



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



**ANÁLISIS DE LA PELIGROSIDAD DE LAS INUNDACIONES CAUSADAS POR LOS
RÍOS LÍA, PICHILLO Y CONUMO, EN LA PROVINCIA DE ARAUCO**

POR

Aldo Ignacio Contreras Espinoza

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

Profesor(es) Guía
Dr. Oscar Link Lazo

Profesional Supervisor
Marcelo García Medel
Subgerente de Ingeniería Zona Sur, Len Ingeniería

30 de enero, 2026
Concepción (Chile)

© 2026 Aldo Ignacio Contreras Espinoza

© 2026 Aldo Ignacio Contreras Espinoza

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

DEDICATORIA

Este documento lo dedico a mi familia, por la paciencia estos años, a mis amigos, el creer en mí, aun cuando yo no lo hacía y finalmente a aquellos que ya no se encuentran entre nosotros, solo les pido que me disculpen por la demora

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Proyecto Anillo ATE220021, titulado “*Climate change and the sociohydrology of floods*”, por los datos facilitados.

Agradecimientos a LEN Ingeniería, por la oportunidad brindada para completar mi formación, y de presentar mis ideas para afrontar a un problema real.

Le agradezco de LEN Ingeniería Zona Sur, por el apoyo, tanto técnico como moral, y las enseñanzas entregadas.

Agradecimientos a Vicente Saenger Derache por la asesoraría mientras construía el modelo.

Gracias a Marcelo García Medel, mi supervisor durante este periodo formativo, por la oportunidad y todo el apoyo entregado.

Gracias a Oscar Link Lazo, mi profesor patrocinante, por guiarme durante el trayecto, especialmente en la recta final.

Gracias a Maricarmen Guerra Paris, profesora parte de mi comisión evaluadora, por su disposición a ayudarme en caso de que lo necesitase.

RESUMEN

La presente memoria de título tiene como objetivo principal analizar la peligrosidad de las inundaciones causadas por las crecidas de los ríos Lía, Pichilo y Conumo en la provincia de Arauco. El área de estudio se caracteriza por una topografía plana y una vulnerabilidad creciente debido al aumento poblacional en las planicies de inundación, con una probabilidad de inundaciones dañinas estimada cada 1.77 años. Para este análisis, se desarrolló un modelo hidrodinámico bidimensional en el *software* Iber, cubriendo una superficie de 1,540 hectáreas. Debido a la incertidumbre en los datos fluviométricos de caudales máximos, el modelo fue calibrado utilizando la crecida ocurrida entre el 14 y 16 de junio de 2025, empleando coeficientes de rugosidad de Manning (0.035 para cauces y 0.05 para planicies) determinados mediante la caracterización granulométrica del lecho D_{50}). La validación se realizó con el evento de junio de 2024, alcanzando un Critical Success Index (CSI) de 0.744, lo que demuestra su alta capacidad predictiva.

A través de la simulación de nueve periodos de retorno, se determinaron áreas de inundación que varían entre 891.3 hectáreas ($T=2$) y 1,040.1 hectáreas ($T=200$). Los resultados identificaron al puente Conumo Chico como un control hidráulico crítico, cuyo efecto de peralte provoca un trasvasije de caudales hacia la cuenca del estero El Molino que representa entre el 36% ($T=2$) y el 58% ($T=200$) del flujo peak del río Conumo. El análisis de peligrosidad, bajo los criterios de la DOH, revela que el 61.96% de la mancha de inundación para un evento frecuente de 2 años ya presenta una peligrosidad alta. Esta condición afecta de forma recurrente a los sectores de Carampangue, Conumo Bajo, Pichilo y La Faja, entregando una base técnica fundamental para la definición y evaluación de medidas de mitigación en las etapas posteriores del proyecto.

ABSTRACT

The main objective of this project is to analyze the flood hazard caused by the Lía, Pichilo, and Conumo rivers in the Arauco Province. The study area is characterized by flat topography and increasing vulnerability due to population growth in floodplains. Given the high recurrence of these events, with a damage-inducing flood probability estimated every 1.77 years, the study focuses on diagnosing hydraulic behavior during periodic floods of varying magnitudes. For this analysis, a two-dimensional hydrodynamic model was developed using *Iber software*, covering an area of 1,540 hectares. Due to uncertainty in fluviometric data for major events, the model was calibrated using the flood occurring between June 14 and 16, 2025, employing Manning's roughness coefficients (0.035 for riverbeds and 0.05 for floodplains) determined through bed granulometry D_{50} characterization). Validation was performed using the June 2024 flood event, achieving a Critical Success Index (CSI) of 0.744, which demonstrates high predictive capacity.

Through the simulation of nine return periods, flood areas were determined to range from 891.3 hectares for $T=2$ to 1,040.1 hectares for $T=200$. The results identified the Conumo Chico bridge as a critical hydraulic control, with its backwater effect causing a flow diversion toward the El Molino stream basin, representing between 36% ($T=2$) and 58% ($T=200$) of the Conumo River's peak flow. The hazard analysis, following DOH criteria, reveals that 61.96% of the flooded area for a frequent 2-year event already presents a high hazard level. This condition repeatedly affects the inhabited sectors of Carampangue, Conumo Bajo, Pichilo, and La Faja, providing a fundamental technical basis for defining and evaluating mitigation measures in subsequent project stages.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3. Alcance del estudio	3
1.4. Plan de trabajo	3
1.5. Principales resultados.....	4
1.6. Organización de la memoria de título	4
CAPÍTULO 2: INUNDACIONES EN EL ÁREA DE ESTUDIO	5
2.1. Introducción	5
2.2. Inundaciones Fluviales y su Interacción con el Medio	5
2.2.1 Amenaza y Vulnerabilidad.....	5
2.3. Recurrencia de las Inundaciones en el Área de Estudio.....	6
2.4. Modelación hidráulica para el análisis de inundaciones	7
2.5. Conclusiones	7
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS	9
3.1. Introducción	9
3.2. Descripción del Área de Estudio.....	9
3.2.1 Topografía	11
3.2.2 Hidrología.....	14
3.2.3 Uso de Suelos	16
3.3. Modelación Hidráulica Bidimensional en Iber	17
3.3.1 Ecuaciones de Saint Venant o Aguas Someras	18
3.3.2 Sensibilidad del coeficiente de rugosidad de Manning.....	19

3.3.3	Mallado.....	20
3.3.4	Análisis de convergencia.....	21
3.3.5	Escenario de Calibración.....	22
3.3.6	Escenario de Validación.....	25
3.4.	Peligrosidad.....	26
3.5.	Conclusiones	28
CAPÍTULO 4: RESULTADOS		29
4.1.	Introducción	29
4.2.	Análisis de Convergencia.....	29
4.3.	Calibración del Modelo	30
4.4.	Validación del Modelo	32
4.5.	Análisis de Sensibilidad del coeficiente de rugosidad de Manning	33
4.6.	Mapas de inundación.....	34
4.7.	Peligrosidad.....	39
4.8.	Conclusiones	43
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.....		45
GLOSARIO		46
REFERENCIAS		47
ANEXO 1.1 CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE....		49
ANEXO 1.2: UBICACIÓN DE LAS CALICATAS (LEN INGENIERÍA, 2025B).....		50
ANEXO 1.3: CALCULO DE N_0 PARA LAS DISTINTAS MUESTRAS.....		51
ANEXO 1.4: MAPAS DE PROFUNDIDADES Y VELOCIDADES		52
ANEXO 1.5: MAPAS DE PELIGROSIDAD		57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Clasificación de las inundaciones según su magnitud histórica (Rojas <i>et al.</i> , 2010)	6
Tabla 2-2: Eventos de inundación registrados entre 2001 y 2024	7
Tabla 3-1: Propiedades Geomorfológicas de los cauces (LEN Ingeniería, 2025b)	10
Tabla 3-2: Periodo de Retorno y Caudales en ríos Carampangue, Conumo, Lía y Pichilo (LEN Ingeniería, 2025b)	14
Tabla 3-3: Duración de una crecida en cada río (tiempo base t_b)	15
Tabla 3-4: Clasificación de usos de suelo y correspondientes de rugosidad de Manning.	16
Tabla 3-5: Diámetros característicos (D50)	19
Tabla 3-6: Medidas de tendencia de los n_0	20
Tabla 3-7: Coeficientes de Rugosidad utilizados en el análisis de sensibilidad.	20
Tabla 3-8: Estaciones Fluviométricas utilizadas en el estudio (Datum: WGS84 H18S)	22
Tabla 3-9: Mediciones Puntuales para validación	23
Tabla 3-10: Criterio de peligrosidad en función de v^*h y A^*M (Cox <i>et al.</i> , 2010)	27
Tabla 3-11: Umbrales de peligrosidad en función de D (Ferrari <i>et al.</i> , 2019)	27
Tabla 3-12: Criterio de Peligrosidad en función de h y v^*h , basado en el criterio de Cox <i>et al.</i> (2010) (DOH, 2024)	27
Tabla 4-1: Cotas de marcas de agua para la crecida de 2024 reportadas por vecinos	31
Tabla 4-2: Métricas de Ajuste para el escenario de calibración	32
Tabla 4-3: Error para distintos valores de rugosidad	33
Tabla 4-4: Área total inundada (ha) para cada periodo de retorno	34
Tabla 4-5: Profundidades Máximas en el Cauce para los periodos de retorno simulados	36
Tabla 4-6: Velocidades máximas para caudales con $T=2$ y $T=100$, aguas arriba de las confluencias de los cauces principales	37
Tabla 4-7: Caudal Trasvasijado a la cuenca del estero El Molino	38
Tabla 4-8: Porcentajes del Área Inundada correspondientes a cada umbral de Peligrosidad	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1: Área de Estudio: a) Chile, b) Región del Biobío, c) Cuenca del río Carampangue, d) Subcuencas de río Lía, Pichilo y Conumo, e) Área de Estudio	10
Figura 3-2: Defensas Fluviales en el Área de Estudio: a) Pichilo, entre el puente Pichilo y la confluencia con río Lía, b) a lo largo del río Conumo, entre Conumo y Carampangue	11
Figura 3-3: Ortofoto	11
Figura 3-4: Perfiles Longitudinales levantados.....	13
Figura 3-5: Modelo de elevación digital acoplado.....	13
Figura 3-6: Problemas con la topobatimetría, cerca de la condición de borde de entrada del río Carampangue.....	14
Figura 3-7: Caudales Normalizados (Q/Q_p) para una tormenta de 2 días de duración (LEN Ingeniería, 2025b).....	15
Figura 3-8: Uso de Suelos	16
Figura 3-9: Coeficientes n de Manning.....	17
Figura 3-10: Esquema de Paralelización en GPU (García-Feal <i>et al.</i> , 2018).....	18
Figura 3-11: Hidrograma tormenta 24h T2	21
Figura 3-12: Hidrograma escenario de Validación	23
Figura 3-13: Foto tomada por dron de la inundación, 16/06/2024 (DOH, 2024)	24
Figura 3-14: Área inundada y Marcas de agua	24
Figura 3-15: Hidrograma Escenario de Calibración (junio-2025)	26
Figura 4-1: Análisis Consecutivo.....	30
Figura 4-2: Altura de agua en el punto de control.....	31
Figura 4-3: Área Inundada Registrada vs Área Inundada Modelada	31
Figura 4-4: Elevación de la superficie de agua en el punto de control	32
Figura 4-5: Error para distintos valores de rugosidad	33
Figura 4-6 Mapa de inundación para los distintos periodos de retorno	34
Figura 4-7: Mapas de Profundidades: a) T=2, b) T=10, c) T=50, d) T=100.....	35
Figura 4-8: Mapas de Velocidades: a) T=2, b) T=10, c) T=50, d) T=100	37
Figura 4-9: Mapas de Peligrosidad: a) T=2, b) T=10, c) T=50, d) T=100.....	39
Figura 4-10: Mapas de Peligrosidad, Sector Carampangue: a) T=2, b) T=10, c) T=50, d) T=100	41
Figura 4-11: Mapas de Peligrosidad, Sector Conumo: a) T=2, b) T=10, c) T=50, d) T=100.....	42

Figura 4-12: Mapas de Peligrosidad Sectores Pichilo y La faja: a) T=2, b) T=10, c) T=50, d) T=100	
.....	43

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

El fondo del valle en el que se desarrollan los ríos Conumo, Lía y Pichilo en la provincia de Arauco es de topografía plana, lo cual lo vuelve propenso a inundarse durante eventos de crecida de los ríos mencionados, afectando una amplia superficie que corresponde a la planicie de inundación del valle. Las inundaciones generan daños en viviendas, actividades agrícolas y turísticas, y afectan la capacidad de desplazamiento de personas que habitan en este territorio.

Los daños por inundaciones son especialmente graves en la confluencia de los ríos Lía y Pichilo, donde nace el río Conumo, ya que históricamente se ha inundado con una frecuencia alta, siendo el último gran evento de inundación el ocurrido durante de junio de 2024, dejando un total de 400 familias afectadas en la provincia.

En este contexto la Dirección de Obras Hidráulicas de la Región del Biobío ha ejecutado obras de defensas fluviales para la conservación de las riberas de estos cauces, así como labores de limpieza, perfilamiento y desembanque. Además, se han realizado defensas del tipo gaviones y enrocados en ciertos tramos de los sectores poblados, las cuales, si bien cumplen su función de proteger estos sectores, son incapaces de evitar el desborde en todos los eventos de crecida. Sumado al creciente aumento de población y actividades agrícolas y turísticas, se genera una situación de vulnerabilidad creciente, lo que a su vez, aumenta el riesgo de que las viviendas, población y actividades desarrolladas en la zona sean afectadas cada vez de forma más frecuente por las inundaciones.

Dado estos antecedentes, y la poca información técnica que existe en la zona, el Ministerio de Obras Públicas (MOP), a través de la DOH licitó el proyecto de consultoría “DIAGNÓSTICO PLAN MAESTRO RÍOS CONUMO, PICHILLO Y LÍA, COMUNA DE ARAUCO, REGIÓN DEL BIOBÍO”, que fue adjudicado por LEN INGENIERÍA.

El objetivo general del proyecto de consultoría es analizar la situación actual de los ríos Conumo, Pichilo y Lía hasta la confluencia con el río Carampangue. Con ello, se busca actualizar la información existente en el territorio, de modo de establecer el espacio fluvial necesario para que cada uno de los ríos indicados anteriormente “pueda expresar”, en la medida de lo posible, su estilo fluvial con pocos inconvenientes para los habitantes del sector, generando los menores impactos negativos en la población ribereña.

Además, el proyecto de consultoría debe generar un plan de acciones que permitan la gestión de los cauces estudiados, realizando un reconocimiento del territorio no solo a nivel técnico y económico,

sino que también en aspectos sociales y ambientales, identificando por ejemplo especies de flora y fauna sensible, ecosistemas protegidos, asentamientos indígenas, sitios de interés arqueológicos y/o religiosos u otros relevantes.

Los objetivos específicos del proyecto de consultoría son:

- Elaborar un diagnóstico actualizado de los ríos Conumo, Pichilo y Lía, determinando sus comportamientos hidráulicos y sus características físicas para lograr identificar y cuantificar las zonas de inundación, de peligro de socavación y de eventual colapso de infraestructura existente para distintos periodos de retorno.
- Crear un espacio fluvial de los ríos Conumo, Pichilo y Lía que permita el escurrimiento seguro de las aguas en sus bajas y crecientes, mediante fundamentos técnicos: geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos, de uso de suelos y legales.
- Analizar la variabilidad morfológica de los cauces, identificando sectores con tendencia a la erosión, depositación, teniendo en cuenta las actividades antrópicas, como extracciones de áridos.
- Estudiar la situación actual de los cauces Conumo, Pichilo y Lía, identificando zonas de alto riesgo para evaluar un adecuado uso del territorio, y si se requiere, soluciones del tipo obras fluviales y/o de control de aluviones.
- Proponer líneas de acción, en términos de alternativas o medidas que permitan enfrentar la problemática identificada.
- Generar instancias que permitan la interrelación entre los distintos usuarios del cauce (privados y públicos) de modo de propender a la regulación de los usos y a los usuarios de cada uno de los cauces.
- Generar un Plan Maestro para la gestión adecuada de estos cauces.
- Desarrollar las alternativas de solución a nivel de anteproyecto de aquellas obras que se visualizan como necesarias.
- Elaborar un estudio de análisis ambiental de las posibles soluciones planteadas, con la finalidad de que permita determinar la pertinencia de ingreso al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

El proyecto consta de cinco etapas:

- ETAPA 1: RECONOCIMIENTO DEL TERRITORIO, REVISIÓN, ANÁLISIS E INTEGRACIÓN DE ANTECEDENTES.

- ETAPA 2A: ESTUDIOS BÁSICOS
- ETAPA 2B: LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO Y CATASTRO.
- ETAPA 3: ANÁLISIS HIDRÁULICO Y DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA FLUVIAL.
- ETAPA 4: ELABORACIÓN DE PLAN MAESTRO DE CAUCES.
- ETAPA 5: INFORME FINAL.

Esta memoria de título se desarrolla en el marco del primer objetivo específico, durante la tercera etapa del proyecto y busca analizar el comportamiento hidráulico de los cauces en situación de crecida mediante el uso de modelos numéricos bidimensionales, generando como resultados mapas de velocidad, profundidad y peligrosidad.

El Anexo 1.1 muestra la contribución de la Memoria de Título a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar la peligrosidad de las inundaciones causadas por los ríos Lía, Pichilo y Conumo, en la provincia de Arauco.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo hidrodinámico bidimensional de los ríos Lía, Pichilo y Conumo en el *software Iber*.
- Simular la inundación causada por crecidas con distintos periodos de retorno.
- Analizar la peligrosidad en las áreas inundadas.

1.3. Alcance del estudio

El alcance de este estudio es la elaboración del modelo hidráulico para simular inundaciones de distintos periodos de retorno y evaluar la peligrosidad asociada a estas inundaciones dentro del área de estudio.

1.4. Plan de trabajo

El plan de trabajo considera: revisión de la documentación del proyecto y del *software* de modelación a utilizar, recopilación de antecedentes técnicos requeridos para la modelación y definición de los

parámetros del modelo en función de estos y la literatura existente, desarrollo del modelo hidrodinámico bidimensional incluyendo la calibración y validación del modelo en base a información en terreno, simulación de las crecidas para los periodos de retorno requeridos y análisis de resultados.

1.5. Principales resultados

Se desarrolló, calibró y validó un modelo hidrodinámico bidimensional de la parte baja de los ríos Conumo, Lía y Pichilo. Con este, se determinaron los mapas de máximos para 9 periodos de retorno distintos, y en base a estos se obtuvieron mapas de peligrosidad asociados a cada periodo.

1.6. Organización de la memoria de título

Este trabajo se organiza en cuatro capítulos:

El capítulo 1 cubre la introducción del documento, la motivación detrás del estudio, los objetivos de este, sus alcances, una breve descripción del plan de trabajo durante el desarrollo de este y un resumen de los resultados esperados. El capítulo 2 presenta el fenómeno de las inundaciones fluviales, los conceptos de vulnerabilidad y amenaza, y la recurrencia de las inundaciones que impactan negativamente a la población ribereña.

El capítulo 3 cubre los materiales y métodos utilizados. Incluye una descripción técnica del área de estudio enfocado en sus cauces y las planicies inundables, los caudales y topobatimetría utilizados, los usos de suelo asignados, los valores del coeficiente de rugosidad de Manning asignados, una descripción del *software* de simulación *Iber* y las ecuaciones gobernantes del problema, el análisis de convergencia realizado para determinar el tamaño de mallado de cálculo, una descripción del escenario de calibración y validación, análisis de sensibilidad del modelo a variaciones del coeficiente de rugosidad de Manning, una descripción del escenario de validación y la definición de Peligrosidad

El capítulo 4 presenta los resultados y conclusiones del estudio. Incluye los resultados del análisis de convergencia del mallado, el proceso de calibración y la sensibilidad del modelo a cambios en el coeficiente de rugosidad, a validación y los mapas de inundación y peligrosidad del área de estudio.

CAPÍTULO 2: INUNDACIONES EN EL ÁREA DE ESTUDIO

2.1. Introducción

En este capítulo se presenta la problemática causada por el desborde de los ríos desde una perspectiva del riesgo, distinguiendo el rol de la amenaza y de la vulnerabilidad, y se realiza una revisión de estudios en los que se ha hecho uso de modelos numéricos para simular inundaciones en la zona.

2.2. Inundaciones Fluviales y su Interacción con el Medio

Las inundaciones fluviales son un proceso natural por el cual el flujo desborda los límites de un cauce. Este proceso se vuelve peligroso cuando las planicies inundables son ocupadas por el hombre, volviéndose una amenaza para los habitantes de la zona. Al materializarse la amenaza, produce catástrofes o desastres, afectando al sistema social (Merz *et al.* (2010); Rojas y Martínez, (2011), citados por Faundez (2017)).

En el área estudiada, debido a su topografía, existe una fuerte interacción entre los cauces y sus planicies de inundación, y a su vez, existe un creciente aumento poblacional en el territorio ribereño de la zona, motivado tanto por el terremoto del 27 de febrero de 2010 (que motivó a la población a alejarse del borde costero), como por la pandemia provocada por el virus SARS-CoV-2 (que motivó a las personas a distanciarse de áreas con mucha densidad poblacional) entre los años 2020 y 2023 (LEN Ingeniería, 2025a), siendo este crecimiento de la población, un factor que provoca el aumento de las zonas vulnerables ante los eventos de inundación en el área al expandir los asentamientos hacia las planicies.

2.2.1 Amenaza y Vulnerabilidad

La ley N° 21.364, define en su artículo 2, incisos a y f) los conceptos de Amenaza como “fenómeno de origen natural, biológico o antrópico, que puede ocasionar pérdidas, daños o trastornos a las personas, infraestructura, servicios, modos de vida o medio ambiente” y Vulnerabilidad como “aquellas condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, institucionales, económicos o ambientales que aumentan la susceptibilidad de una persona, una comunidad, los bienes, infraestructuras o servicios, a los efectos de las amenazas”.

