraballo, M., Niño, Y., . . . Montserrat, S. (2021). An integrated modeling approach for mineral and metal transport in acidic rivers at high mountainous porphyry cu systems. *Journal of Hydrology*, 602. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126718

Anexos

Anexo A

Caudales

Las ecuaciones utilizadas para el relleno de caudales se presentan a continuación:

- **Estación Illapel en Huintil (IH)**

- Estación candidata 1: Illapel en el Peral (IP)

$$\begin{aligned} QMd(IH) &= 0,6024 \cdot QMd(IP), & r^2 &= 0,51 & (\text{Abr-Sept}) \\ QMd(IH) &= 0,6918 \cdot QMd(IP), & r^2 &= 0,87 & (\text{Oct-Mar}) \end{aligned}$$

- Estación candidata 2: Illapel en las Burras (IB)

$$\begin{aligned} QMd(IH) &= 2,4973 \cdot QMd(IB), & r^2 &= 0,46 & (\text{Abr-Sept}) \\ QMd(IH) &= 0,7094 \cdot QMd(IB), & r^2 &= 0,85 & (\text{Oct-Mar}) \end{aligned}$$

- **Estación Illapel en el Peral (IP)**

- Estación candidata 1: Illapel en las Burras (IB)

$$\begin{aligned} QMd(IP) &= 3,7463 \cdot QMd(IB), & r^2 &= 0,63 & (\text{Abr-Sept}) \\ QMd(IP) &= 1,4084 \cdot QMd(IB), & r^2 &= 0,98 & (\text{Oct-Mar}) \end{aligned}$$

- Estación candidata 2: Illapel en Huintil (IH)

$$\begin{aligned} QMd(IP) &= 1,0863 \cdot QMd(IH), & r^2 &= 0,51 & (\text{Abr-Sept}) \\ QMd(IP) &= 1,2804 \cdot QMd(IH), & r^2 &= 0,87 & (\text{Oct-Mar}) \end{aligned}$$

Las ecuaciones utilizadas para la obtención de los QMi en cada estación se presentan a continuación:

- **Estación Illapel en Huintil (IH)**

$$QMi = 1,981 \cdot QMd, \quad r^2 = 0,95 \quad (\text{Abr-Sept})$$

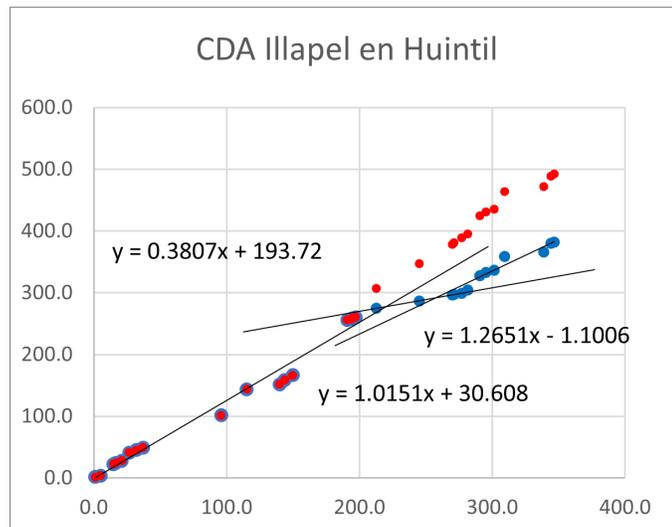
$$QMi = 1,432 \cdot QMd, \quad r^2 = 0,99 \quad (\text{Oct-Mar})$$

• Estación Illapel en el Peral (IP)