2.3. Recurrencia de las Inundaciones en el Área de Estudio

Rojas *et al.* (2010) analizaron múltiples eventos de inundación en el curso inferior del río Carampangue entre 1971 y 2008 clasificando estos eventos de acuerdo con su duración, la cantidad de damnificados y los daños socioeconómicos, de la forma que se muestra en la Tabla 2-1. Finalmente, el estudio indica que cada 2.23 años existe la probabilidad de que se produzca una inundación capaz de generar algún tipo de daño (magnitud 1) y que cada 19 años se produciría una inundación severa (magnitud 3)

Tabla 2-1:Clasificación de las inundaciones según su magnitud histórica (Rojas *et al.*, 2010)

Magnitud Histórica Relativa			
Tipología	Inundación Grande	Inundación Mediana	Inundación Pequeña
Duración del Evento (N° de días)	4 días	2-3 días	1 día
Peso	3	2	1
Damnificados	80+ Personas	41-80 Personas	1-40 Personas
Peso	6	4	2
Daños Socioeconómicos	Daños viales importantes	Daños viales importantes	Daños viales aislados
	Viviendas con daño estructural	Viviendas inundadas sin daño estructural	Daños inferiores a 1M
	Perdidas Agrarias	Daños entre 1-10M	
	Rutas Cortadas		
	Daños superiores a 10M		
Peso	6	4	2
Evaluación Final	Inundación Grande		13-15
	Inundación Media		9-12
	Inundación Baja		5-8

Considerando el estudio previamente mencionado, y la información registrada en la recopilación de notas de prensa realizada en el informe de la Etapa 1 del proyecto (LEN Ingeniería, 2025a), se registran 13 eventos de diversa magnitud entre los años 2000 y 2025, siendo los más severos los eventos de junio de 2003, julio de 2006 y junio del 2024. Este último evento es el que motiva la realización del presente proyecto, y, utilizando la clasificación de Rojas *et al.* (2010), se estima que,

para este periodo de tiempo, existe una recurrencia de inundaciones de 1.77 años para eventos de al menos magnitud 1, como se detalla en la tabla 2-2.

Tabla 2-2: Eventos de inundación registrados entre 2001 y 2024

Año	Mes	Fecha
2001	Julio	3-5
2001	Agosto	3
2001	Agosto	24-28
2003	Junio	18-21
2006	Julio	18
2008	Septiembre	1-2
2014	Junio	14
2014	Julio	29
2017	Junio	16
2019	Junio	27-28
2023	Julio	24
2023	Agosto	20
2024	Junio	5-17

2.4. Modelación hidráulica para el análisis de inundaciones

Los modelos numéricos de simulación hidráulica brindan información valiosa para la gestión del riesgo de inundaciones, obteniendo estimaciones de la amenaza que representan los eventos de inundaciones (Alarcón, 2022).

Se han realizado múltiples estudios previos del curso bajo del río Carampangue mediante modelos numéricos, como en la elaboración del plan maestro de aguas lluvias de la comuna de Arauco, cuya área de estudio abarca 8.43 km² desarrollado por Arrau Ingeniería, el cual considera obras como puentes y atraviesos, o los estudios realizados por Faúndez (2017), Alarcón (2022) y Alarcón *et al.* (2025) para el área comprendida entre la localidad de Ramadillas y la desembocadura del río. El primero, realizó un estudio similar al del presente documento para el tramo del cauce descrito, determinando manchas de inundación y niveles de peligrosidad para diversos periodos de retorno. Los otros dos estudios mencionados, evaluaron y validaron el uso de cartografías sociales (mapas colaborativos, hechos en conjunto con la comunidad) para la calibración de modelos numéricos.

2.5. Conclusiones

En el presente capítulo, se puede apreciar como el incremento del uso en el territorio ribereño presenta un aumento, vía exposición, de la vulnerabilidad de los espacios habitados, y se desprende que este aumento poblacional en las planicies inundables incurre en un aumento de las afectaciones producto

de eventos de inundación, como se puede apreciar en la variación de la recurrencia histórica para el periodo 2001-2024 y brevemente se analizaron los estudios previamente realizados en la zona en los que se implementaron modelos numéricos.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Introducción

En la primera parte de este capítulo, se hará una descripción del área de estudio, la cuenca en la que está inscrita, sus características topográficas e hidrológicas y el uso de suelos. Posteriormente, se describirá el modelo, el *software* utilizado, las ecuaciones gobernantes del problema, y sus variables de entrada, análisis de convergencia y la elección del tamaño de malla, el escenario de calibración utilizado y la sensibilidad del coeficiente de rugosidad de Manning en el modelo. Finalmente, se definirá el concepto de peligrosidad, y algunos criterios para calcularla.

3.2. Descripción del Área de Estudio

El área de estudio, presente en la Figura 3-1, se encuentra inscrita en la parte baja de la cuenca del río Carampangue, principalmente en la subcuenca del río Conumo, cubriendo una superficie de 1540 hectáreas. El río Conumo nace en la confluencia de los ríos Lía y Pichilo, en la localidad de Pichilo, Arauco, el detalle de las características geomorfológicas de los cauces y sus respectivas cuencas, se encuentra en la tabla 3-1.

En esta zona, se han materializado dos defensas fluviales del tipo gavión, señaladas en la Figura 3-2, las cuales, según lo mencionado por la DOH en las bases del proyecto, no logran proteger las áreas en las que se emplazan de todos los desbordes.

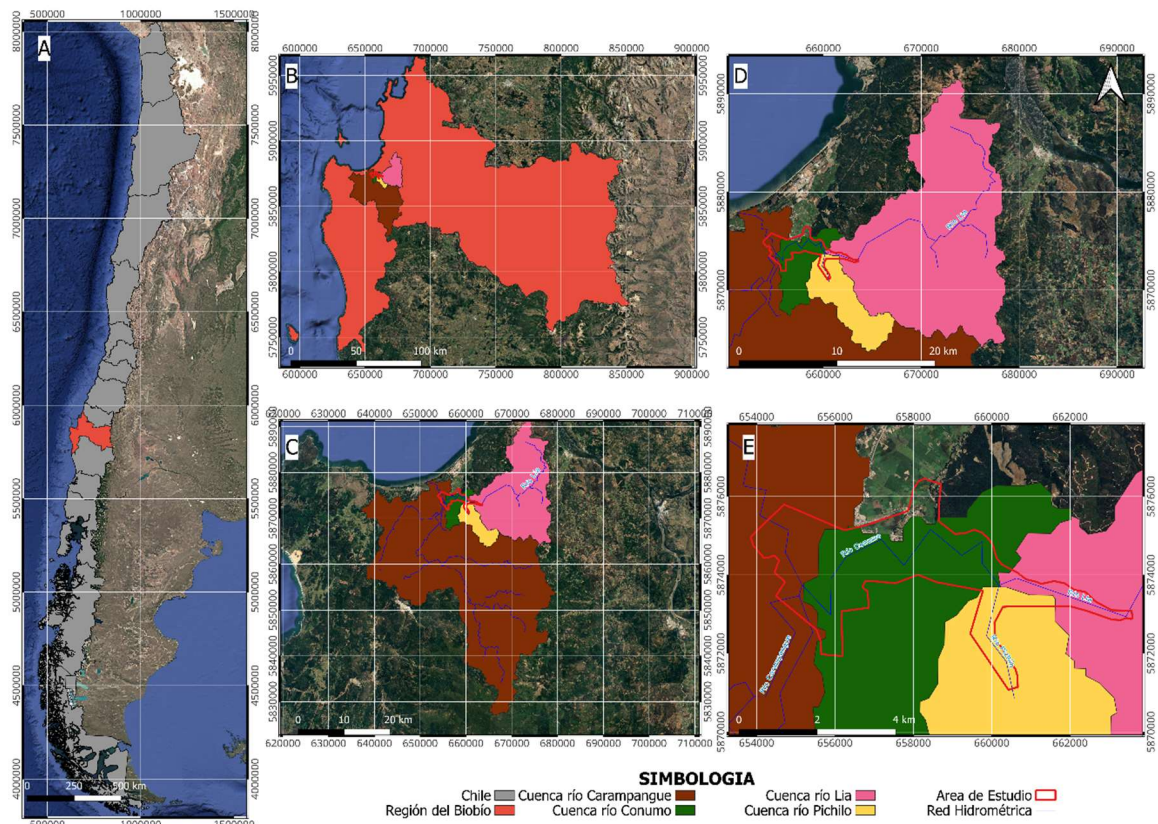


Figura 3-1: Área de Estudio: a) Chile, b) Región del Biobío, c) Cuenca del río Carampangue, d) Subcuencas de río Lía, Pichilo y Conumo, e) Área de Estudio

Tabla 3-1: Propiedades Geomorfológicas de los cauces (LEN Ingeniería, 2025b)

Cuenca	Area (km ²)	Cota Mínima (m.s.n.m)	Cota Máxima (m.s.n.m)	Cota Media (m.s.n.m)	Pend Media Cuenca (%)	Pend Cauce Principal (%)	Largo Cauce Principal (km)	Largo a Centroide (km)
Río Pichilo antes confluencia Río Lía	34.9	22.6	906.2	440.2	24.5	11.2	10.7	3.5
Río Lía antes confluencia Río Pichilo	275.3	20.6	902.4	435.3	23.9	3.3	43.7	15.9
Río Conumo antes confluencia Río Carampangue	336.8	12.6	906.2	409.2	22.5	7.9	51.7	23.9
Río Carampangue antes confluencia Río Conumo	861	20.9	1300	405.2	16.3	6.7	69.5	53.2

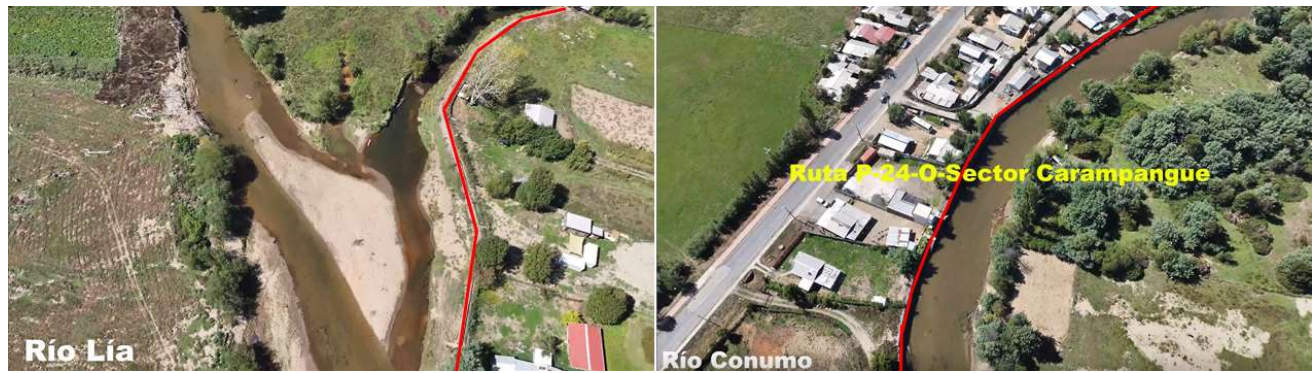


Figura 3-2: Defensas Fluviales en el Área de Estudio: a) Pichilo, entre el puente Pichilo y la confluencia con río Lía, b) a lo largo del río Conumo, entre Conumo y Carampangue

3.2.1 Topografía

Para el área de estudio descrita en el acápite anterior, se realizó un levantamiento LiDAR (*Light Detection and Ranging*, por sus siglas en inglés) considerando la misma extensión de 1500 ha aproximadamente, generando la ortofoto presente en la Figura 3-3.

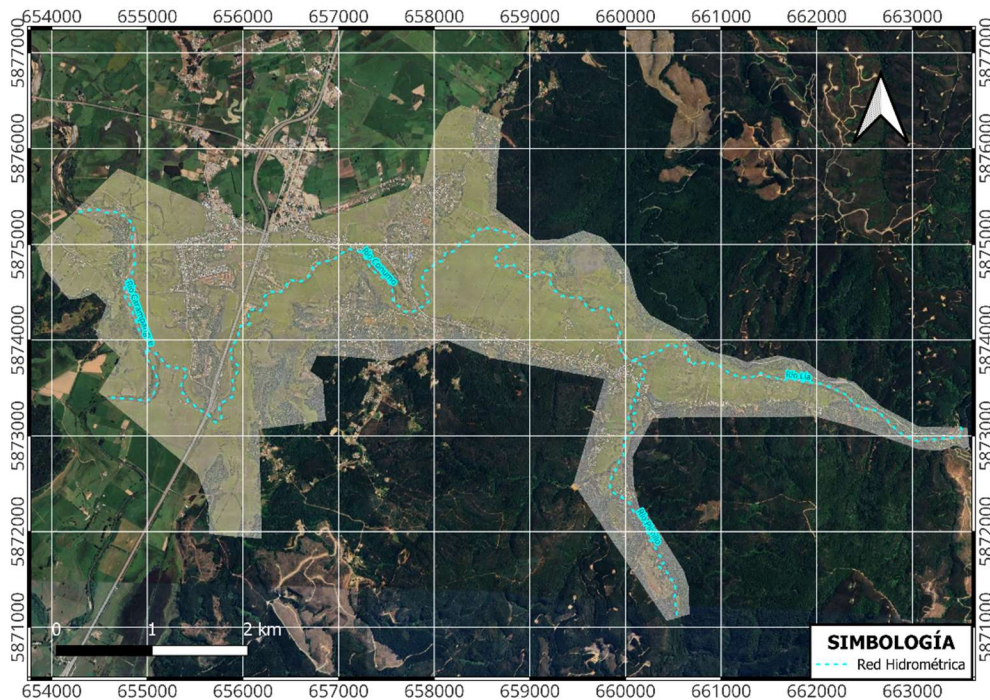


Figura 3-3: Ortofoto

La obtención del modelo digital de elevación se realizó en base al levantamiento LiDAR previamente mencionado, considerando una escala de 1:1000, con una densidad de 4 puntos por m^2 este modelo tiene una resolución de 0.5 m x 0.5 m, y una precisión altimétrica de ± 0.25 m.

El levantamiento topográfico cuenta una red de 39 puntos de referencia, los que se utilizaron para hacer el amarre terrestre obteniendo una precisión vertical de 2 cm, lo que está dentro de la tolerancia exigida por la DOH (LEN Ingeniería, 2025c).

Cabe señalar, que el sensor utilizado en el levantamiento LiDAR no capta datos bajo superficies reflectantes, como es el caso del espejo de agua, por lo que se complementó el levantamiento LiDAR con la toma de 100 perfiles topobatimétricos a lo largo de los cauces analizados. Estos perfiles, se tomaron mediante el uso de GPS con método Cinemático en Tiempo Real (RTK), utilizando un sistema GNSS Trimble R9s Multifrecuencia, los cuales tienen una precisión horizontal y vertical de $8\text{mm} + 1\text{ ppm RMS}$ y $15\text{ mm} + 1\text{ ppm RMS}$ (LEN Ingeniería, 2025d).

Los perfiles obtenidos, presentes en la Figura 3-4, fueron interpolados mediante el uso de HEC-RAS, obteniéndose un modelo topobatimétrico de los cauces, el cual posteriormente fue acoplado al MDE, como se presenta en la Figura 3-5.

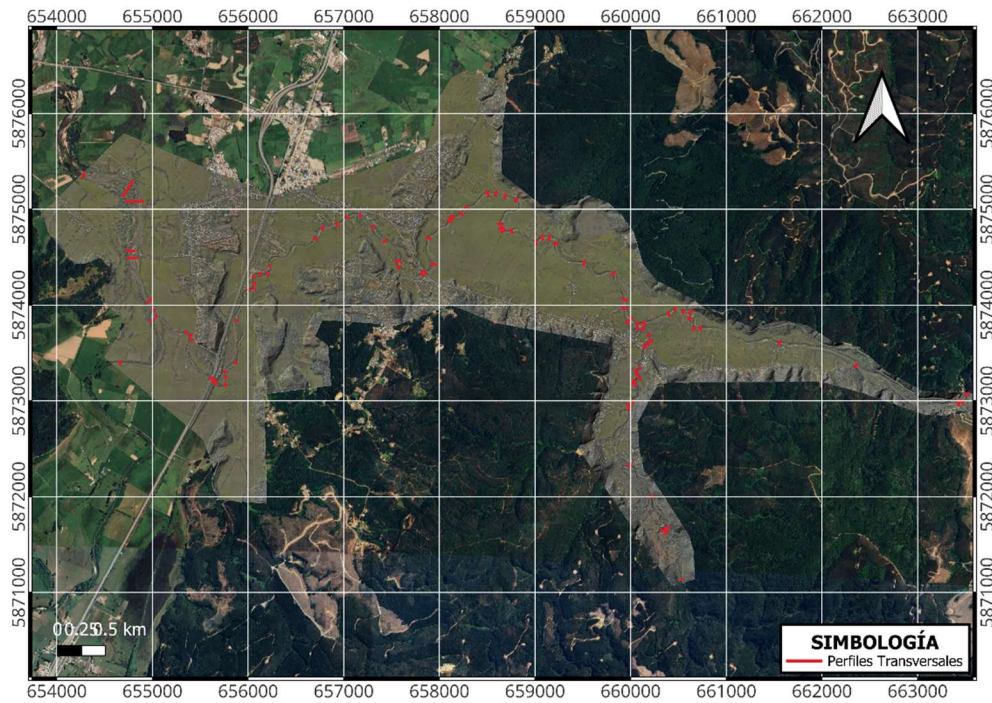


Figura 3-4: Perfiles Longitudinales levantados

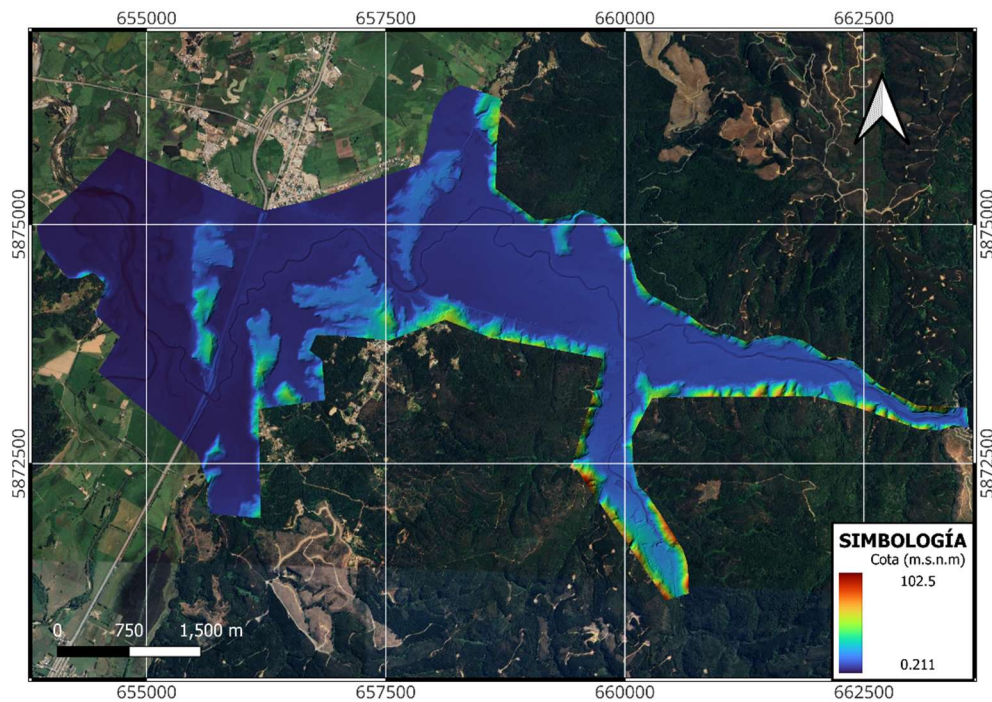


Figura 3-5: Modelo de elevación digital acoplado

Es necesario precisar, que el DEM acoplado contiene imprecisiones en el cauce, debido a problemas asociados a la toma de puntos en algunos perfiles batimétricos, como se muestra de ejemplo en la Figura 3-6, donde aguas arriba del perfil no se tomaron datos, por lo que se le quita espacio al

escurrimiento. Por el contexto del proyecto, no es posible hacer correcciones durante esta etapa, por lo que esto podría generar errores localmente en los resultados.

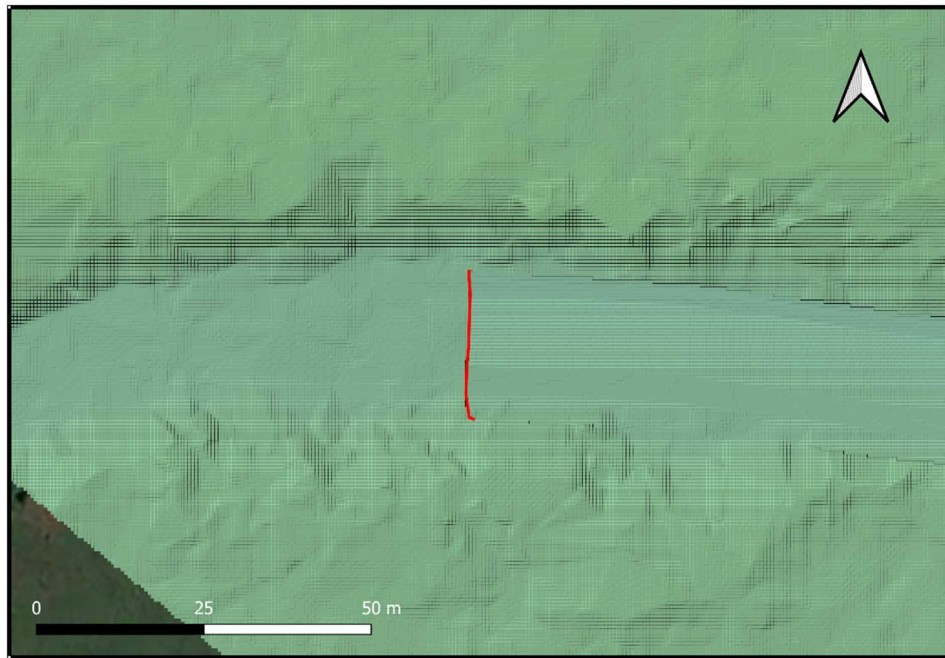


Figura 3-6: Problemas con la topobatimetría, cerca de la condición de borde de entrada del río Carampangue

3.2.2 Hidrología

Del estudio hidrológico realizado durante la etapa 2A del proyecto (LEN Ingeniería, 2025b), se tiene que los caudales para periodos de retorno entre 2 a 200 años en los diferentes cauces son los indicados en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Periodo de Retorno y Caudales en ríos Carampangue, Conumo, Lia y Pichilo (LEN Ingeniería, 2025b)

Periodo de Retorno T (Años)	Caudales de Crecidas Adoptados (m ³ /s)			
	Carampangue	Conumo	Lia	Pichilo
2	852	354	329	58.9
5	1256	510	477	85.5
10	1569	629	591	106.3
20*	1934	770	722	131
25	2007	796	749	135.7
50	2356	930	875	159.4
100	2717	1069	1006	184.1
150	2933	1154	1084	199
200	3088	1214	1140	209.8
* Los caudales para T20 fueron obtenidos ajustando una curva para cada río				

Estos caudales máximos, son elevados si se comparan con investigaciones previamente realizadas en la cuenca del río Carampangue, como los estudios de Faundez (2017), Veloso *et al.* (2022) y Alarcon *et al.* (2025), debido a que fueron estimados mediante una metodología distinta. Mientras los estudios citados previamente se determinaron mediante el análisis de caudales máximos anuales, ajustando una distribución estadística a estos, y en función de esta determinar los caudales, el estudio realizado en este proyecto utilizó hidrogramas unitarios para determinar los máximos haciendo un análisis de las precipitaciones máximas.

En dicho estudio se determinó que los mayores caudales se obtienen para tormentas de 2 días de duración, y que el hidrograma correspondiente es el mostrado en la Figura 3-7,

et

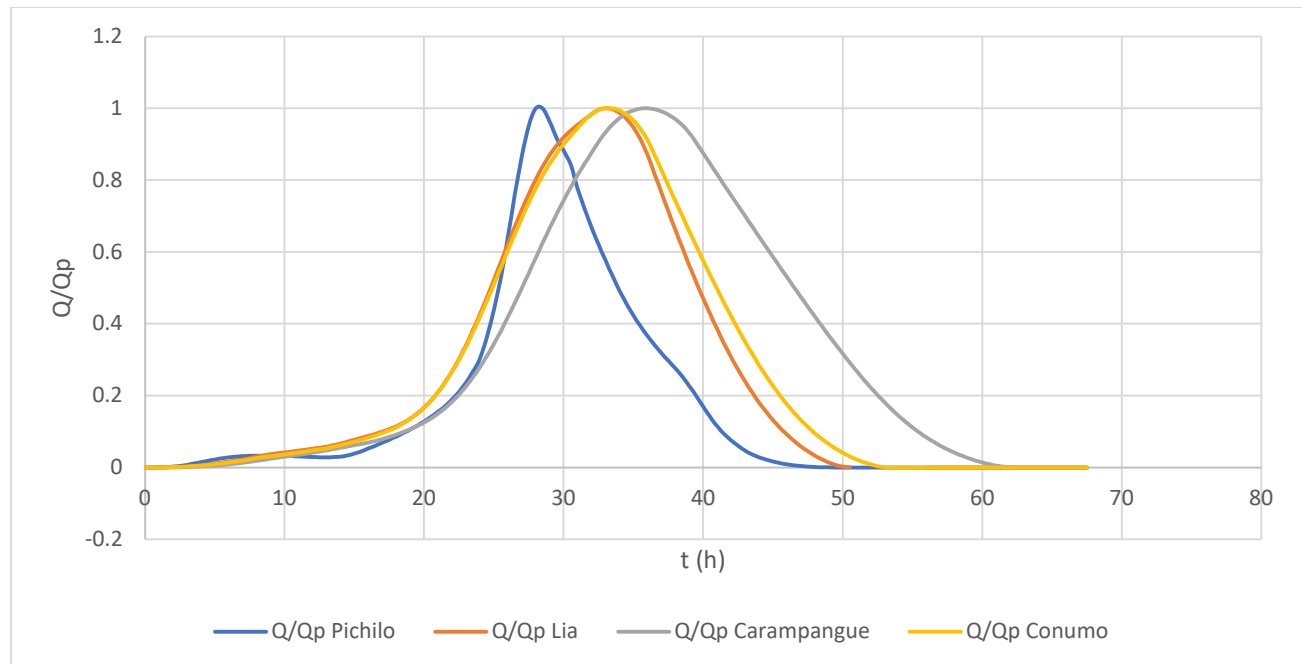


Figura 3-7: Caudales Normalizados (Q/Q_p) para una tormenta de 2 días de duración (LEN Ingeniería, 2025b)

El tiempo base para estos hidrogramas, es de 48 h para el río Pichilo, 49.5 h para el río Lía, 52 h para el río Conumo y 61 h para el río Carampangue, como se presenta en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3: Duración de una crecida en cada río (tiempo base t_b)

Río	Inicio Crecida (h)	Termino Crecida (h)	Tiempo base (h)
Pichilo	1	49	48
Lia	1	50.5	49.5
Conumo	1	53	52
Carampangue	1	62	61

3.2.3 Uso de Suelos

Se realizó una clasificación de uso de suelos en el área de estudio, considerando las categorías, y respectivos coeficientes de rugosidad de Manning (n) que se presentan en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4: Clasificación de usos de suelo y correspondientes de rugosidad de Manning.

Categoría	Valor mínimo	Valor normal	Valor máximo	Valor seleccionado	Fuente
Río	0.033	0.04	0.045	a calibrar	1.
Planicie Inundable	0.04	0.06	0.08	a calibrar	1.
Bosque	0.08	0.1	0.2	0.12	2.
Zona Residencial Urbana	0.08	0.15	0.16	0.15	2.
Zona Residencial Rural	0.06	-	0.12	0.12	2.
Defensa Fluvial *	-	-	-	0.1	3.
Cerro **	0.08	-	0.2	0.18	2.

*Corresponde a una representación de las defensas fluviales en el Área

**Corresponde a una discretización de los cerros, montañas y zonas que producto de su elevada cota, siempre permanecen secas, prevalece por sobre otros usos de suelo que la intersecten

1. (Chow, 1994)

2. (U.S. Army Corps of Engineers, 2024)

3. Valor por defecto de Iber para infraestructura de transporte.

La distribución espacial de estos usos de suelo está presente en la se muestra en la Figura 3-8 y los coeficientes rugosidad de Manning en la Figura 3-9.

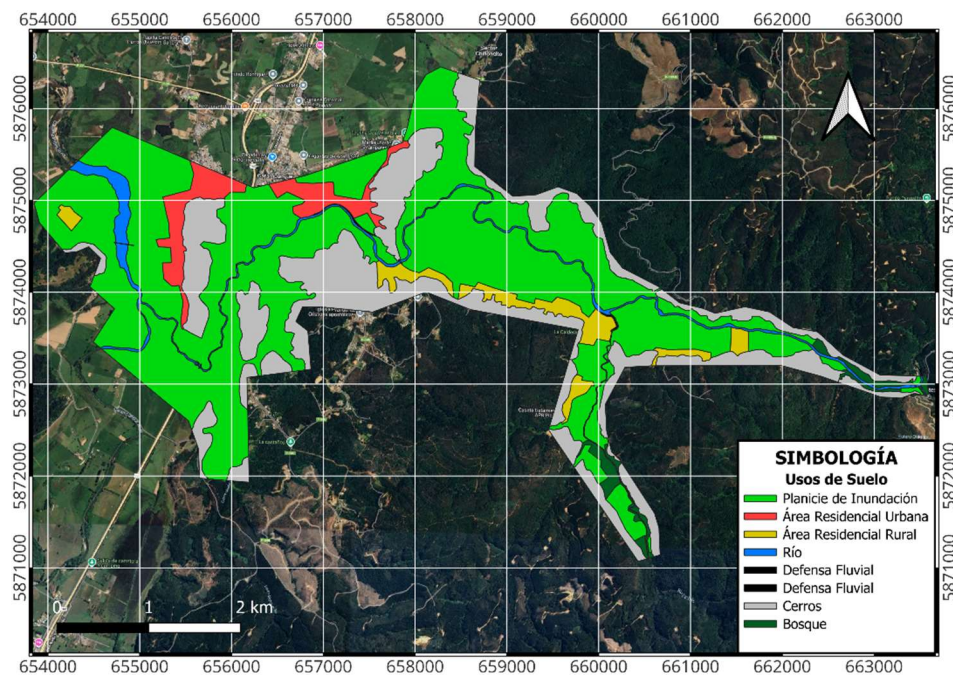


Figura 3-8: Uso de Suelos

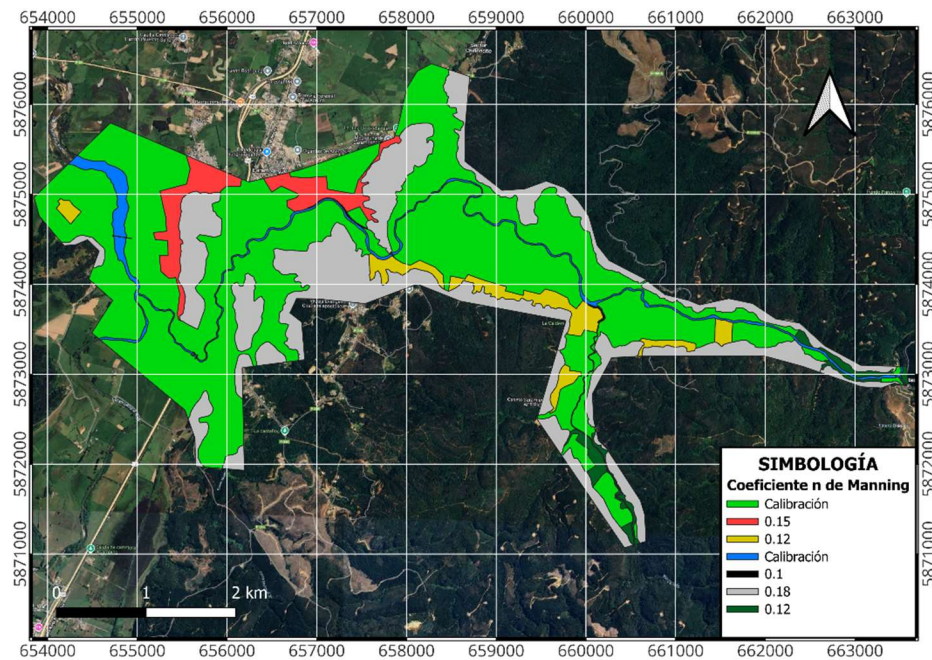


Figura 3-9: Coeficientes n de Manning

3.3. Modelación Hidráulica Bidimensional en Iber

Iber, es un modelo matemático bidimensional para la simulación de flujos en lámina libre en ríos o estuarios (Bladé *et al.*, 2014). Es un proyecto comunitario multidisciplinario de múltiples instituciones, tanto educacionales como gubernamentales: *International Centre for Numerical Methods in Engineering* (Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, CIMNE), instituto Flumen (UPC– CIMNE), Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (Universidade da Coruña, UdC), Centro de Estudios Hidrológicos (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX, dependiente los Ministerios de Fomento y de Agricultura y Medio Ambiente de España), Universidade de Santiago de Compostela, *Universit t Bern* y EPhysLab (*Universade de Vigo*).

Está desarrollado utilizando como base GID (desarrollado CIMNE, herramienta de pre y postproceso CAD para modelos numéricos), su código está escrito en Fortran y con una implementación de OpenMP para poder realizar cálculos secuenciales multiuso, con una interfaz gráfica similar a otras herramientas CAD. Durante los últimos años, se han desarrollado 2 algoritmos de paralelización en GPU para poder acelerar los cálculos que se realizan:

- Iber+: Desarrollado en C++, compatible con GPUs NVIDIA y AMD (García-Feal *et al.*, 2018)
- Iber Rapid (R-Iber): Desarrollado en CUDA Fortran, solo es compatible con GPU NVIDIA (CUDA es una tecnología propietaria de NVIDIA)(Sanz-Ramos *et al.*, 2023)

En estos algoritmos, la CPU maneja los tiempos de simulación y la escritura de resultados, mientras la GPU realiza los cálculos de los flujos, como se muestra en la Figura 3-10.

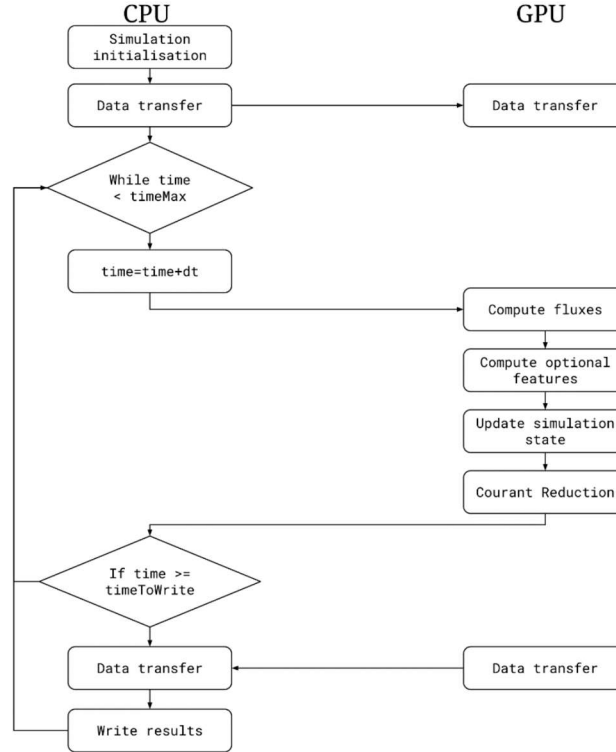


Figura 3-10: Esquema de Paralelización en GPU (García-Feal *et al.*, 2018)

3.3.1 Ecuaciones de Saint Venant o Aguas Someras

En los modelos numéricos bidimensionales, se asume que la variación de las velocidades en el eje vertical tiende a cero. Las ecuaciones de Navier-Stokes se integran en la vertical, obteniendo las ecuaciones de Saint Venant, o de aguas someras (SWE):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = 0 \quad (3-1)$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(h U_x^2 + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (h U_x U_y) = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \quad (3-2)$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(h U_y^2 + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (h U_x U_y) = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) \quad (3-3)$$

$$\tau_{b,x} = \rho g h \frac{n^2 U_x |U|^2}{h^{4/3}} \quad (3-4)$$

$$\tau_{b,y} = \rho g h \frac{n^2 U_y |U|^2}{h^{4/3}} \quad (3-5)$$

La Ecuación 3-1 es la ecuación de continuidad, la Ecuación 3-2 y Ecuación 3-3 el principio de conservación del momentum en los ejes horizontales x e y, y las ecuaciones (3-4) y (3-5), la fricción de fondo, aproximada por Iber de forma automática en función del coeficiente de Rugosidad de Manning.

3.3.2 Sensibilidad del coeficiente de rugosidad de Manning

Se tiene como antecedente que el estudio realizado por Alarcón *et al.* (2025) demostró que, si bien los modelos presentan una mayor sensibilidad a los cambios asociados a los coeficientes de cauces y planicies, respecto al resto de usos de suelos, en dicho estudio se concluye también que las variaciones en los coeficientes de Manning no repercuten mayormente en las profundidades del escurrimiento.

Se decidió estimar el coeficiente de Manning inicial en función del diámetro característico del sedimento de los cauces (D_{50}) caracterizado durante los estudios de mecánica de suelos realizados en la Etapa 2A. El resumen de D_{50} se encuentra en la Tabla 3-5, la distribución espacial de las calicatas se encuentra en el Anexo 1.2.

Se empleó el n_0 definido por el método de Cowan, descrito en el Volumen N°3 del Manual de Carreteras (Dirección de Vialidad, 2024) para poder determinar el coeficiente de rugosidad de Manning. Este se estimó utilizando de la ecuación de Strickler mostrada en la Ecuación 3-6.

Tabla 3-5: Diámetros característicos (D_{50})

Calicata	D_{50} (mm)	Calicata	D_{50} (mm)	Calicata	D_{50} (mm)	Calicata	D_{50} (mm)
C1-C-LI	11.992	C10-C-CO	0.813	C19-C-CO	0.268	C28-C-CA	1.309
C2-C-LI	1.626	C11-C-CO	2.243	C20-C-CO	1.084	C29-C-CA	1.314
C3-C-LI	1.622	C12-C-CO	1.58	C21-R-CO	0.355	C30-C-PI	13.681
C4-C-LI	1.642	C13-C-CO	0.956	C22-C-CO	1.072	C31-C-PI	19
C5-R-LI	0.186	C14-C-CO	1.477	C23-C-CO	0.306	C32-C-PI	12.254
C6-C-LI	0.476	C15-C-CO	1.107	C24-C-CO	0.346	C33-C-LI	2.976
C7-R-LI	0.156	C16-C-CO (E1)	1.503	C25-C-CO	1.578	C34-C-PI	1.226
C8-C-LI	1.631	C17-C-CO	1.329	C26-C-CO	0.296	C35-C-PI	0.687
C9-R-LI	0.111	C18-C-CO (E1)	0.839	C27-C-CO	0.812	C36-C-PI	0.204

$$n_0 = 0.038 D^{1/6} \quad (3-6)$$

Considerando solo las muestras considerables como arena (lo que excluye las muestras C1, C30, C31 y C32), las medidas de tendencia de las muestras son las presentes en la Tabla 3-6, y los valores de n_0 de cada muestra se presentan el Anexo 1.3. Se adoptó como valor representativo para los cauces en el

área de estudio un valor de 0.035 y 0.05 para las planicies de inundación, acorde a la bibliografía existente.

Tabla 3-6: Medidas de tendencia de los n_0

Promedio	0.037
Mediana	0.038
Desviación estándar	0.005
Máximo	0.046
Mínimo	0.026

Se realizaron 7 simulaciones, con distintas combinaciones de rugosidad de Manning, las cuales se presentan en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7: Coeficientes de Rugosidad utilizados en el análisis de sensibilidad.

Iteración	n río	n planicie
0	0.035	0.05
1	0.03	0.05
2	0.025	0.05
3	0.03	0.055
4	0.035	0.06
5	0.04	0.065
6	0.02	0.045
7	0.015	0.04

3.3.3 Mallado

Para resolver de las ecuaciones de Saint Venant en forma numérica, es necesario primero definir y discretizar espacialmente el dominio de cálculo, lo que se hace a través de un proceso donde se subdivide el área en múltiples volúmenes finitos.

El mallado puede ser estructurado, donde normalmente las mallas son compuestas por elementos rectangulares o polígonos regulares siguiendo patrones simétricos, que permiten cálculos rápidos y precisos, con poca carga computacional, pero limitados a geometrías simples, como también puede ser no estructurado, donde las mallas son una red irregular de distintas figuras (normalmente triángulos, cuadriláteros, etc.), de tamaño variable, que permite que las celdas se adapten de mejor manera en geometrías complejas, lo que permite una mayor flexibilidad al modelar casos reales, pero con un mayor costo computacional, y la incorporación de inestabilidades si es que esta no se refina bien.

Para el caso de este estudio, dada la complejidad que involucra la forma de los cauces y otros elementos presentes dentro del dominio computacional se decidió el utilizar una malla no estructurada.

Para optimizar los tiempos de cálculo, sin perder de vista la información detallada en puntos de interés, se escogieron distintos tamaños de malla en función del objetivo del modelo hidráulico para el estudio, generando elementos más pequeños en los cauces, zonas pobladas, y obras como puentes y/o defensas fluviales, y elementos más gruesos en zonas donde se prevé un flujo a menor velocidad o donde no se espera que exista escurrimiento, como las planicies de inundación, y los sectores de bosque, y los sectores de cotas más elevadas.

3.3.4 Análisis de convergencia

Para poder seleccionar un mallado de cálculo óptimo, que permita realizar los cálculos de forma rápida y sin que el modelo pierda precisión, es necesario hacer un análisis de la convergencia para distintos tamaños de elementos.

Para este estudio, se hizo variar el número de elementos de malla de aproximadamente 120000 a 2000000 elementos (2,023,759, 1,054,556, 568,765, 264,248, 172,052, 140,084 y 123,962 elementos), donde las distintas mallas se analizaron comparando los distintos mallados en pares consecutivos, desde la con menor cantidad de elementos hasta la con mayor cantidad.

El escenario para el análisis es el de una crecida con periodo de retorno 2 años con una precipitación de 24 horas de duración, representada en un hidrograma como se muestra en Figura 3-11.

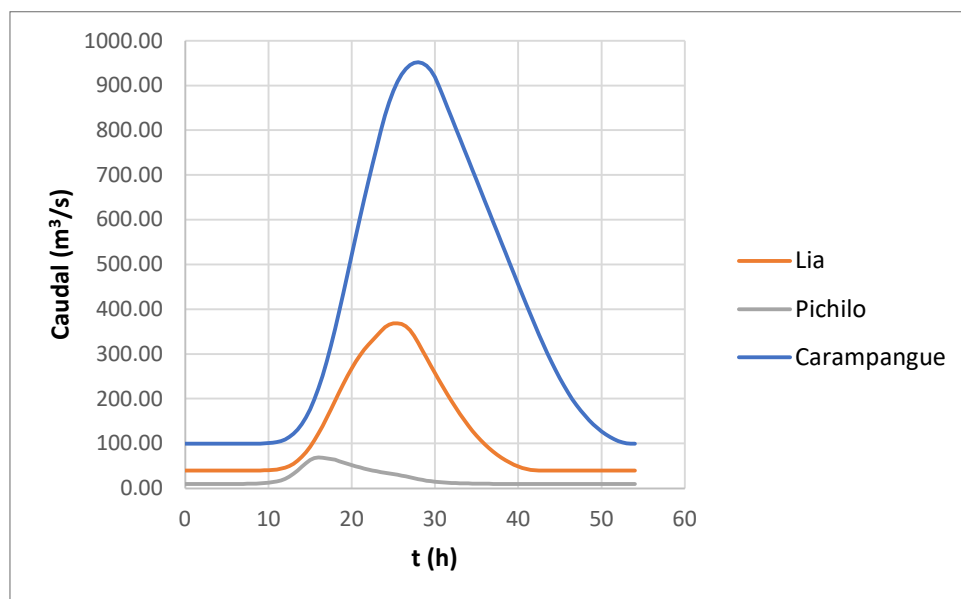


Figura 3-11: Hidrograma tormenta 24h T2

La convergencia se analizó utilizando como indicadores la raíz del error cuadrático medio (RMSE), la raíz del error cuadrático medio normalizada (NRMSE), siendo en este caso normalizada en función

del rango y el error absoluto medio (MAE), presentados en la Ecuación 3-5, la Ecuación 3-6 y la Ecuación 3-7 respectivamente.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2} \quad RMSE \in [0, \infty[\quad (3-5)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{O_{\max} - O_{\min}} * 100 \quad (3-6)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |M_i - O_i| \quad MAE \in [0, \infty[\quad (3-7)$$

Un valor 0, en los tres casos indicaría que hay una convergencia absoluta (que no hay cambios en los resultados utilizando mallas distintas), o que el modelo representa a la perfección las alturas de agua respecto a lo observado, y donde la gran diferencia entre el MAE y el RMSE, es que este último penaliza fuertemente las diferencias grandes entre valores, por lo que siempre MAE será menor o igual RMSE.