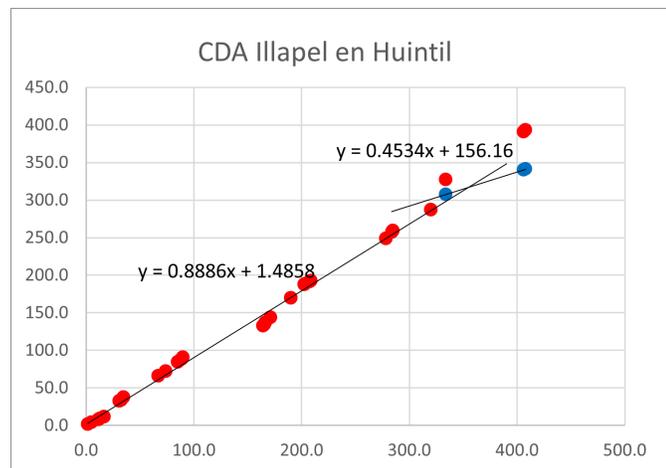
$$QMi = 3,337 \cdot QMd, \quad r^2 = 0,95 \quad (\text{Abr-Sept})$$

$$QMi = 1,429 \cdot QMd, \quad r^2 = 0,99 \quad (\text{Oct-Mar})$$

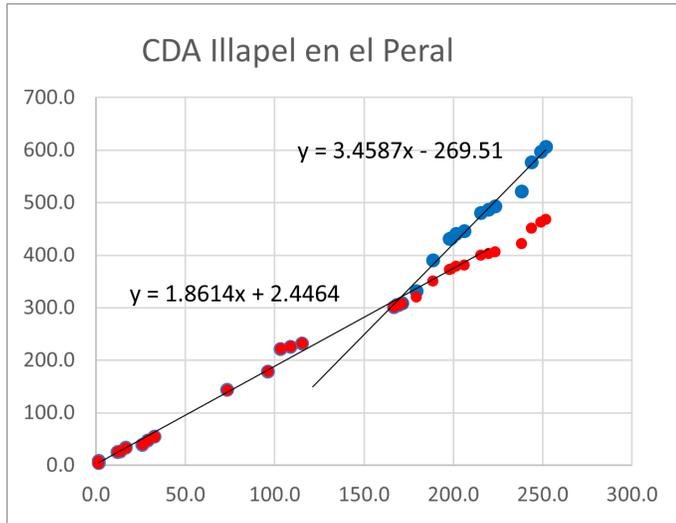
Las CDA de la estación Illapel en Huintil se presentan en la Figura A.1 y Figura A.2 mientras que para la estación Illapel en el Peral en la Figura A.3 y Figura A.4.



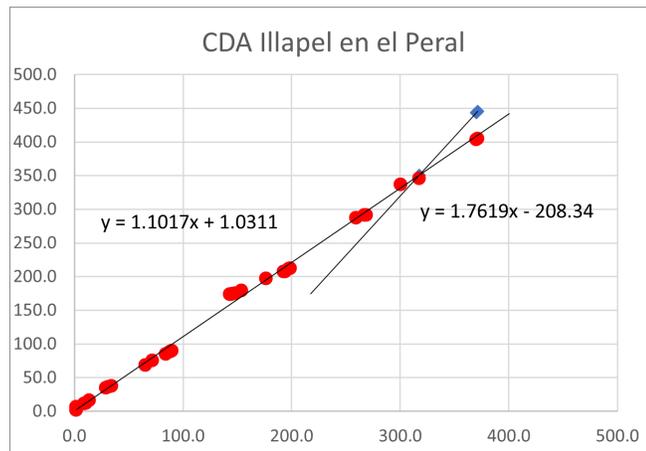
Figuras A.1: CDA Illapel en Huintil Abril-Septiembre



Figuras A.2: CDA Illapel en Huintil Octubre-Marzo



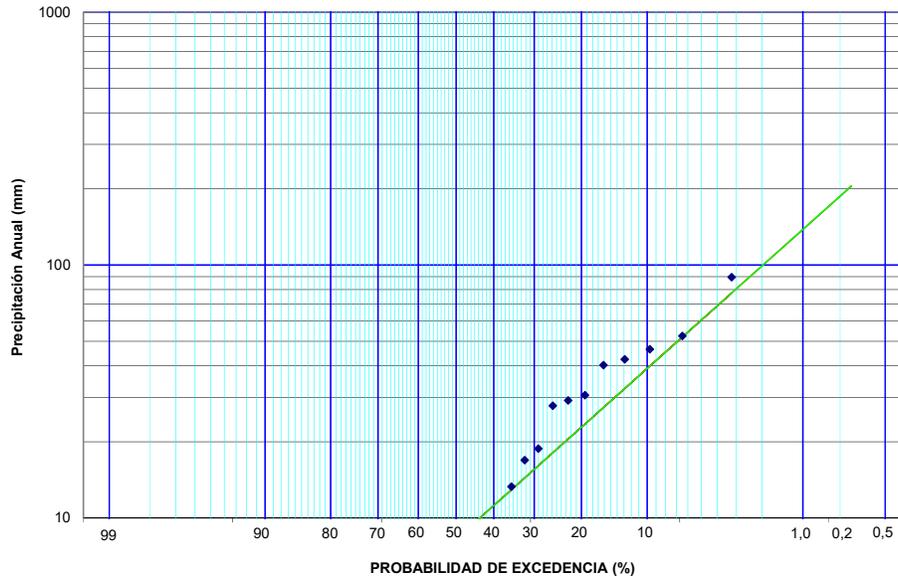
Figuras A.3: CDA Illapel en el Peral Abril-Septiembre



Figuras A.4: CDA Illapel en el Peral Octubre-Marzo

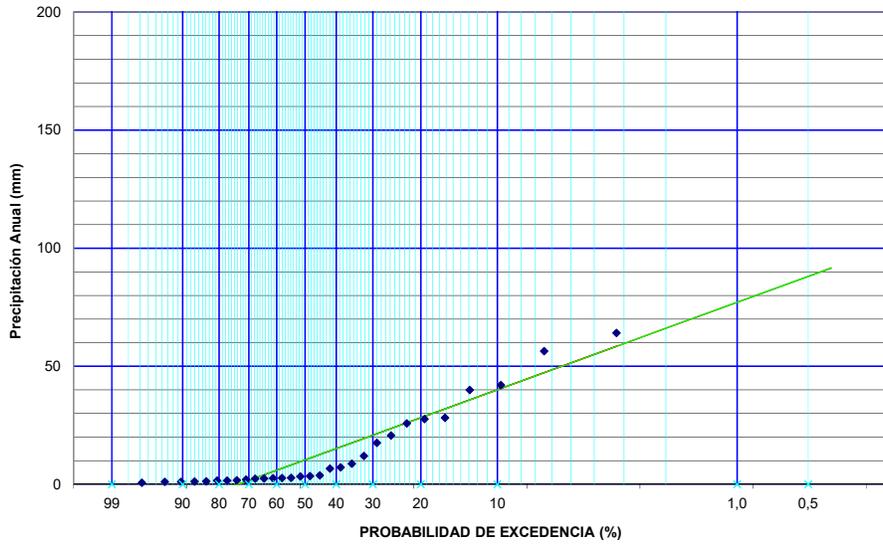
Las gráficas de las distribuciones elegidas para cada cuenca se presentan de la Figura

FIGURA 2
ANALISIS DE FRECUENCIAS - DISTRIBUCION LOG-NORMAL
SERIE DE CAUDALES ANUALES ABRIL-SEPT ESTACIÓN ILLAPEL EN HUNTIL