3.3.5 Escenario de Calibración

Como escenario de calibración, se eligió una ventana de tiempo de 48 horas de la crecida de junio de 2024, desde las 00:00 del día 12, siendo los hidrogramas simulados los presentes en la Figura 3-12, también se tomaron mediciones puntuales, donde vecinos atestiguan que el agua llegó hasta determinado nivel, cuyas cotas están presentes en la Tabla 3-9, y además existe una mancha de inundación proporcionada por la DOH, basada en fotos aéreas tomadas 2 días después de terminado el evento, la cual se muestra en la Figura 3-14.

Las estaciones empleadas en el estudio se muestran en la Tabla 3-8, señalando su código del Banco Nacional de Aguas (BNA), periodo de medición y ubicación.

Tabla 3-8: Estaciones Fluviométricas utilizadas en el estudio (Datum: WGS84 H18S)

Estacion	Código BNA	Periodo de medición		Coordenadas UTM	
				Este (m)	Norte (m)
Rio Pichilo en Pichilo	08,520,003-8	20/04/2024	15/10/2025	660,136	5,873,584
Rio Lia en las Corrientes	08,520,004-6	20/04/2024	15/10/2025	663,451	5,872,965
Rio Carampangue en Ramadilla	08,510,001-7	01/04/2024	15/10/2025	654,107	5,869,262

Como punto de control se utilizaron los datos de altura de la estación “rio Pichilo en Pichilo”, ya que es la única estación con datos, lo suficientemente alejada de las condiciones de borde.

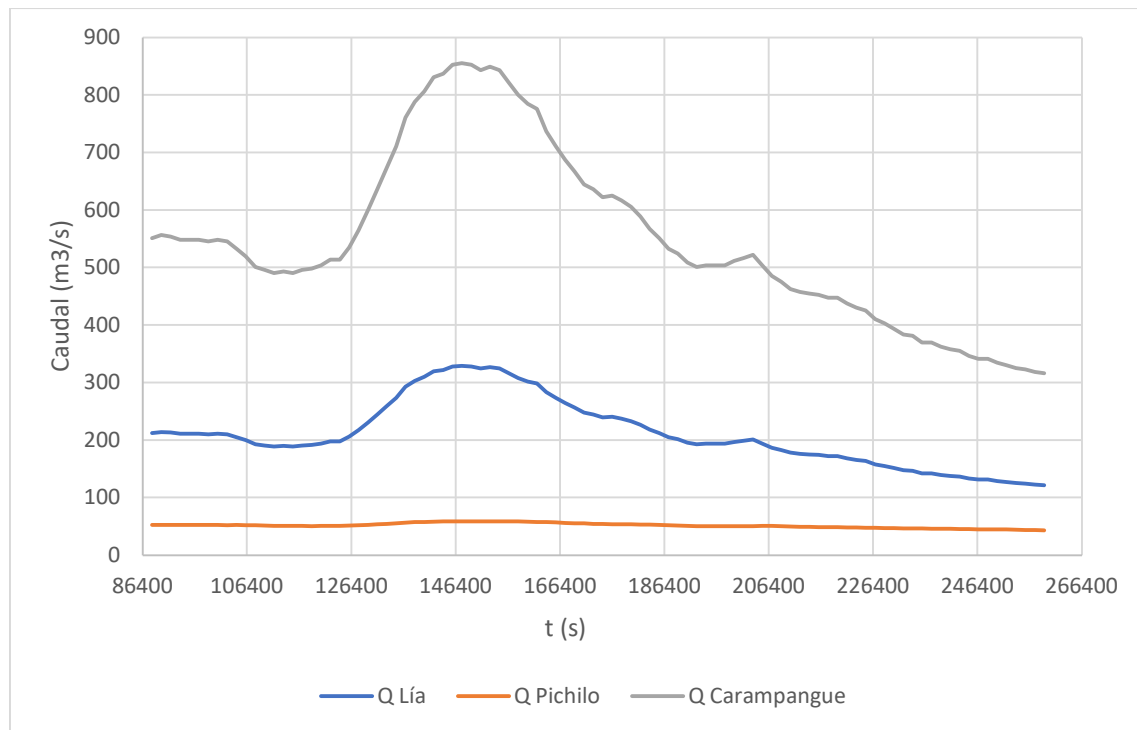


Figura 3-12: Hidrograma escenario de Validación

Como datos adicionales para la calibración, se tomaron mediciones puntuales, en base a testimonios de hasta donde llegó el nivel de agua según vecinos de las zonas afectadas. Se tomaron un total de 3 mediciones puntuales en los siguientes puntos mencionados en la Tabla 3-9.

Además se entregó, por parte del mandante, en base a fotos tomadas con dron el día 16 de junio de 2024 (Figura 3-13), un polígono con el área total afectada en el momento del vuelo, presente en la Figura 3-14.

Tabla 3-9: Mediciones Puntuales para validación

Referencia	Coordenadas UTM		Cota marca de agua (m.s.n.m.)
	Este (m)	Norte (m)	
Camping Las Corrientes	663,410.770	5,872,936.410	16.450
Casa Pichilo	660,100.610	5,873,582.570	11.350
AC-03	655,454.280	5,873,712.320	5.410



Figura 3-13: Foto tomada por dron de la inundación, 16/06/2024 (DOH, 2024)

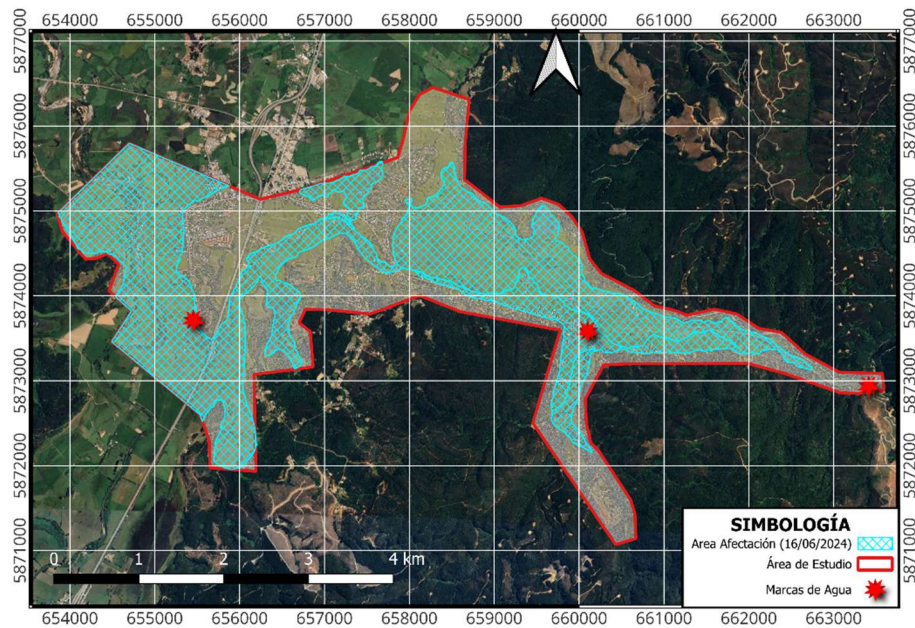


Figura 3-14: Área inundada y Marcas de agua

Se consideraron como métricas del error para la calibración el RMSE y el MAE para el punto de control y las mediciones puntuales.

Una métrica adicional para considerar en la validación del modelo, en función del área inundada previamente presentada, es el *Critical Success Index* (CSI), que mide la razón entre los aciertos, las falsas alarmas y las omisiones del modelo respecto a lo observado, presente en la Ecuación 3-8.

$$CSI = \frac{M_1 O_1}{M_1 O_1 + M_1 O_0 + M_0 O_1} \quad (3-8)$$

Esta métrica puede tomar valores de entre 0 a 1, siendo 1 el valor ideal, indicando que el modelo predijo perfectamente las áreas inundadas, sin falsas alarmas ni omisiones.

3.3.6 Escenario de Validación

El escenario de validación elegido corresponde a la crecida ocurrida entre el 14 y 16 de junio del año 2025, ya que corresponde a una crecida con un caudal lo suficientemente grande para provocar un desborde y forzar la evacuación preventiva de los sectores La Faja y Pichilo durante esta (Silva, 2025), y existe una suficiente cantidad de datos medidos en las estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA).

Se emplearon como datos de entrada los hidrogramas de los ríos Lia, Pichilo y Carampangue, que se muestran en la Figura 3-15

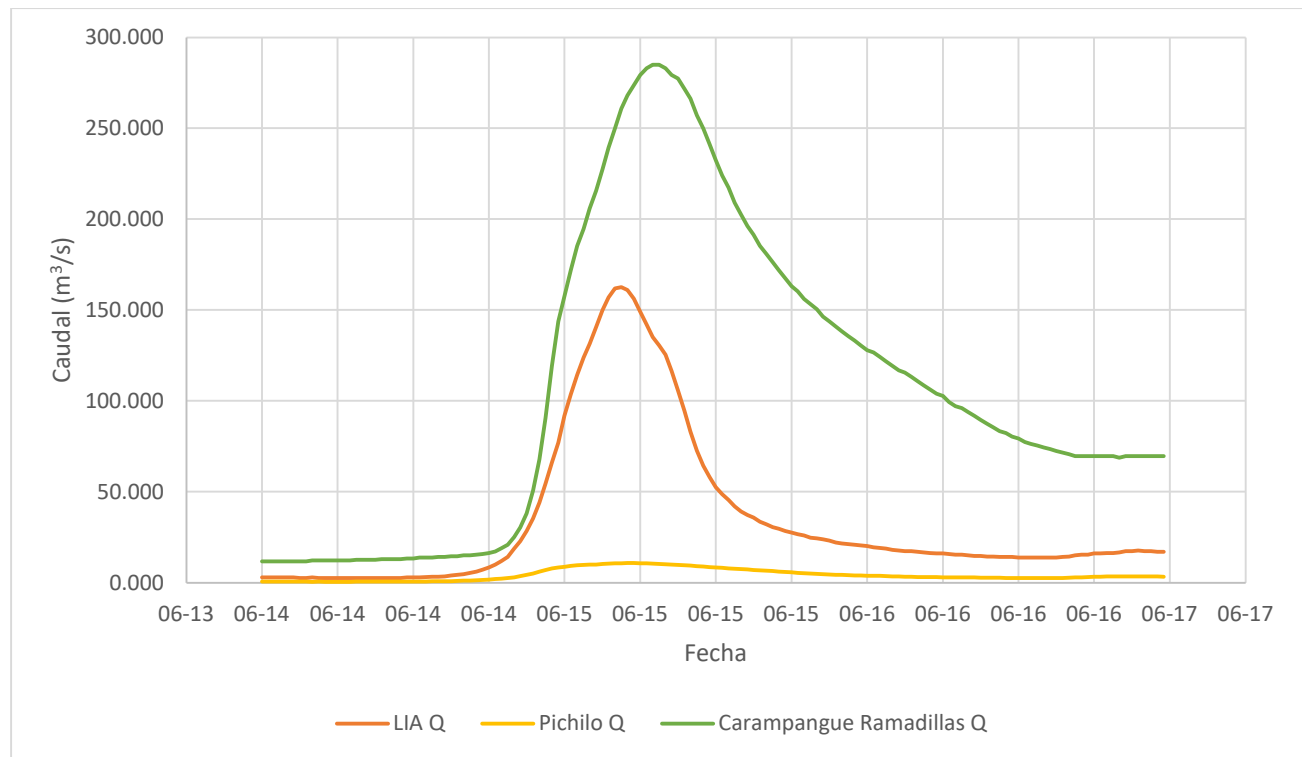


Figura 3-15: Hidrograma Escenario de Calibración (junio-2025)

3.4. Peligrosidad

Ollero (1997), Kazmierczak y Cavan (2011) y Tsakiris (2014), citados por Faúndez (2017), definen peligro como una fuente de daño o un evento potenciales que suponen una amenaza para el hombre o su actividad y tienen asociada una cierta magnitud, intensidad, frecuencia y duración. En el caso de las inundaciones, algunos de los factores que intervienen en la peligrosidad son, el volumen de la crecida, la altura máxima que alcanza el agua, la velocidad de propagación, la duración de la inundación, la probabilidad de ocurrencia y el área inundada (Dunne y Leopold, 1978, citado por Noguera, 2017). Existen múltiples metodologías para determinar la peligrosidad, donde la mayoría está basada en entornos SIG para poder mapear los resultados (Faúndez, 2017).

Algunas de estas metodologías o criterios para el cálculo de la peligrosidad, están basadas en métodos empíricos, como el criterio de Cox *et al.* (2010), que, mediante una recopilación análisis de múltiples estudios experimentales realizados por diversos investigadores, desarrolla una matriz de peligrosidad en función del producto de la profundidad del agua y la velocidad ($v \cdot h$), y el producto entre la masa y la altura de las personas ($A \cdot M$), como se presenta en la Tabla 3-10.

Tabla 3-10: Criterio de peligrosidad en función de $v \cdot h$ y $A \cdot M$ (Cox *et al.*, 2010)

v*h (m²/s)	Infantes, niños pequeños (A*M<25 (kgm)) y personas delicadas o mayores	Niños, A*M(kgm) entre 25 y 50	Adultos, A*M>50 (kgm)
0	Seguro	Seguro	Seguro
0-0.4	Peligrosidad Extrema	Peligrosidad Baja*	Peligrosidad Baja*
0.4-0.6		Peligrosidad Alta	
0.6-0.8		Peligrosidad Extrema	Peligrosidad Moderada**
0.8-1.2			Peligrosidad Alta***
>1.2			Peligrosidad Extrema
*estabilidad no reducida para las personas en las pruebas de laboratorio (para una altura máxima de 0.5 m en niños, y 1.2 m en adultos, con una velocidad máxima de 3.0 m/s en profundidades bajas)			
** límite de trabajo para personas entrenadas o con experiencia y equipamiento adecuado (v*h <0.8 m²/s)			
*** límite superior de estabilidad observado en la mayoría de las investigaciones (v*h>1.2 m²/s)			

Otro criterio, es el propuesto por Ferrari *et al.* (2019), que utiliza la fuerza total D , como se muestra en la Ecuación 3-8. Los umbrales se presentan en la Tabla 3-11.

$$D = h \sqrt{1 + 2Fr^2} \quad (3-8)$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (3-9)$$

Tabla 3-11: Umbrales de peligrosidad en función de D (Ferrari *et al.*, 2019)

D (m)	Peligrosidad
$0 \leq D < 0.5$	Baja
$0.5 \leq D < 1$	Media
$1 \leq D < 1.5$	Alta
$D \geq 1.5$	Muy Alta

Un tercer criterio para el cálculo de la peligrosidad es el que recomienda la DOH en las bases de licitación del proyecto en el cual está inmerso este estudio, el cual toma como base el criterio de Cox *et al.* (2010), donde de nuevamente se utiliza el producto de altura por velocidad, pero en un umbral junto con la altura, presentados en la Tabla 3-12

Tabla 3-12: Criterio de Peligrosidad en función de h y $v \cdot h$, basado en el criterio de Cox *et al.* (2010) (DOH, 2024)

h (m)	$v \cdot h$ (m ² /s)	Peligrosidad
$h > 1$	$h > 1.5$	Alta
$0.5 < h < 1$	$0.5 < v \cdot h < 1.5$	Media
$0.1 < h < 0.5$	$0.1 < v \cdot h < 0.5$	Baja

Recientemente, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) publicó un manual para el desarrollo de mapas de riesgos para planes reguladores comunales, en el cual presentan una variante del criterio definido por la DOH para el desarrollo de mapas de amenaza, agregando 2 umbrales por debajo del umbral de peligrosidad “Baja”, para alturas y el producto altura-velocidad inferiores a 0.1 m y 0.1 m²/s y mayores a cero, se define el rango “Muy Baja”, para valores iguales a cero, se define el rango “Despreciable”.

Para obtener los mapas de peligrosidad con cualquiera de estos tres criterios, es necesario hacer los cálculos para obtener los ráster de $v \cdot h$ o Fr y luego, a través de una operación condicional en QGIS, ArcGIS u otro *software* de procesamiento SIG, asignando valores numéricos a cada umbral, por ejemplo, peligrosidad baja es igual a 1, media a 2, etc. Los resultados que se esperan de esta operación son ráster con una distribución discreta de valores, entre 1 a 3 o 1 a 4 dependiendo del criterio utilizado.

Para efectos de este estudio, el criterio utilizado fue el recomendado por la DOH, en función de la profundidad del escurrimiento y el producto entre la profundidad y la velocidad. Se descartó el uso del criterio recomendado por el MINVU, ya que estos umbrales incorporados están por debajo del umbral seco-mojado de 15 cm en el modelo.

3.5. Conclusiones

En este capítulo se describieron las características del área de estudio a considerar en el modelo numérico, se explicaron los procedimientos para analizar la convergencia del modelo y la sensibilidad de este a variaciones en el coeficiente rugosidad de Manning, y se describieron los escenarios de calibración y validación del modelo

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1. Introducción

En la primera parte de este capítulo se presentarán los resultados obtenidos del análisis de convergencia del modelo y el tamaño de malla, de la calibración y análisis de sensibilidad del coeficiente de rugosidad de Manning, sobre el criterio utilizado para calibrar y validar del modelo.

En la segunda parte, se presentan y analizan los resultados de las simulaciones para diferentes periodos de retorno, siendo estos los mapas de inundación, de profundidad y velocidad, para finalmente presentar los mapas de peligrosidad; un análisis del porcentaje del área inundada correspondiente a cada umbral de peligrosidad, para cada periodo de retorno simulado, y un enfoque especial a la peligrosidad en los sectores habitados.

4.2. Análisis de Convergencia

En la Figura 4-1 se muestran los resultados del análisis de sensibilidad realizado para el tamaño de elementos que conforman la malla, notando que para las distintas mallas de cálculo propuestas, si bien los errores disminuyen a medida que aumenta la cantidad de elementos de malla, se aprecia en el análisis consecutivo que existe un leve aumento del error al pasar, tanto de 123,962 a 140,084 elementos, como de 264,248 a 568,765, lo que puede deberse a como los distintos mallados representan la geometría del área de estudio, pero que a partir de esta última, los errores tienen una tendencia a la baja, con errores con un RMSE, MAE y NRMSE de 0.068 m, 0.048 m y 1.270% al comparar la malla de 568,765 contra la de 1,064,556 elementos, mientras que al comparar el par con mayor cantidad, se tienen errores de 0.05 m, 0.035 m y un error porcentual inferior al 1%

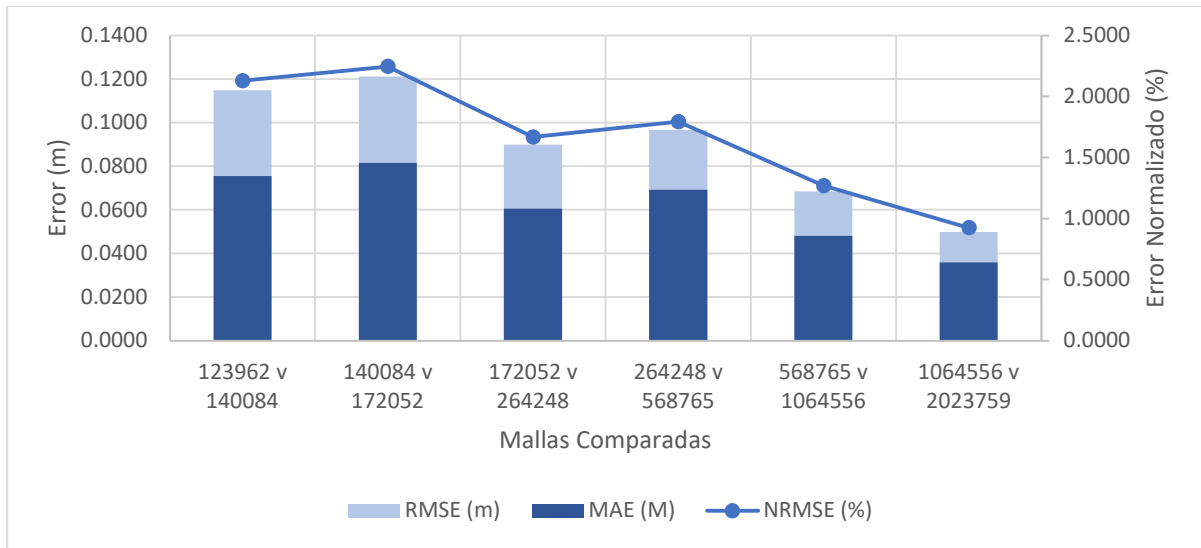


Figura 4-1: Análisis Consecutivo

4.3. Calibración del Modelo

Analizando la información de las curvas de aforo proporcionadas como antecedentes para el estudio, se tiene que el rango en que se han realizado aforos para la estación “río Lía en las Corrientes” considera alturas entre 1.37 m a 2.42 m, con caudales equivalentes medidos entre 3.45 m³/s y 39.58 m³/s, sin embargo la altura máxima medida para el evento de calibración es de 5.35 m, encontrándose está muy por sobre la curva de descarga calibrada para la estación. Lo anterior se traduce en una gran incertidumbre en el caudal de 261.36 m³/s obtenido de la curva de descarga al extrapolar por sobre el rango de medición, por lo que se presume que el caudal real es mayor a lo reportado.

Dado a que los caudales no son confiables para la calibración del modelo, se partió de la hipótesis de que la crecida de junio de 2024 corresponde a una crecida con periodo de retorno de al menos 2 años, de este supuesto, se escaló el hidrograma de la Figura 3-12 utilizando los caudales presentados en la Tabla 3-2, utilizando los coeficientes de rugosidad previamente mencionados en el

Los resultados obtenidos para el punto de control se presentan en Figura 4-2, la Tabla 4-1 para las mediciones puntuales realizadas en los puntos atestiguados por los vecinos, y la Figura 4-3 las manchas de inundación superpuestas. Finalmente las métricas de ajuste para el escenario de validación se presentan en la Tabla 4-2.

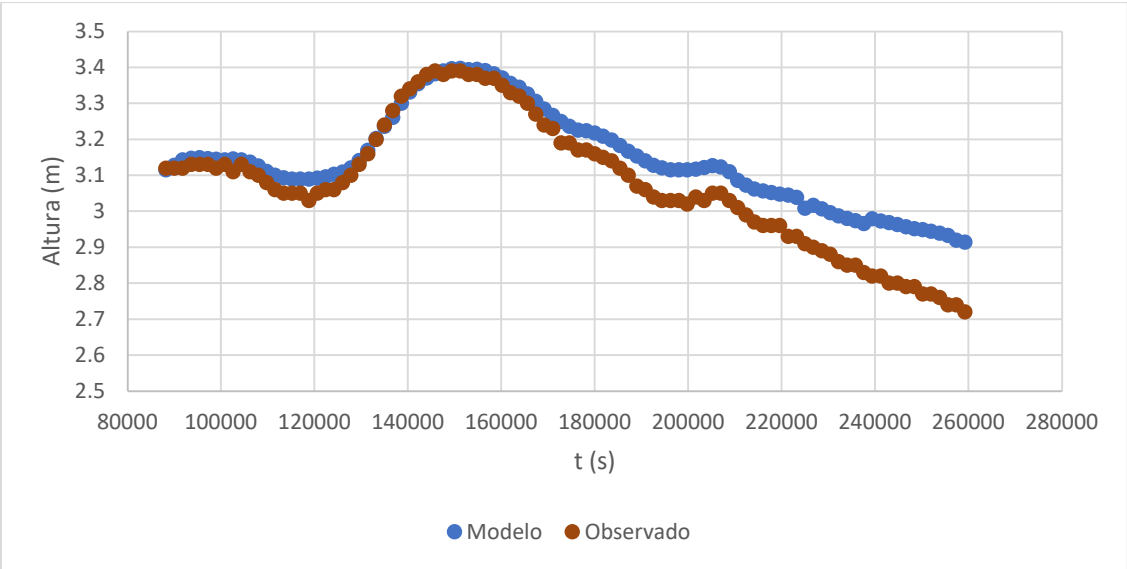


Figura 4-2: Altura de agua en el punto de control

Tabla 4-1: Cotas de marcas de agua para la crecida de 2024 reportadas por vecinos

Referencia	Coordenadas UTM		Cota marca de agua (m.s.n.m.)	Cota Modelo (m.s.n.m)
	Este (m)	Norte (m)		
Camping Las Corrientes	663,410.77	5,872,936.41	16.450	16.255
Casa Pichilo	660,100.61	5,873,582.57	11.350	11.431
AC-03	655,454.28	5,873,712.32	5.410	5.611

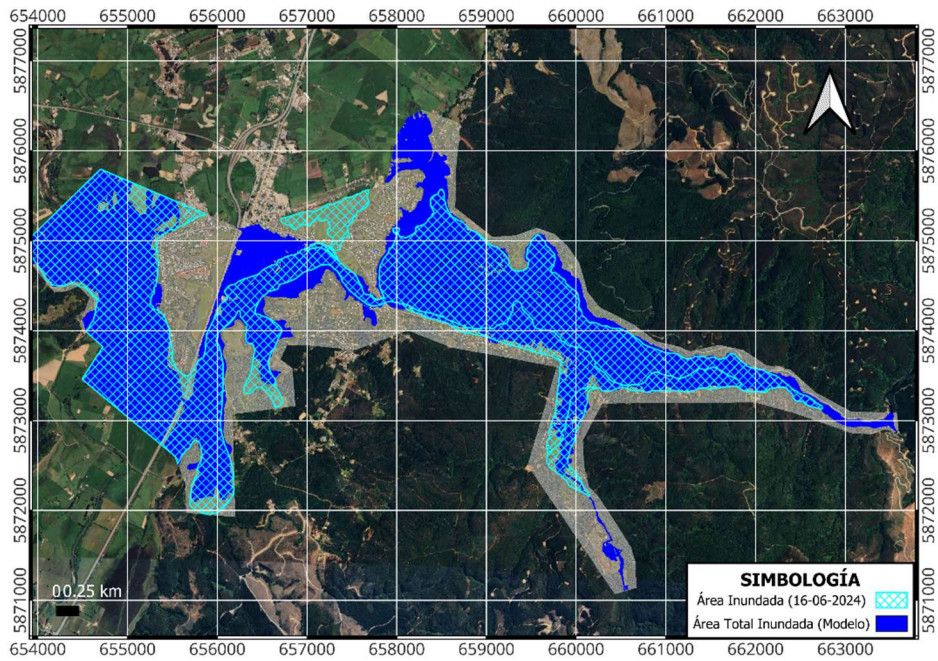


Figura 4-3: Área Inundada Registrada vs Área Inundada Modelada

Tabla 4-2: Métricas de Ajuste para el escenario de calibración

Análisis	RMSE(m)	MAE (m)	CSI
Punto de Control	0.085	0.066	-
Mediciones Puntuales	0.168	0.159	-
Area Inundada	-	-	0.744

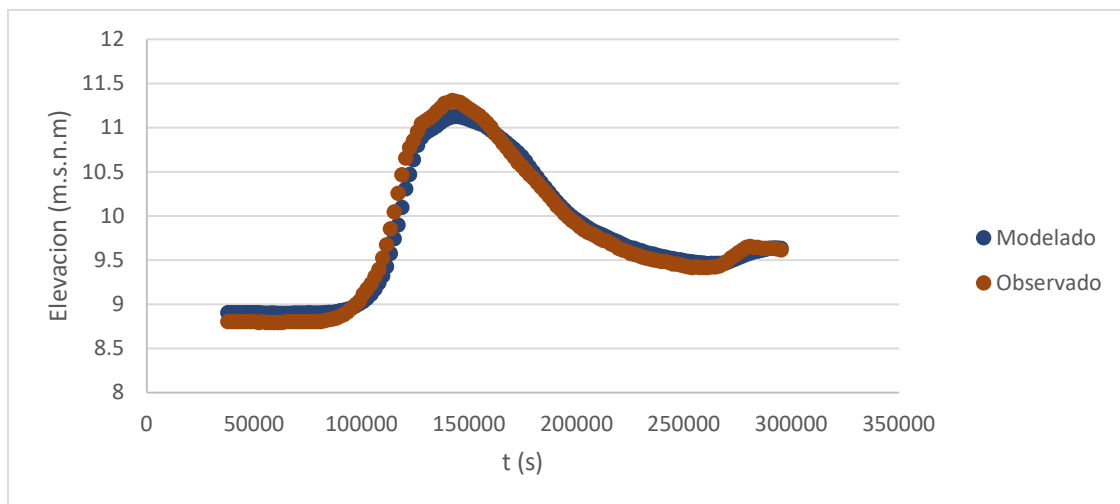
Se observa que para el punto de control el modelo es capaz de predecir de buena manera en forma y magnitud los valores de altura medidos por el sensor. Lo anterior se respalda con las métricas de RMSE y MAE obtenidas para el punto mencionado.

Para las mediciones puntuales reportadas por los vecinos en el área de estudio, se observan errores un poco mayores, pero se mantienen dentro de un rango aceptable.

En cuanto a la extensión de la inundación obtenida por el modelo, se tiene que sobreestima la superficie alcanzada por el agua respecto al área reportada por la DOH. Sin embargo, esta área fue medida después de la ocurrencia del *peak* de la crecida, por lo que se espera que el área inundada durante el evento fuese mayor a la reportada, por ende el CSI estaría siendo subestimado.

4.4. Validación del Modelo

De igual forma que en la calibración, en la validación también se escaló el caudal entrante, pero de forma proporcional al caudal máximo del 2024, obteniéndose un limnigrama como se aprecia en la Figura 4-4 .

**Figura 4-4: Elevación de la superficie de agua en el punto de control**

Para este caso, se obtuvo un RMSE de 0.111 m y un MAE de 0.089 m, lo cual es un es un error aceptable para un modelo.

4.5. Análisis de Sensibilidad del coeficiente de rugosidad de Manning

Se realizaron simulaciones utilizando las combinaciones presentadas en la Tabla 3-7, obteniéndose el siguiente gráfico, normalizado por el RMSE de los parámetros de calibración, presentados en Tabla 4-3 y la Figura 4-5:

Tabla 4-3: Error para distintos valores de rugosidad

Iteración	Error Normalizado
iteración 0	0%
iteración 1	14%
iteración 2	57%
iteración 3	7%
iteración 4	6%
iteración 5	25%
iteración 6	118%
iteración 7	182%



Figura 4-5:Error para distintos valores de rugosidad

4.6. Mapas de inundación

Una vez validado el modelo, se realizaron nueve simulaciones, para periodos de retornos de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años.

Los mapas de inundación se muestran en la Figura 4-6, los mapas de alturas en la Figura 4-7, y los mapas de velocidades Figura 4-8. Los mapas faltantes se encuentran en el Anexo 1.4.

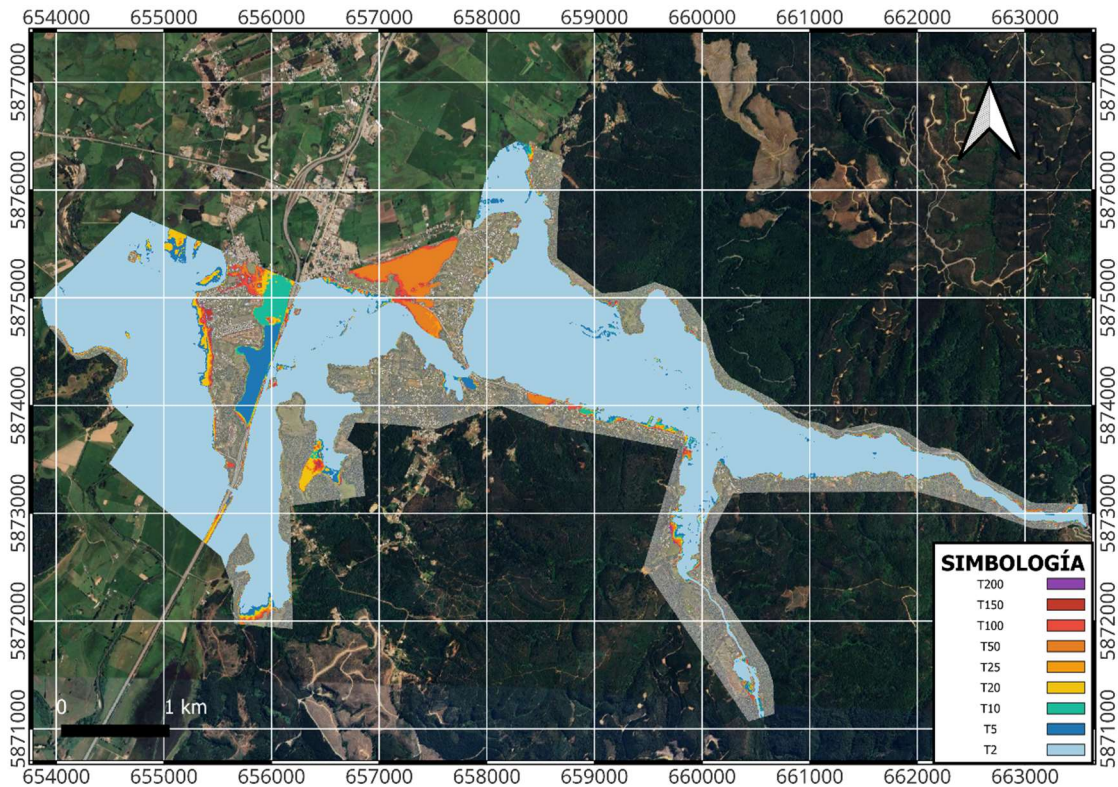


Figura 4-6 Mapa de inundación para los distintos periodos de retorno

Se observa que incluso para crecidas asociadas a bajos periodos de retorno las superficies inundadas son considerables, con extensiones que van de 890 ha para T=2 años a 1,030 ha para T=100 años, como se presenta en la Tabla 4-4. También se puede apreciar que el incremento del área afectada no es tanto entre periodos de retorno, siendo la mayor diferencia un aumento de 4.74%

Tabla 4-4: Área total inundada (ha) para cada periodo de retorno

Periodo de Retorno	Area Inundada (ha)	Incremento de la superficie inundada (%)
T2	891.300	-
T5	933.530	4.74%
T10	948.120	1.56%
T20	974.990	2.83%
T25	977.980	0.31%

Periodo de Retorno	Area Inundada (ha)	Incremento de la superficie inundada (%)
T50	1,015.510	3.84%
T100	1,029.950	1.42%
T150	1,036.640	0.65%
T200	1,040.130	0.34%

También se observa en la Figura 4-6, que existe un trasvasije de caudales en la parte norte del área de estudio, hacia la cuenca del estero el Molino, para todos los periodos de retorno analizados.

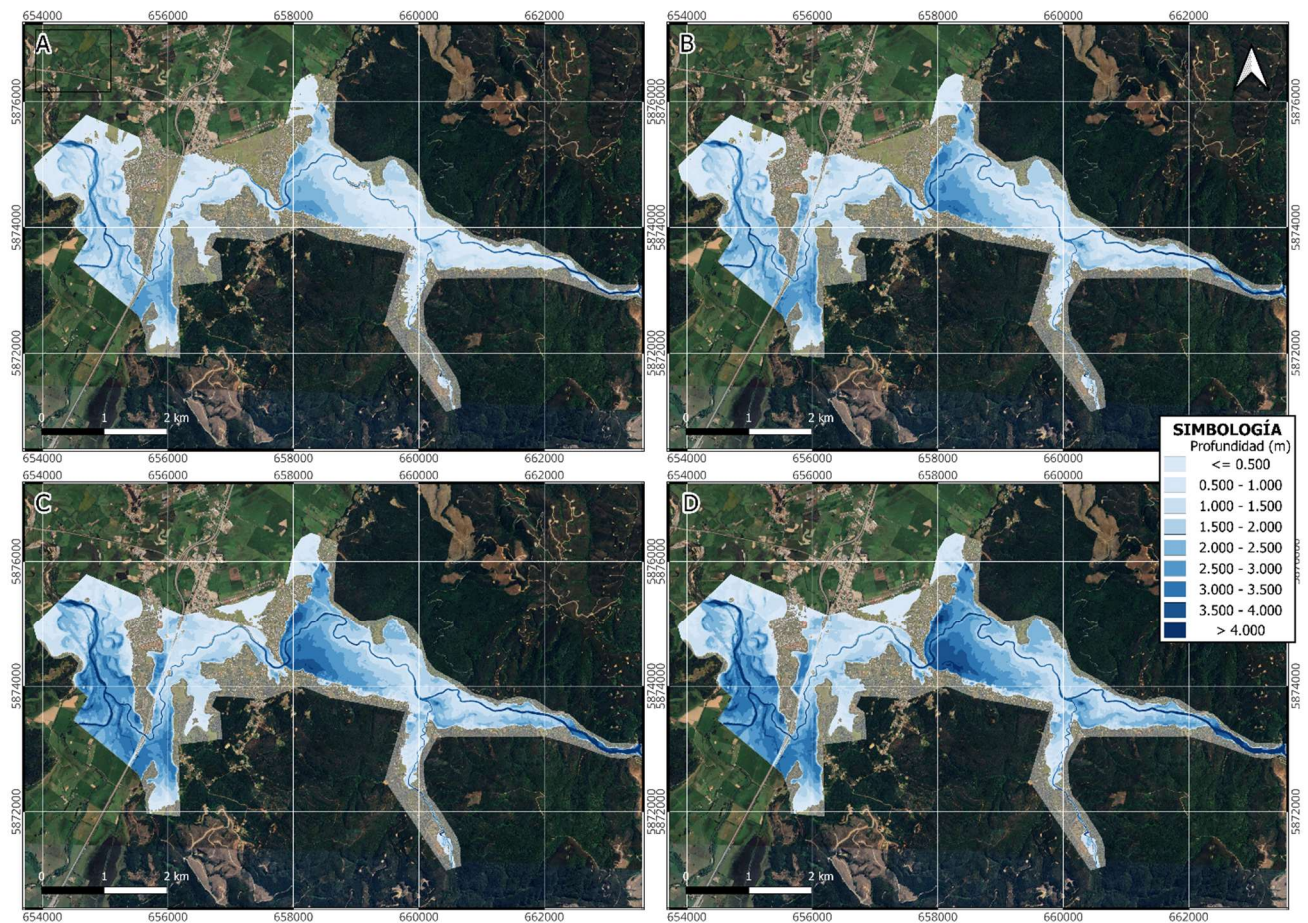


Figura 4-7: Mapas de Profundidades: a) T=2, b) T=10, c) T=50, d) T=100

Se observa que las defensas fluviales presentes en el área de estudio no son eficaces, puesto a que si bien, para crecidas de periodo de retorno de hasta 25 años el escurrimiento se mantiene por debajo del coronamiento de estas, las zonas que estas debiesen proteger de igual manera se inundan, ya que el agua rodea las defensas en sus extremos, dejando las protecciones sin efecto.

Existen dos estrechamientos del cauce considerables en el área, provocados por los puentes “Conumo Chico”, que conecta Conumo Alto con Conumo Bajo, y el puente viejo de la ruta 160. El efecto más severo lo provoca el puente Conumo Chico, ya que causa un gran peralte del eje hidráulico aguas

arriba de este, siendo este control hidráulico, el principal causante del trasvasije previamente mencionado.

Las profundidades máximas para cada periodo de retorno se encuentran presentes en la Tabla 4-5

Tabla 4-5: Profundidades Máximas en el Cauce para los periodos de retorno simulados

Periodo de Retorno	Profundidad máxima (m)
T2	3.778
T5	4.076
T10	4.165
T20	4.490
T25	4.537
T50	4.720
T100	4.912
T150	5.042
T200	5.130

Para el caso de los periodos de retorno inferiores $T=10$, la profundidad máxima se produce en el río Carampangue, aguas arriba de la bocatoma de la planta Arauco, mientras que para periodos de retorno mayores, la profundidad máxima se produce en el río Conumo, en la zona influenciada por el angostamiento en el puente Conumo Chico, aguas arriba de este mismo.

No se observan mayores variaciones de velocidad para los distintos periodos de retorno, exceptuando el camino entre la Meseta y Chillancito, ubicado al norte del área de estudio, donde sí se aprecia el aumento de velocidad que característico de un vertedero.

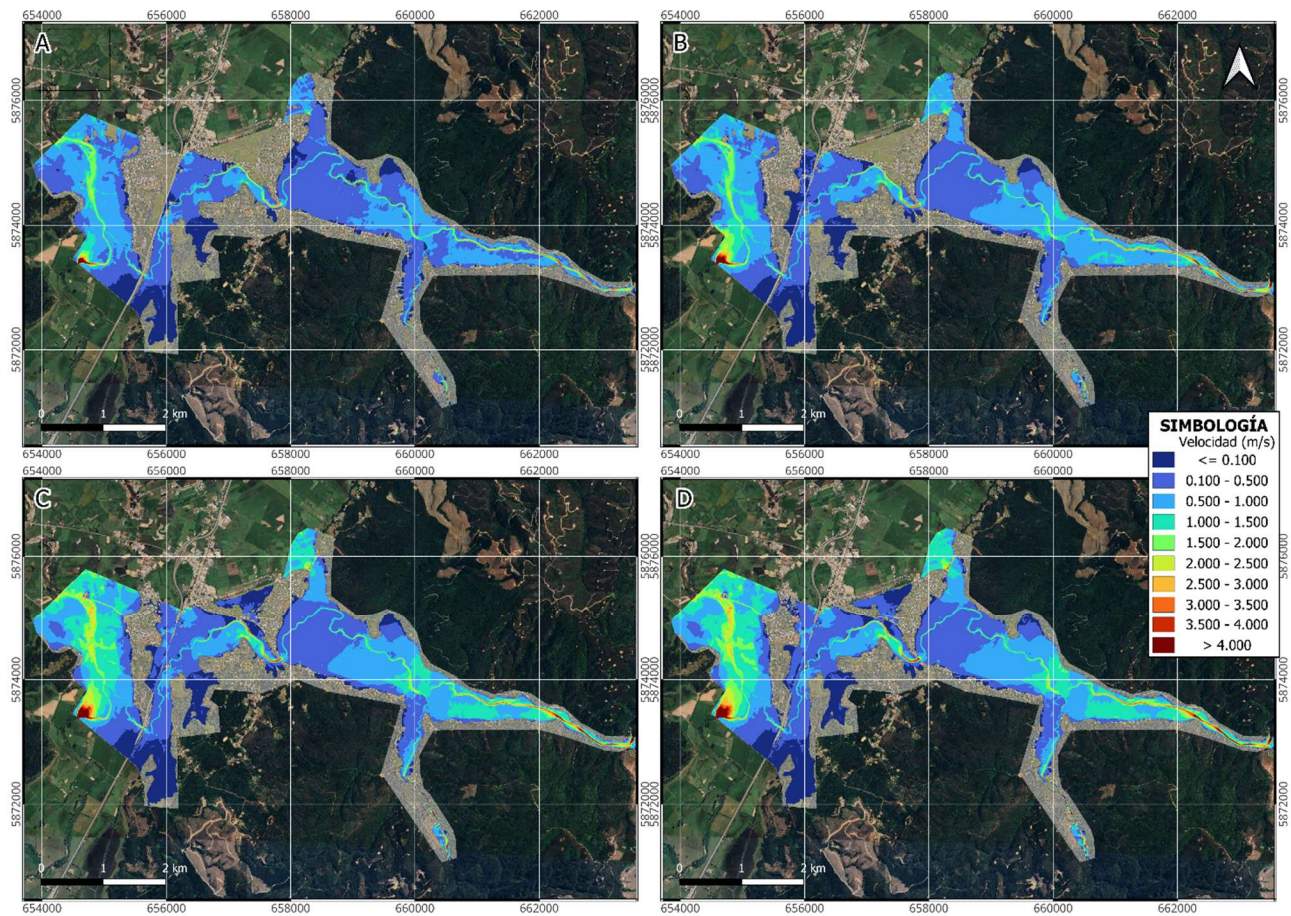


Figura 4-8: Mapas de Velocidades: a) T=2, b) T=10, c) T=50, d) T=100

Tabla 4-6: Velocidades máximas para caudales con T=2 y T=100, aguas arriba de las confluencias de los cauces principales

Río	T2	T100
Lia	2.575	2.754
Pichilo	2.216	2.717
Conumo	1.278	1.286
Carampangue	1.617	1.619

En la condición de borde de entrada del río Carampangue, se debe mencionar que existe un error localizado con velocidades elevadas. Esto se debe a que, como se mencionó previamente, deficiencias en la topobatimetría podría generar errores localizados, sin embargo, estos, al estar lejos de la zona de interés, no deberían afectar las capacidades del modelo.