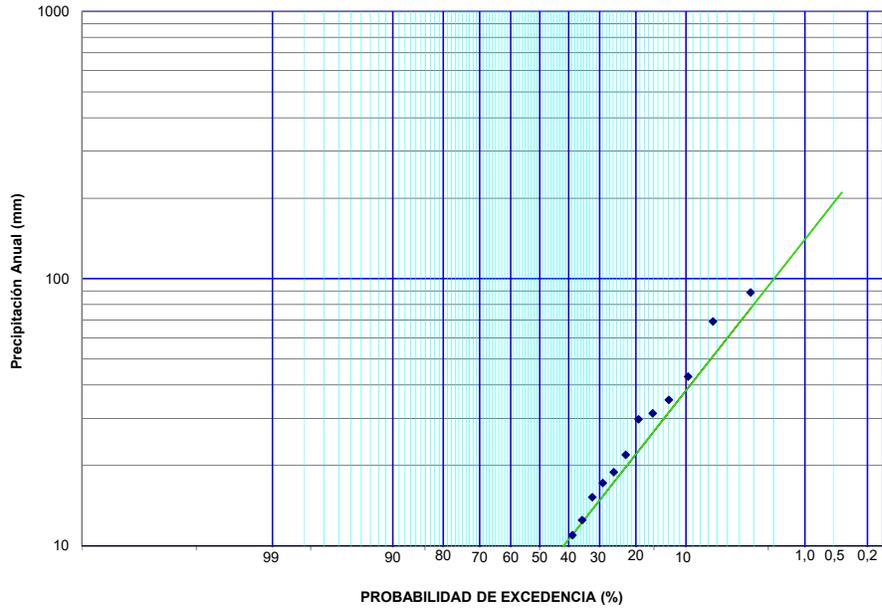
Figuras A.5: Análisis de frecuencias Illapel en Huintil Abril-Sep

FIGURA 2
ANALISIS DE FRECUENCIAS - DISTRIBUCION GUMBEL
SERIE DE CAUDALES ANUALES OCT-MAR ESTACIÓN ILLAPEL EN HUNTIL



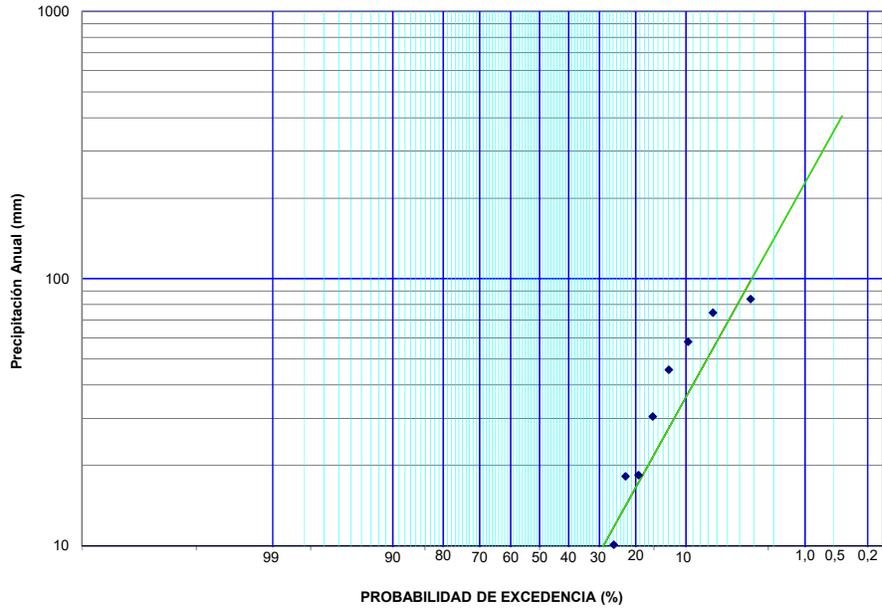
Figuras A.6: Análisis de frecuencias Illapel en Huntil Oct-Mar

FIGURA 2
ANÁLISIS DE FRECUENCIAS - DISTRIBUCIÓN LOG-PEARSON
SERIE DE CAUDALES ANUALES ABR-SEPT ESTACIÓN ILLAPEL EN EL PERAL



Figuras A.7: Análisis de frecuencias Illapel en el Peral Abril-Sep

FIGURA 2
ANÁLISIS DE FRECUENCIAS - DISTRIBUCION LOG-PEARSON
SERIE DE CAUDALES ANUALES OCT-MAR ESTACIÓN ILLAPEL EN EL PERAL