Para las zonas peraltadas hidráulicamente por la presencia de los puentes previamente mencionados, se observan que las velocidades disminuyen a valores inferiores a 0.5 m/s

El efecto sobre el escurrimiento provocado por la confluencia de los ríos Conumo y Carampangue así como la confluencia de los ríos Pichilo Lía, se observa principalmente en mayor medida en las velocidades, aunque el efecto de la confluencia Conumo-Carampangue provoca un considerable peraltamiento del escurrimiento aguas arriba de este punto.

Otro punto interesante por analizar es que para periodos de retorno elevados, un alto porcentaje del caudal del río Conumo es trasvasiado a la cuenca del estero el Molino, como se presenta en la Tabla 4-7. Estos caudales se determinaron a través de la herramienta “Hidrograma” de Iber, que permite determinar el hidrograma de una sección transversal, calculado a través del producto punto.

Tabla 4-7: Caudal Trasvasiado a la cuenca del estero El Molino

Periodo de Retorno	Caudal <i>peak</i> trasvasije (m ³ /s)	Caudal Río Conumo antes del puente Conumo Chico (m ³ /s)	% Trasvasiado
2	139	388	36%
5	246	563	44%
10	338	697	48%
20	441	853	52%
25	461	885	52%
50	558	1034	54%
100	666	1190	56%
150	729	1283	57%
200	777	1350	58%

4.7. Peligrosidad

Los mapas de peligrosidad asociados a periodos de retorno $T=2$, $T=10$, $T=50$ y $T=100$ se presentan en la figura. Los mapas de Peligrosidad para los demás periodos de retorno se encuentran en el Anexo 1.5.

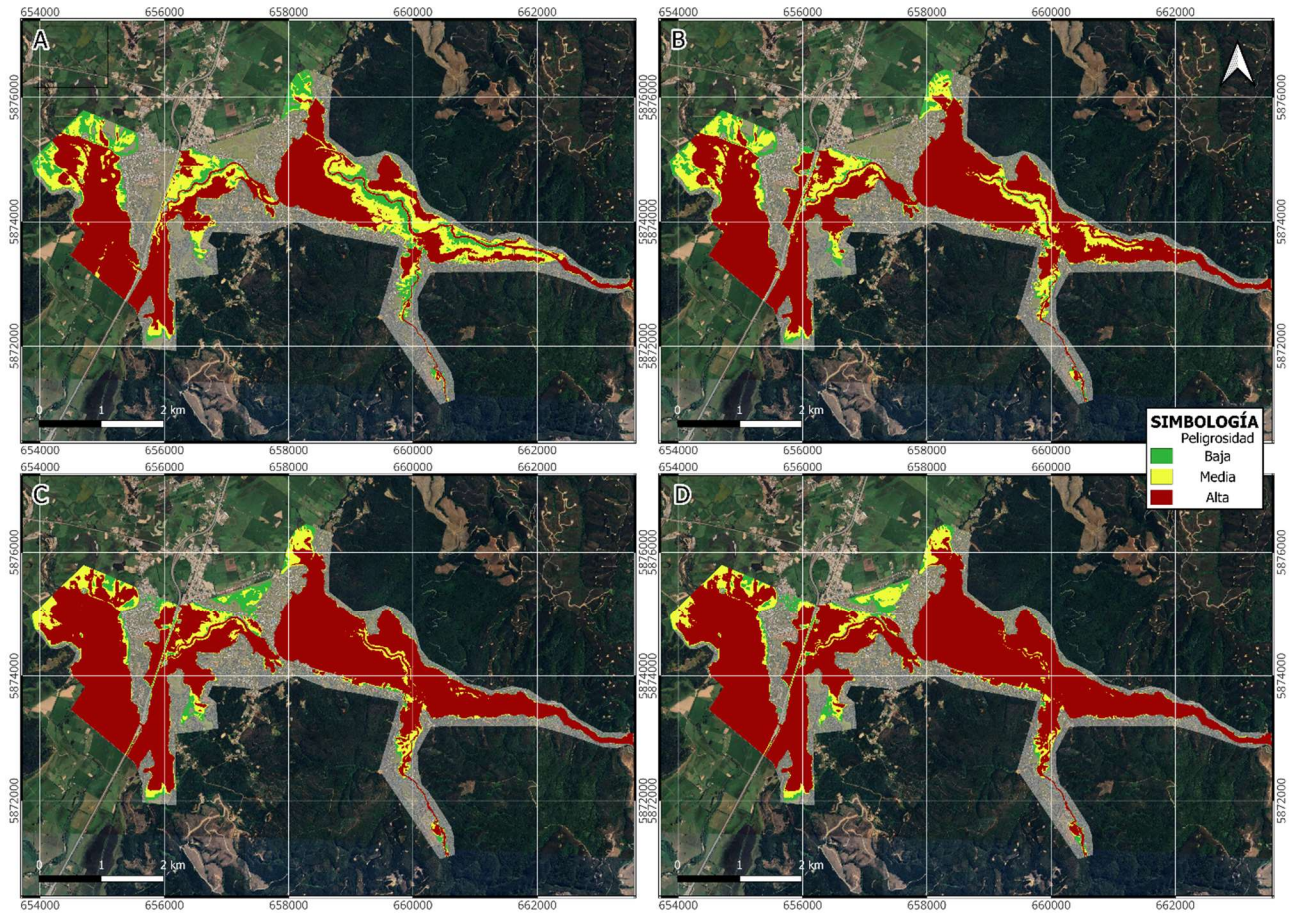


Figura 4-9: Mapas de Peligrosidad: a) $T=2$, b) $T=10$, c) $T=50$, d) $T=100$

En la Tabla 4-8 se aprecia que incluso para periodos de retorno bajos la mayor parte del área total inundada corresponde a una peligrosidad alta, la cual si bien varía entre $T=2$ a $T=20$ habiendo un aumento de un 20% de la superficie total inundada, ya desde $T=20$, el porcentaje del área total con una peligrosidad alta tiende a converger al orden del 80-85%.

Tabla 4-8: Porcentajes del Área Inundada correspondientes a cada umbral de Peligrosidad

Periodo de Retorno	% Peligrosidad Baja	% Peligrosidad Media	% Inundada Peligrosidad Alta
T2	12.610	25.430	61.960
T5	7.090	21.950	70.960
T10	6.540	19.100	74.360
T20	4.410	15.460	80.130
T25	4.330	14.810	80.860

Periodo de Retorno	% Peligrosidad Baja	% Peligrosidad Media	% Inundada Peligrosidad Alta
T50	5.380	12.600	82.020
T100	4.410	11.470	84.120
T150	3.990	10.500	85.510
T200	3.790	10.020	86.190

En la Figura 4-10, Figura 4-11 y Figura 4-12 se muestra la peligrosidad para los periodos de retorno previamente descritos, haciendo un enfoque en las zonas habitadas.

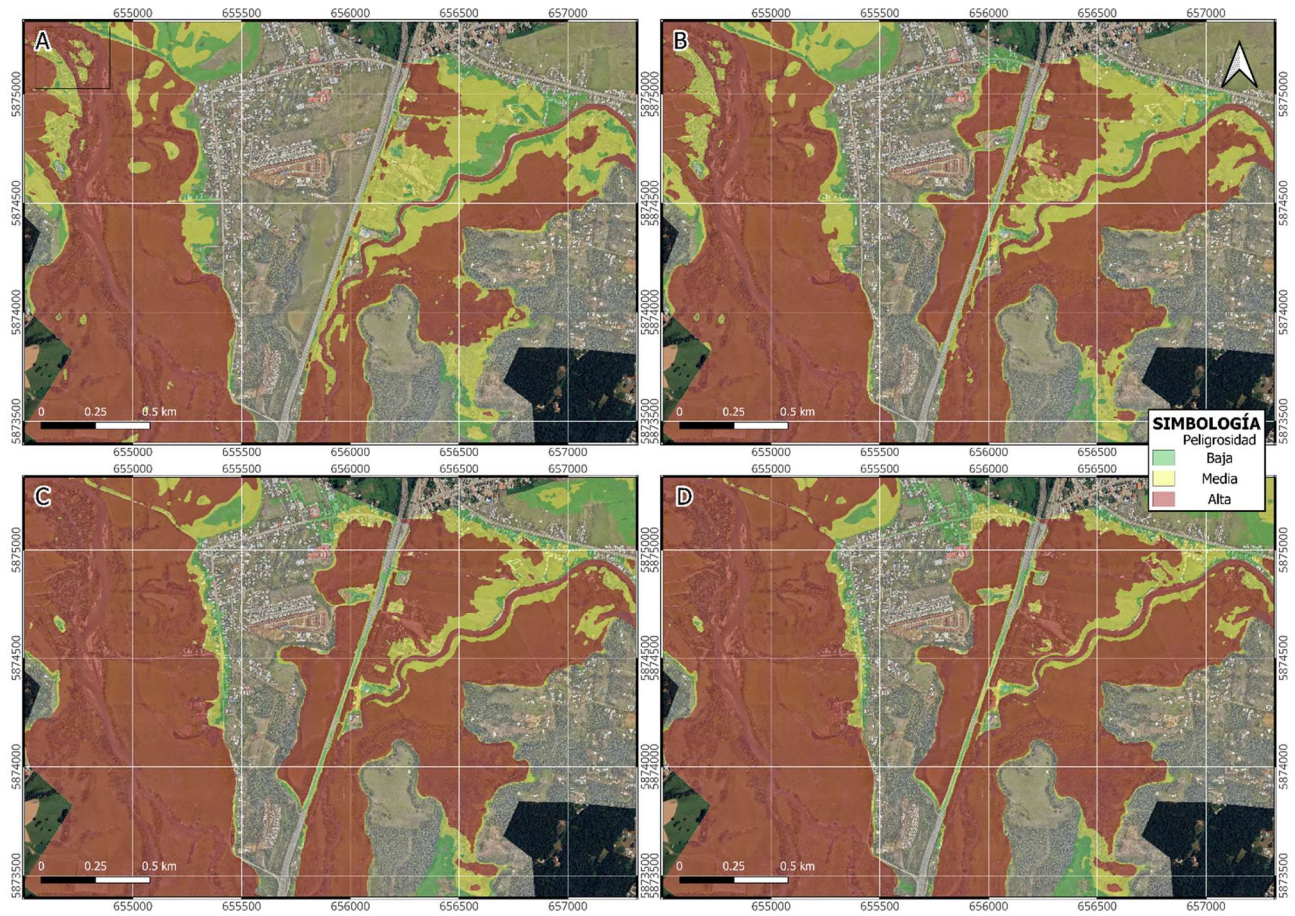


Figura 4-10: Mapas de Peligrosidad, Sector Carampangue: a) T=2, b) T=10, c) T=50, d) T=100

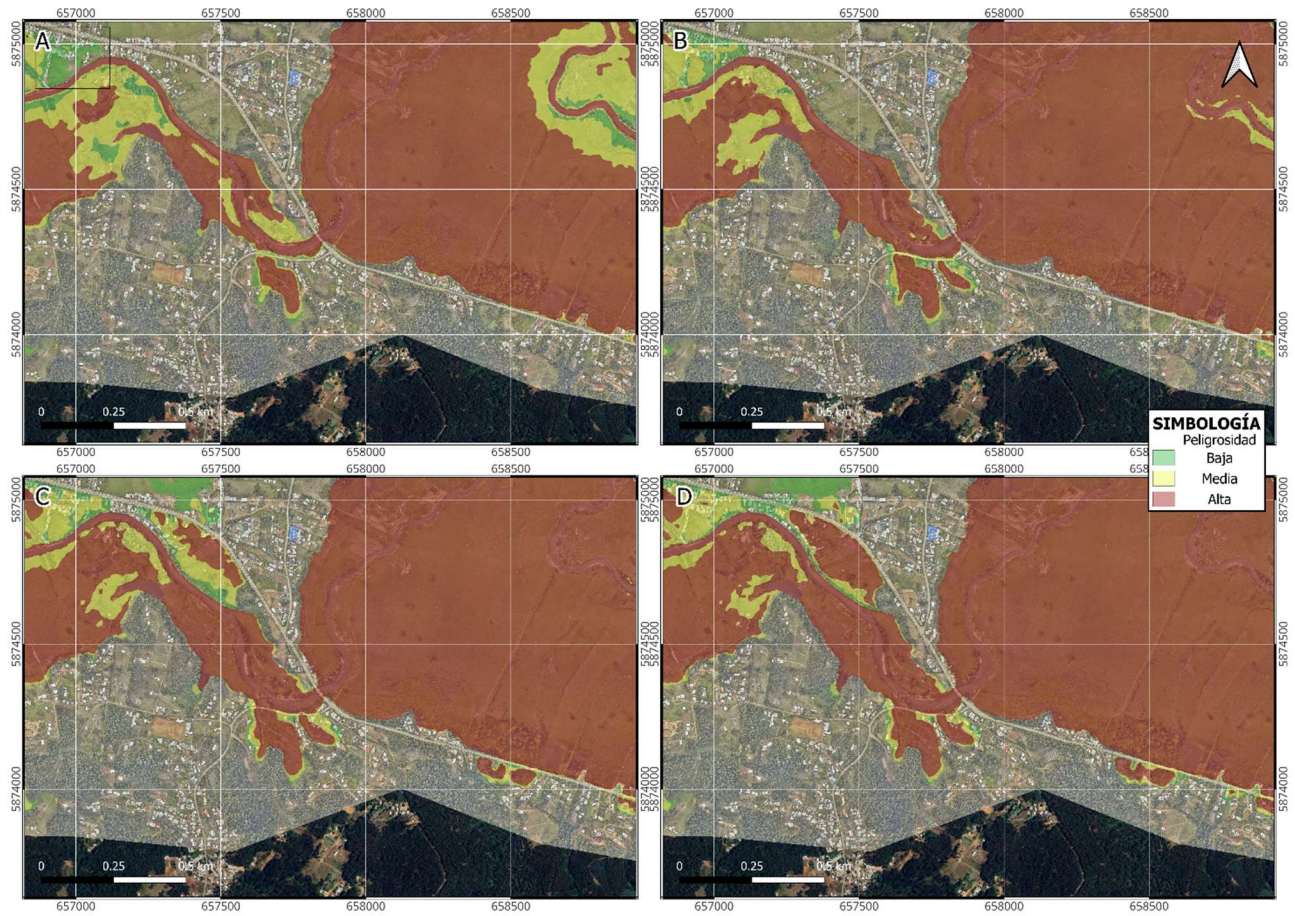


Figura 4-11: Mapas de Peligrosidad, Sector Conumo: a) T=2, b) T=10, c) T=50, d) T=100

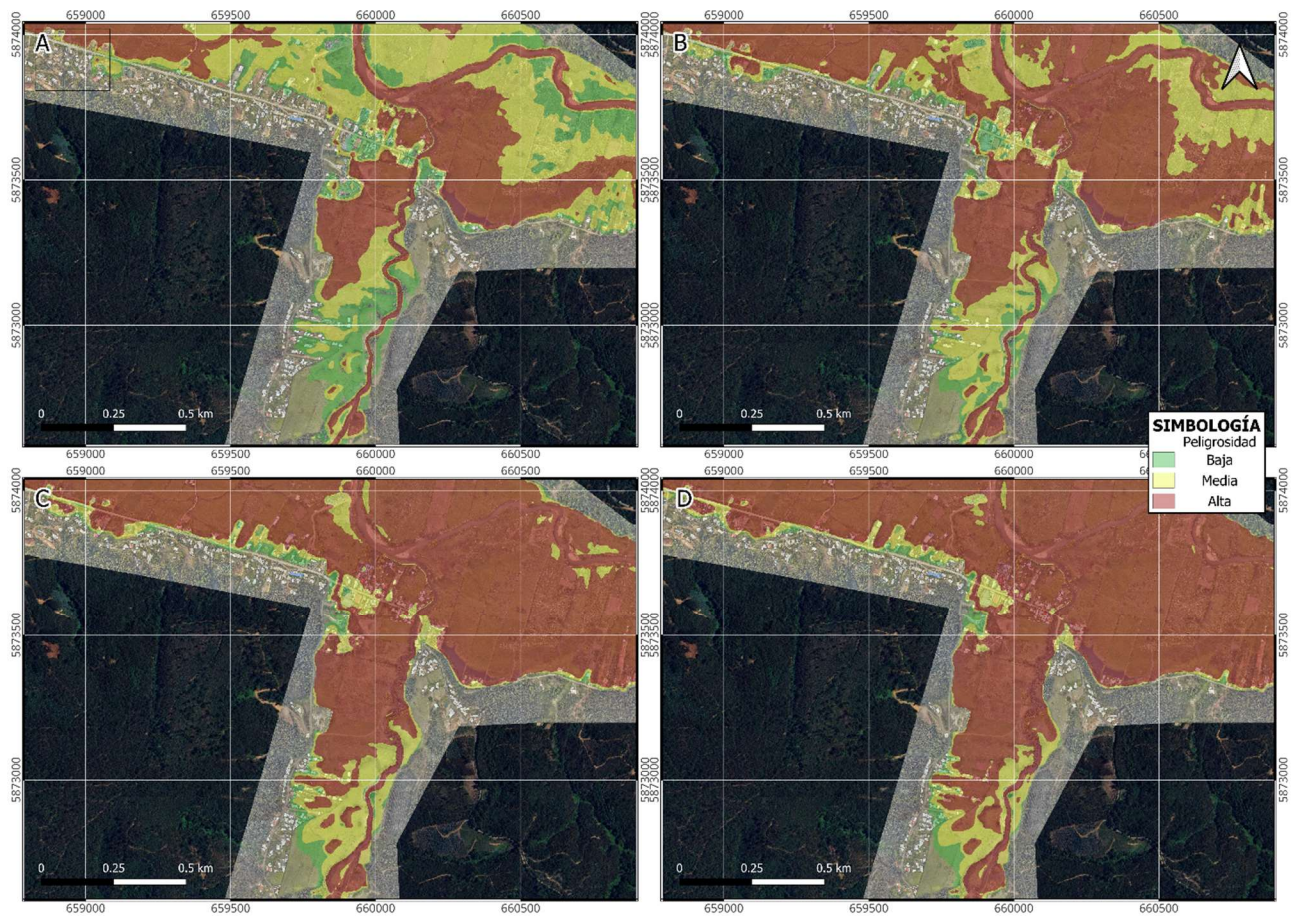


Figura 4-12: Mapas de Peligrosidad Sectores Pichilo y La faja: a) T=2, b) T=10, c) T=50, d) T=100

Se aprecia en las figuras anteriores que en las zonas pobladas, un porcentaje considerable de estos sectores está expuesto a un peligro elevado con una alta recurrencia., y que el sector donde más varía la peligrosidad es en el sector Pichilo-La Faja

Estos valores altos de peligrosidad, puede que tengan relación a los elevados caudales previamente mencionados en el capítulo 3 del presente documento.

4.8. Conclusiones

Se presentaron los resultados del análisis de convergencia y la elección de la malla para el modelo, se calibró el modelo en base a tres análisis de error distintos, posteriormente se validó el modelo con un error aceptable, y finalmente se presentó la variación del área inundada para los periodos de retorno simulados, las envolventes de profundidad y velocidad del escurrimiento, analizando la situación en el área de estudio, y finalmente se evaluó la peligrosidad del área, haciendo un análisis de que tan alta es la peligrosidad en la zona, y cuanto varía está en las zonas pobladas.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Se logró desarrollar un modelo en Iber en función de los estudios realizados en las etapas previas del proyecto, con una convergencia aceptable, teniendo un error inferior al 1%. Este modelo posteriormente fue calibrado, en función de un criterio técnico, la granulometría del lecho, debido a la incertidumbre en los caudales reportados por las estaciones Fluviométricas, obteniéndose un coeficiente n de Manning para los cauces dentro del rango de valores aceptable para este tipo de ríos, posteriormente corroborado, partiendo de la hipótesis que el evento en cuestión corresponde a una crecida de periodo de retorno de 2 años, logrando reproducir de forma aceptable el punto álgide de la crecida que motivó el desarrollo de este proyecto, lo cual verifica la hipótesis, y luego validado para una crecida diferente.

Con este modelo ya validado, se realizaron nueve simulaciones para variados periodos de retorno, desde 2 a 200 años, determinando superficies de inundación que van desde un 58% a un 68% de la superficie total del área de estudio y que, a través del análisis de los mapas de máximos obtenidos con estas simulaciones, se detectó que ciertas estructuras funcionan como control hidráulico, provocando una serie de fenómenos, como lo es el peralte del eje hidráulico que provoca el puente Conumo Chico, en la localidad de Conumo, aguas arriba de este, que llega a un punto tal que se produce un trasvasije de aguas a la cuenca del estero el Molino, y como en este proceso de trasvasije, el camino que une la Meseta con Chillancito actúa como vertedero.

Utilizando estos mapas de máximos, se delimitaron las áreas de peligrosidad siguiendo el criterio recomendado por la DOH, revelando que ya para un periodo de retorno de 2 años, se tiene que un 62% de la superficie inundada (que a su vez correspondería a un 36% de la superficie total del área de estudio), y que en las zonas habitadas, como lo son Carampangue, Conumo Bajo, Pichilo y la Faja, frecuentemente están expuestos a una peligrosidad alta.

Esta información, será de vital importancia en las etapas posteriores del proyecto, ya que permitirá definir alternativas que busquen mitigar el efecto que tienen estas crecidas en la población local, mientras que con el modelo se evaluará la eficacia de las alternativas que puedan ser representadas mediante modelación numérica.