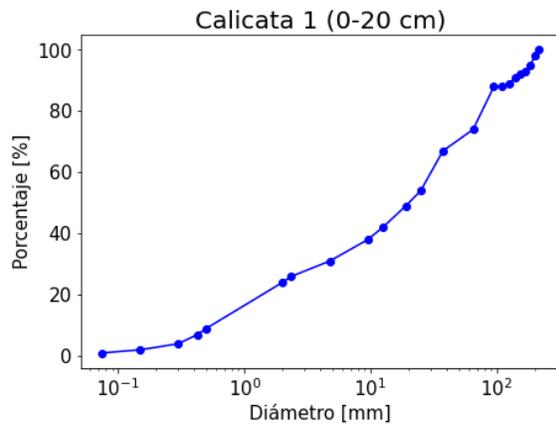


Figuras A.8: Análisis de frecuencias Illapel en el Peral Oct-Mar

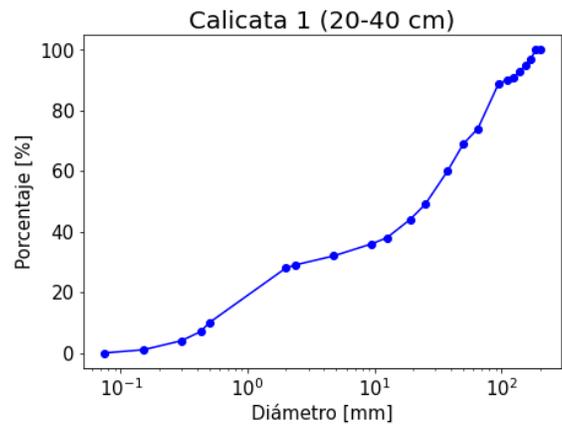
Anexo B

Granulometría

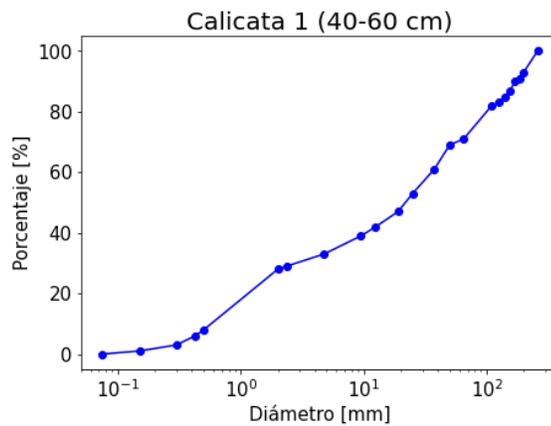
A continuación se presentan las curvas granulométricas (CG) de cada calicata y estrato:



(a) 0-20 cm

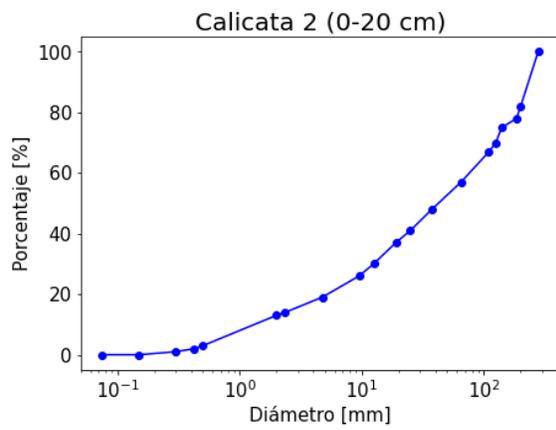


(b) 20-40 cm

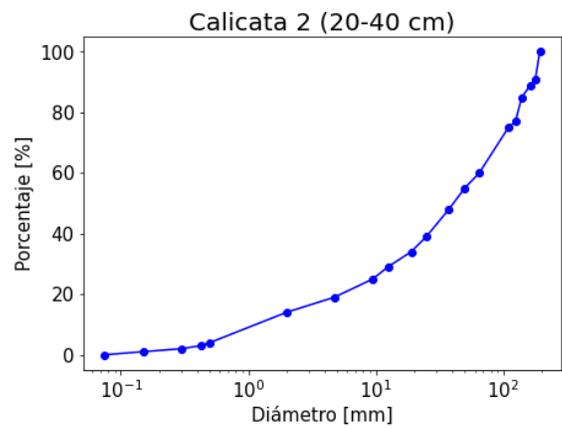


(c) 40-60 cm

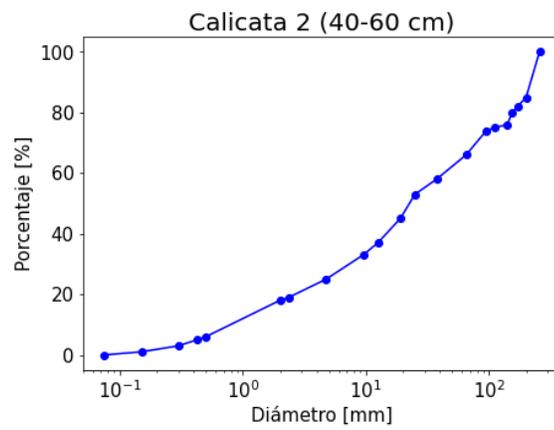
Figuras B.1: Curvas granulométricas Calicata 1.



(a) 0-20 cm

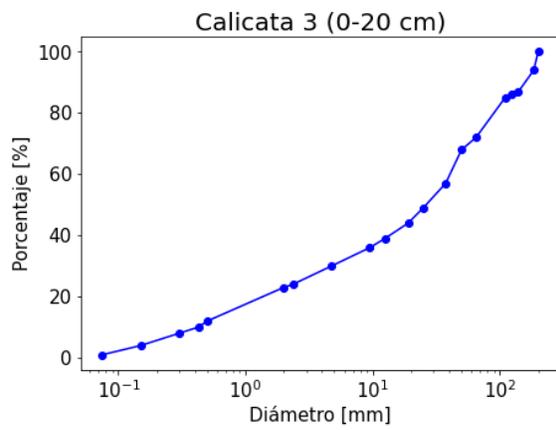


(b) 20-40 cm

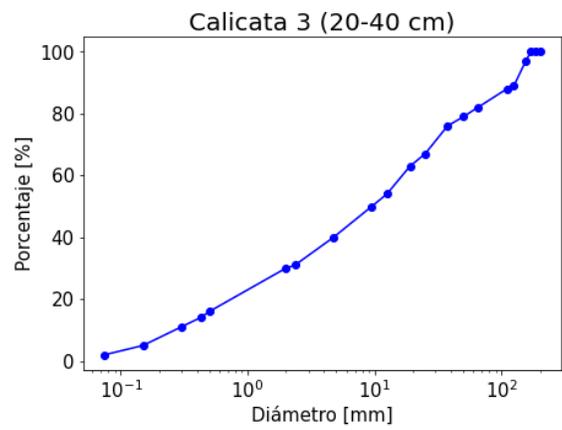


(c) 40-60 cm

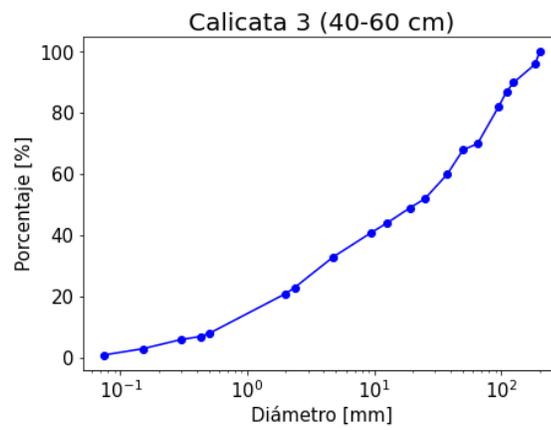
Figuras B.2: Curvas granulométricas Calicata 2.



(a) 0-20 cm



(b) 20-40 cm



(c) 40-60 cm

Figuras B.3: Curvas granulométricas Calicata 3.