GLOSARIO

h	=	Profundidad del escurrimiento (m)
U_x	=	Velocidad en el eje horizontal X (m/s)
U_y	=	Velocidad en el Eje horizontal Y (m/s)
g	=	Aceleración de gravedad (9.81 m/s ²)
Z_b	=	Cota de fondo (m.s.n.m.)
$\tau_{b,x}, \tau_{b,y}$	=	Fricción de fondo en el eje x/y
ρ	=	Densidad del Agua (997 kg/m ³)
ν_t	=	Viscosidad turbulenta
n	=	Coefficiente de rugosidad de Manning
$ U $ o v	=	Magnitud de la velocidad o velocidad promediada
RMSE	=	Root Mean Squared Error, Raiz del error cuadrático medio
M_i	=	Valor modelado
O_i	=	Valor observado
NRMSE	=	Normalized Root Mean Squared Error, Raiz del error cuadrático medio normalizada
O_{max}	=	Máximo valor observado
O_{min}	=	Mínimo valor observado
MAE	=	Mean Absolute Error, Error Absoluto Medio
CSI	=	Critical Success Index
M_1O_1	=	Aciertos (área donde lo modelado refleja lo observado)
M_1O_0	=	Falsas Alarmas (área donde que el modelo moja, que estaba seca en lo observado)
M_0O_1	=	Omisiones (área seca en el modelo, que si tuvo agua en lo observado)
Fr	=	Número de Froude

REFERENCIAS

- Alarcón, B. (2022). Análisis de asignación de caudales en Cartografías Sociales, para su posterior uso en calibración de Modelos Numéricos. *Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil*.
- Alarcón, B., Saenger, V., Guerra, M., Faúndez, R., Link, F., Carrasco, J. A., & Link, O. (2025). Using social cartographies for the calibration of two-dimensional hydraulic flood models. *Natural Hazards*, 121(2), 1303–1323. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06838-0>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Chow, V. Te. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw Hill.
- Cox, R. J., Shand, T. D., & Blacka, M. J. (2010). *Australian Rainfall and Runoff Revision Project 10: Appropriate Safety Criteria for People*. www.wrl.unsw.edu.au
- Dirección de Vialidad, Dirección General de Obras Públicas, & Ministerio de Obras Públicas. (2024). *Manual de Carreteras* (2024^a ed., Vol. 3).
- DOH, D. de O. H. (2024). *Términos de Referencia Consultoría “DIAGNÓSTICO PLAN MAESTRO RÍOS CONUMO, PICHILLO Y LÍA, COMUNA DE ARAUCO, REGIÓN DEL BIOBÍO”*. www.doh.cl
- Faúndez, R. (2017). Análisis Hidráulico de las Crecidas del Río Carampangue mediante Modelación Numérica Bidimensional. *Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil*.
- Ferrari, A., Viero, D. P., Vacondio, R., Defina, A., & Mignosa, P. (2019). Flood inundation modeling in urbanized areas: A mesh-independent porosity approach with anisotropic friction. *Advances in Water Resources*, 125, 98–113. <https://doi.org/10.1016/J.ADVWATRES.2019.01.010>
- García-Feal, O., González-Cao, J., Gómez-Gesteira, M., Cea, L., Domínguez, J. M., & Formella, A. (2018). An Accelerated Tool for Flood Modelling Based on Iber. *Water* 2018, Vol. 10, Page 1459, 10(10), 1459. <https://doi.org/10.3390/W10101459>
- LEN Ingeniería. (2025a). *“Diagnóstico Plan Maestro Ríos Conumo, Pichilo Y Lía, Comuna de Arauco, Región del Biobío” Informe Etapa N°1: Reconocimiento del Territorio, Revisión, Análisis e Integración de Antecedentes*.

- LEN Ingeniería. (2025b). “*Diagnóstico Plan Maestro Ríos Conumo, Pichilo Y Lía, Comuna de Arauco, Región del Biobío*” Informe Etapa N°2A Estudios Básicos y Catastro.
- LEN Ingeniería. (2025c). “*Diagnóstico Plan Maestro Ríos Conumo, Pichilo Y Lía, Comuna de Arauco, Región del Biobío*” Informe Etapa N°2B Levantamiento Topográfico.
- LEN Ingeniería. (2025d). “*Diagnóstico Plan Maestro Ríos Conumo, Pichilo Y Lía, Comuna de Arauco, Región del Biobío*” Metodología de Trabajo.
- Noguera, I. (2017). Riesgo de Inundación en el curso bajo del río Carampangue (Región del Bibío, Chile). *Trabajo Fin de Máster Universitario en Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del territorio: sistemas de información geográfica y teledetección*.
- Rojas, O., Reyes, C. M., & Castillo, E. J. (2010). Recurrencia Histórica por Inundación Fluvial en el curso inferior del río Carampangue, Región del Bio-Bio. *Tiempo y Espacio*, 25, 117–135. <https://doi.org/10.22320/rte.vi25.1772>
- Sanz-Ramos, M., López-Gómez, D., Bladé, E., & Dehghan-Souraki, D. (2023). A CUDA Fortran GPU-parallelised hydrodynamic tool for high-resolution and long-term eco-hydraulic modelling. *Environmental Modelling & Software*, 161, 105628. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2023.105628>
- Silva, M. (2025, junio 15). *Declaran alerta Roja en el Biobío por desborde del Río Pichilo en medio de lluvias: Ordenan evacuar.* EMOL. <https://www.emol.com/noticias/Nacional/2025/06/15/1169381/lluvias-biobio-alerta-roja-pichilo.html>
- U.S. Army Corps of Engineers. (2024). *HEC-RAS River Analysis System HEC-RAS 2D User's Manual*. U.S.A.C.E.
- Veloso, C., Flores, E., Noguera, I., Faúndez, R., Arriagada, P., Rojas, O., Carrasco, J. A., & Link, O. (2022). Preparedness against floods in nearly pristine socio-hydrological systems. *Hydrological Sciences Journal*, 67(3), 319–327. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.2023156>

ANEXO 1.1 CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

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

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

Vinculación
Se desarrolla un modelo que será utilizado en la planificación de ríos y gestión de inundaciones, para mitigar los efectos eventos en la población.

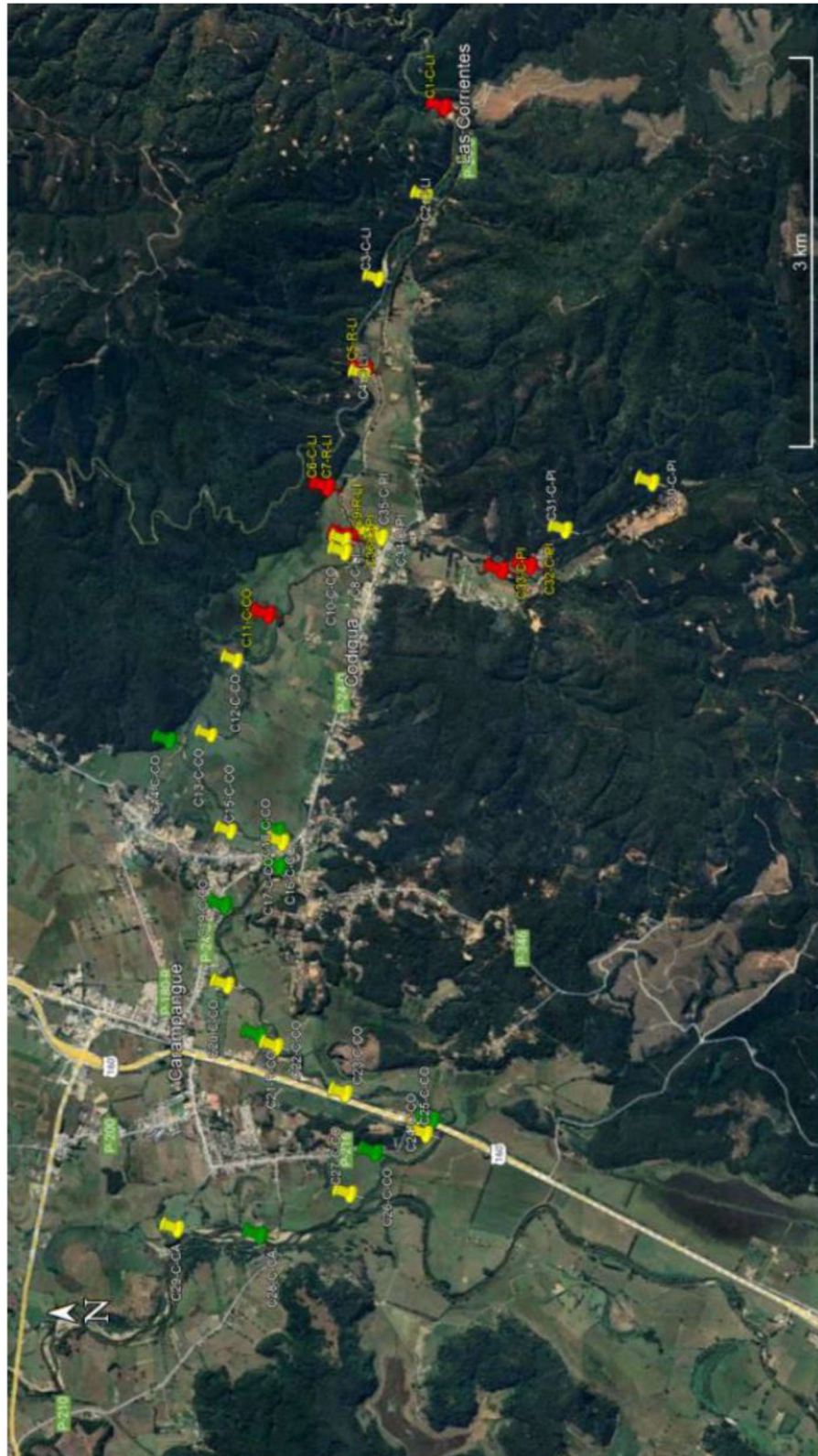
ANEXO 3.1: UBICACIÓN DE LAS CALICATAS

Figura A.3.1: Ubicación de las calicatas muestreadas (LEN Ingeniería, 2025b)

ANEXO 3.2: CALCULO DE N₀ PARA LAS DISTINTAS MUESTRAS**Tabla A.3.1: Valores de n₀ para las distintas muestras**

Muestra	Río	Tipo de Sedimento	d ₅₀	n ₀
C1-C-LI	Lía	grava	11.992	-
C2-C-LI	Lía	arena	1.626	0.041
C3-C-LI	Lía	arena	1.622	0.041
C4-C-LI	Lía	arena	1.642	0.041
C5-R-LI	Lía	arena	0.186	0.029
C6-C-LI	Lía	arena	0.476	0.034
C7-R-LI	Lía	arena	0.156	0.028
C8-C-LI	Lía	arena	1.631	0.041
C9-R-LI	Lía	arena	0.111	0.026
C10-C-CO	Conumo	arena	0.813	0.037
C11-C-CO	Conumo	arena	2.243	0.043
C12-C-CO	Conumo	arena	1.58	0.041
C13-C-CO	Conumo	arena	0.956	0.038
C14-C-CO	Conumo	arena	1.477	0.041
C15-C-CO	Conumo	arena	1.107	0.039
C16-C-CO	Conumo	arena	1.503	0.041
C17-C-CO	Conumo	arena	1.329	0.040
C18-C-CO	Conumo	arena	0.839	0.037
C19-C-CO	Conumo	arena	0.268	0.031
C20-C-CO	Conumo	arena	1.084	0.039
C21-R-CO	Conumo	arena	0.355	0.032
C22-C-CO	Conumo	arena	1.072	0.038
C23-C-CO	Conumo	arena	0.306	0.031
C24-C-CO	Conumo	arena	0.346	0.032
C25-C-CO	Conumo	arena	1.578	0.041
C26-C-CO	Conumo	arena	0.296	0.031
C27-C-CO	Conumo	arena	0.812	0.037
C28-C-CA	Carampangue	arena	1.309	0.040
C29-C-CA	Carampangue	arena	1.314	0.040
C30-C-PI	Pichilo	grava	13.681	-
C31-C-PI	Pichilo	grava	19	-
C32-C-PI	Pichilo	grava	12.254	-
C33-C-PI	Pichilo	arena	2.976	0.046
C34-C-PI	Pichilo	arena	1.226	0.039
C35-C-PI	Pichilo	arena	0.687	0.036
C36-C-PI	Pichilo	arena	0.204	0.029

ANEXO 4.1: MAPAS DE PROFUNDIDADES Y VELOCIDADES

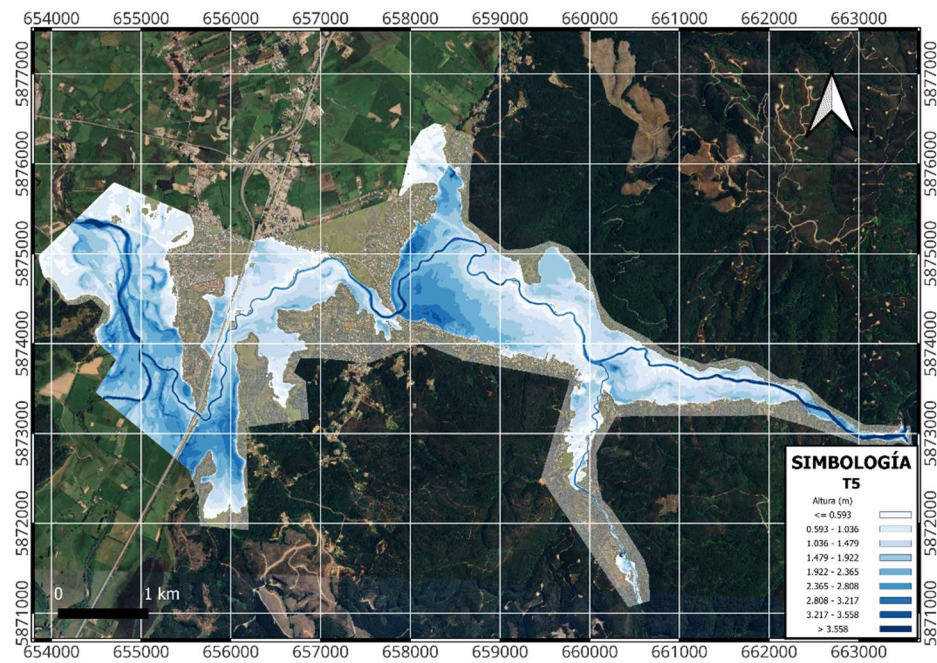


Figura A.4.1.1: Mapa de profundidades para T=5 años

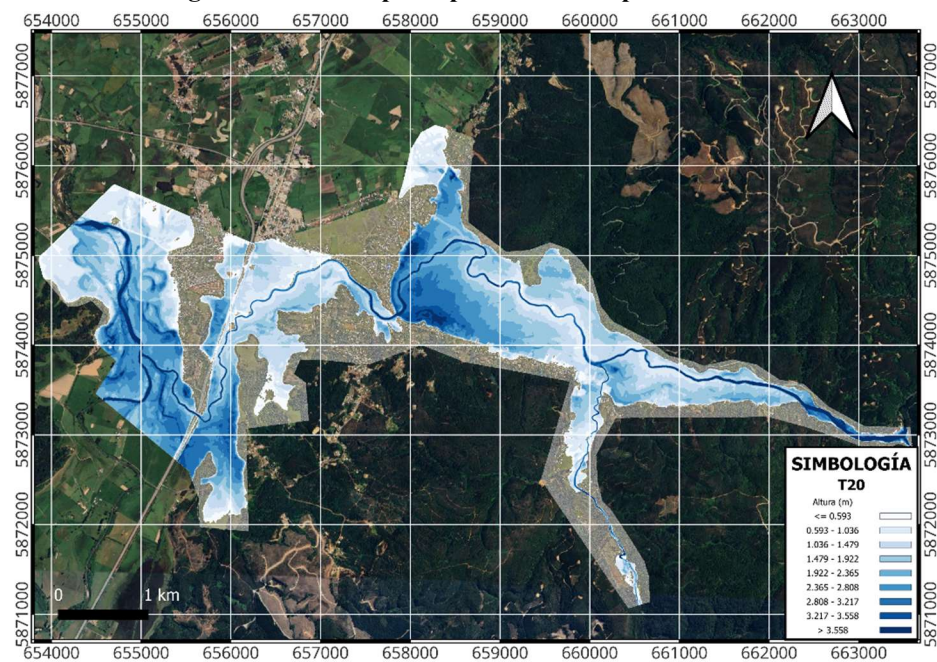


Figura A.4.1.2: Mapa de profundidades para T=20 años

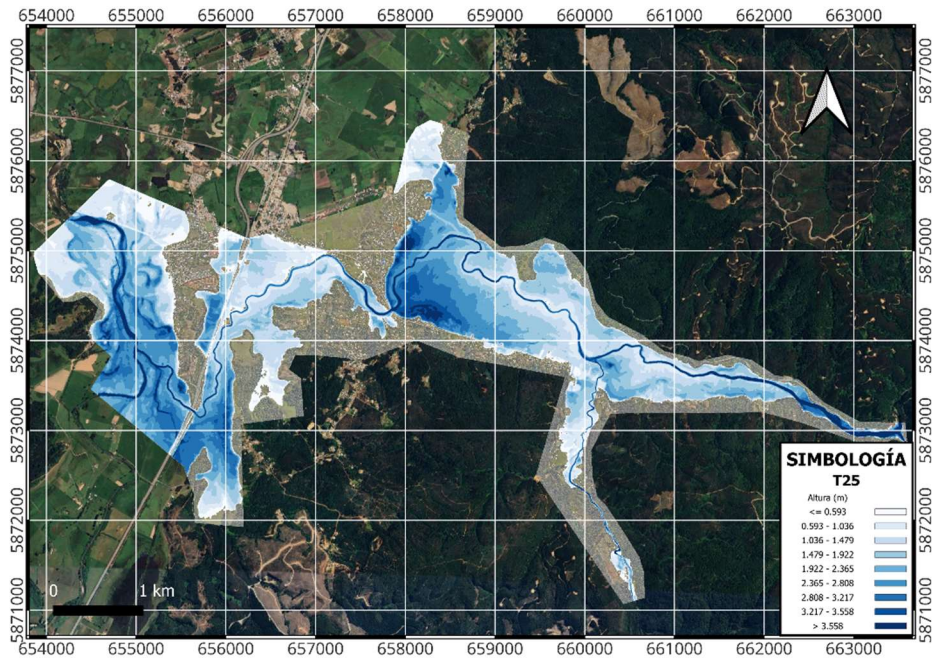


Figura A.4.1.3: Mapa de profundidades para T=25 años

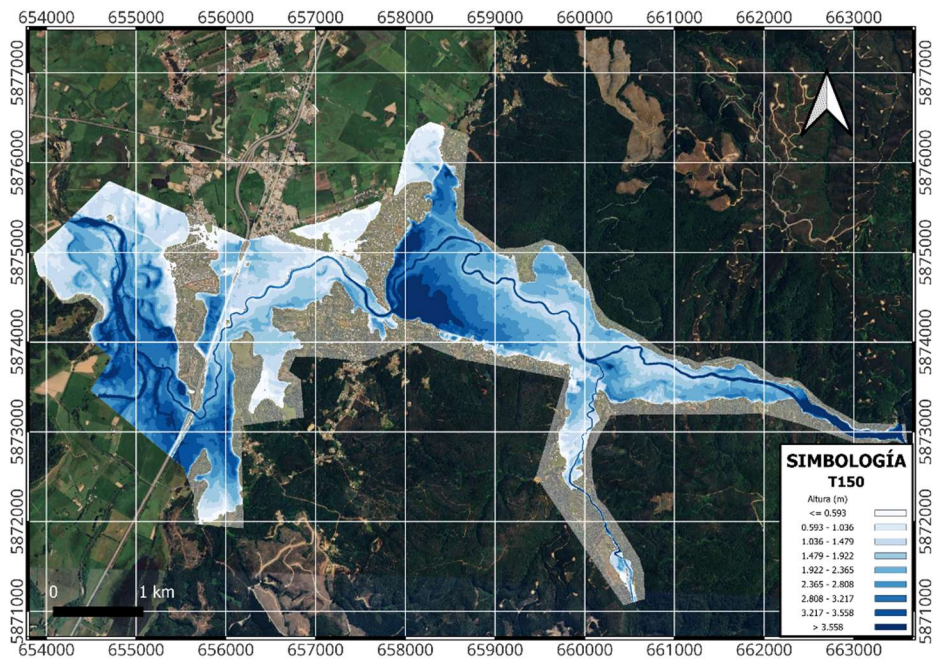


Figura A.4.1.4: Mapa de profundidades para T=150 años

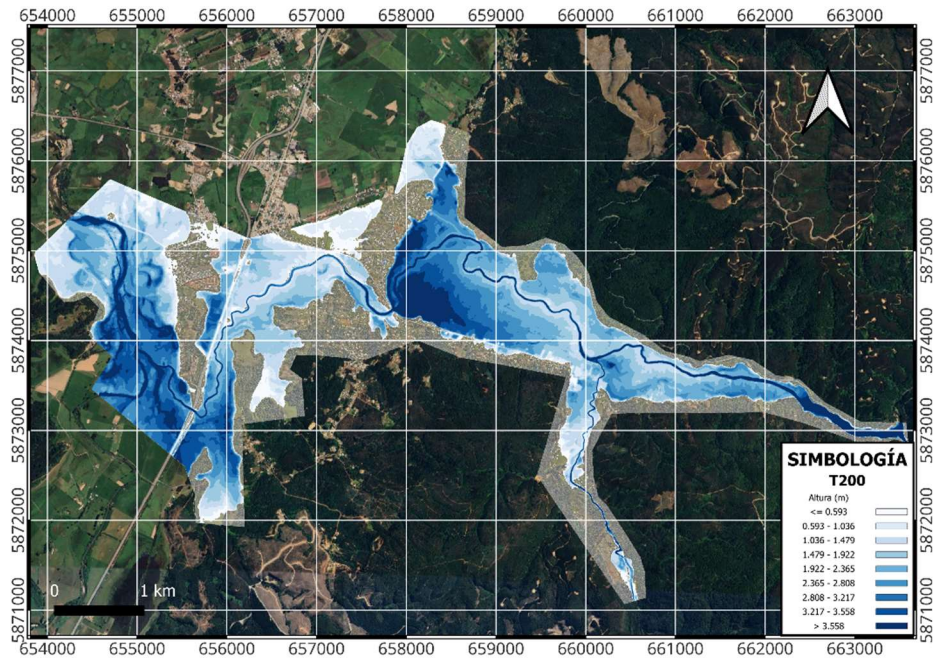


Figura A.4.1.5: Mapa de profundidades para T=200 años

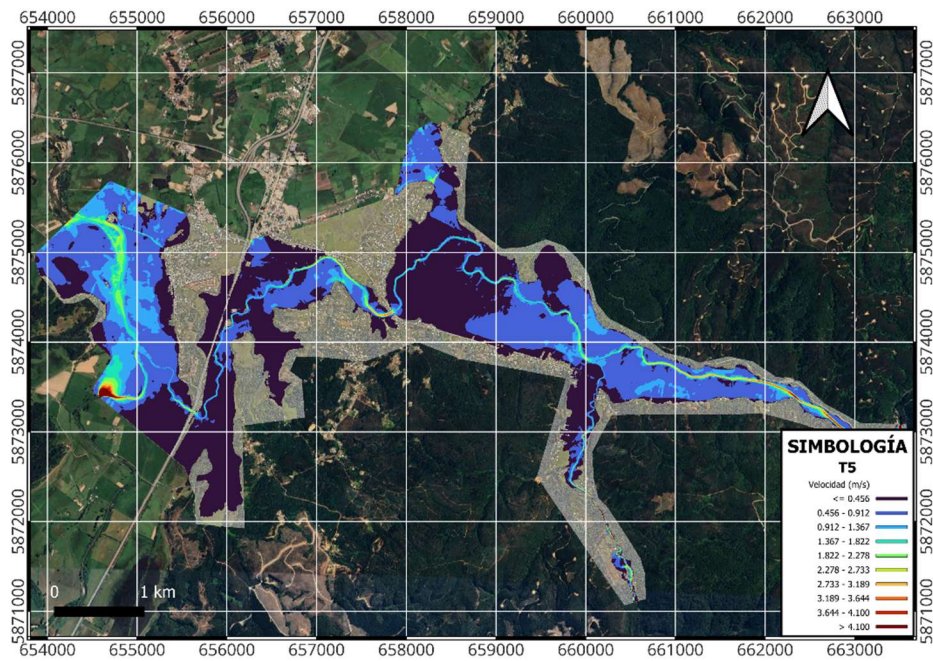


Figura A.4.1.6: Mapa de velocidades para T=5 años

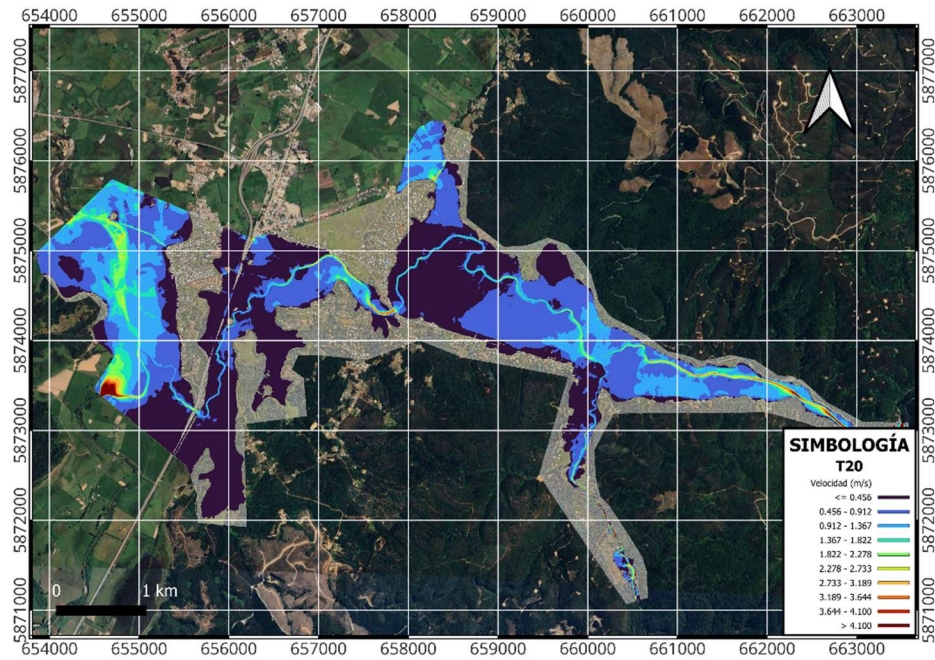


Figura A.4.1.7: Mapa de velocidades para T=20 años

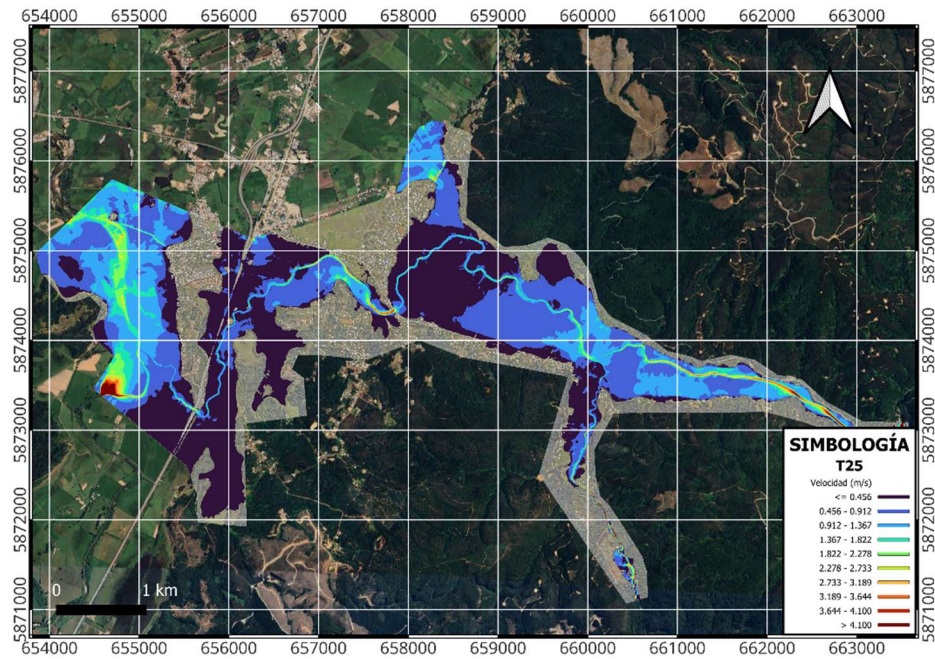


Figura A.4.1.8: Mapa de velocidades para T=25 años

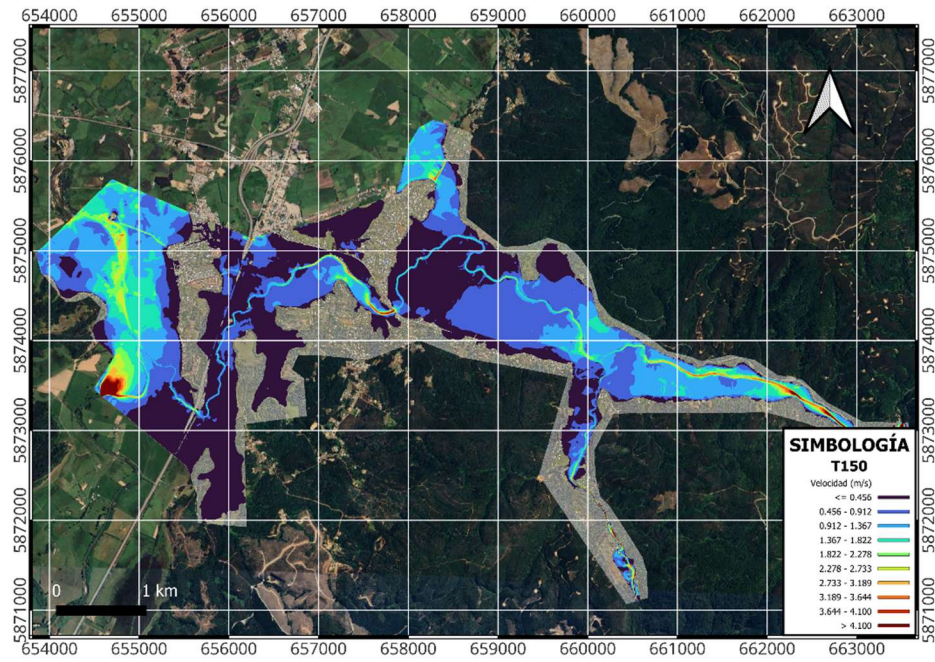


Figura A.4.1.9: Mapa de velocidades para T=150 años

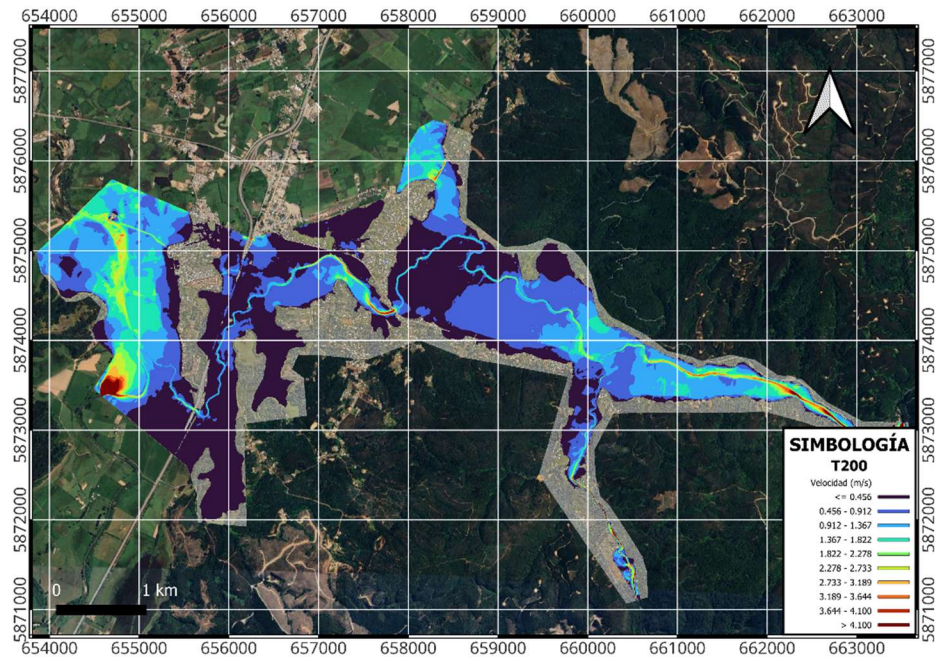
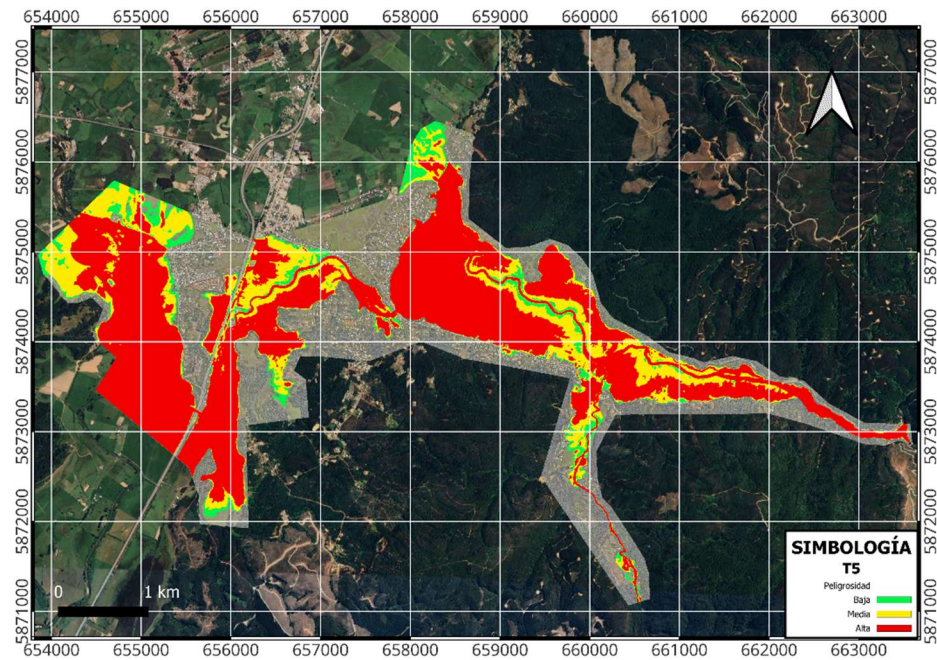
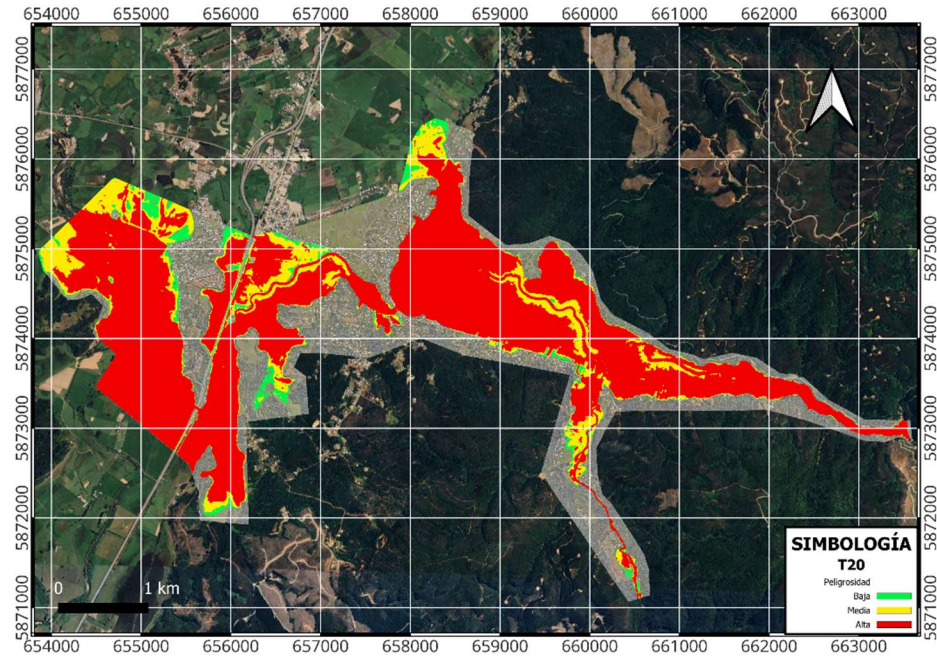


Figura A.4.1.10: Mapa de velocidades para T=200 años

ANEXO 4.2: MAPAS DE PELIGROSIDAD**Figura A.4.2.1: Mapa de peligrosidad para T=5 años****Figura A.4.2.2: Mapa de peligrosidad para T=20 años**

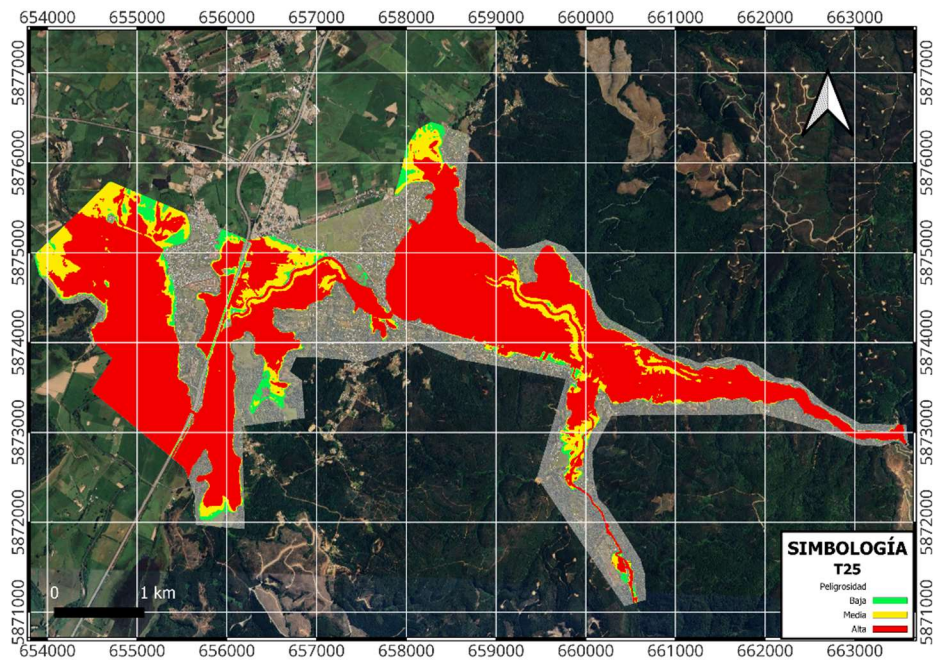


Figura A.4.2.3: Mapa de peligrosidad para T=25 años

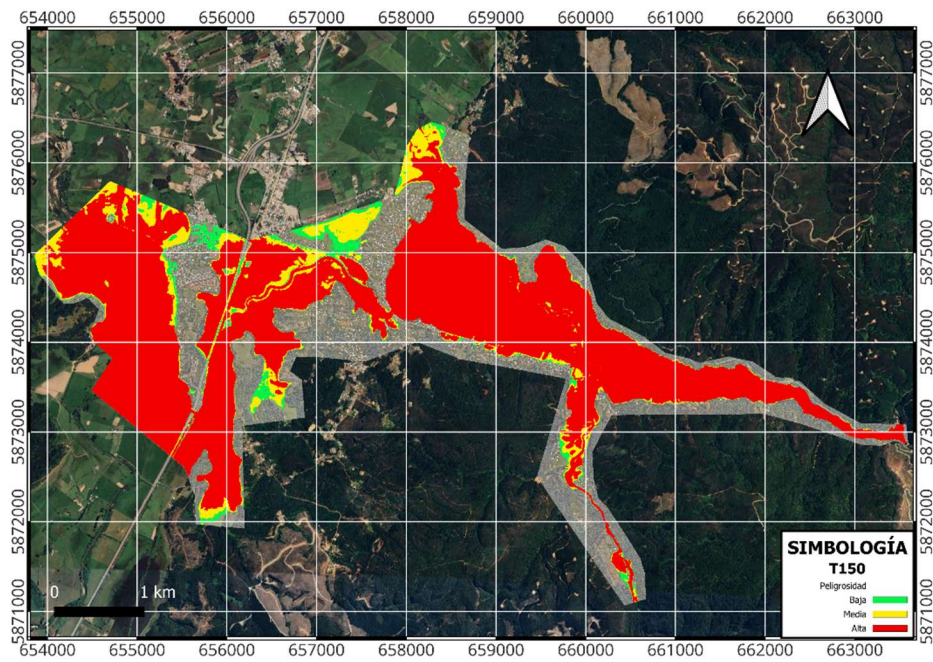


Figura A.4.2.4: Mapa de peligrosidad para T=150 años

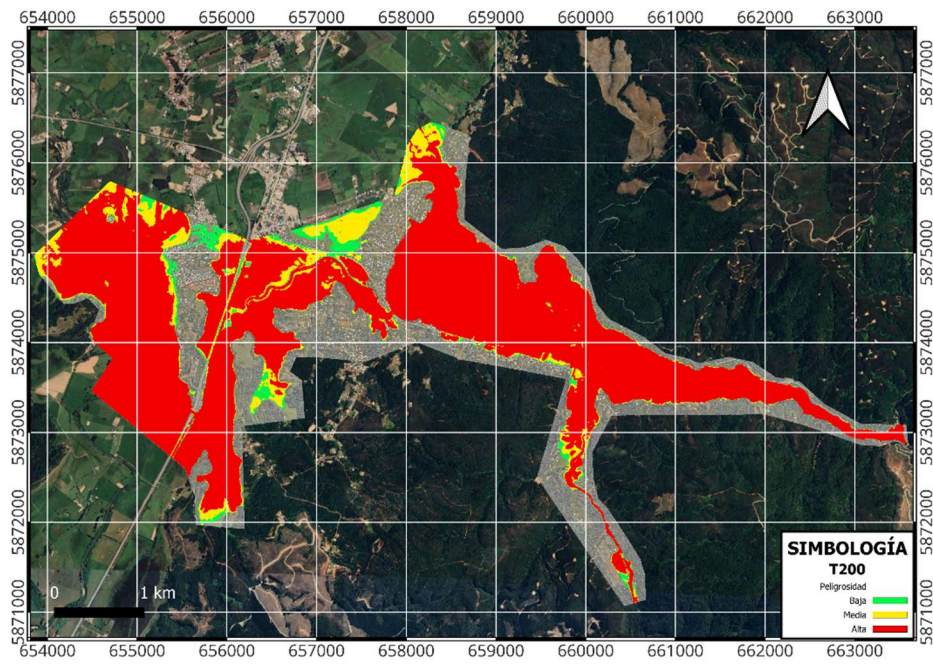


Figura A.4.2.5: Mapa de peligrosidad para T=200 años

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

Departamento	: Departamento de Ingeniería Civil
Carrera	: Ingeniería Civil
Nombre del memorista	: Aldo Ignacio Contreras Espinoza
Título de la memoria	: ANALISIS DE PELIGROSIDAD DE LAS INUNDACIONES CAUSADAS POR LAS CRECIDAS DE LOS RÍOS LÍA, PICHILLO Y CONUMO, EN LA PROVINCIA DE ARAUCO.
Fecha de la presentación oral	: 30 de enero de 2026
Profesor(es) Guía	:
Profesor(es) Revisor(es)	:
Concepto	:
Calificación	:

Resumen

Las frecuentes inundaciones provocadas por las crecidas en los ríos Lía, Pichilo y Conumo, en la provincia de Arauco, motivan al MOP, a través de la DOH a licitar el proyecto de consultoría “DIAGNÓSTICO PLAN MAESTRO RÍOS CONUMO, PICHILLO Y LÍA, COMUNA DE ARAUCO, REGIÓN DEL BIOBÍO”. Esta licitación fue adjudicada por LEN Ingeniería. Este estudio se centra en la etapa 3 del proyecto, “Análisis Hidráulico y Diagnostico del Sistema Fluvial”, y consta en desarrollar un modelo hidráulico bidimensional para estudiar el comportamiento de los cauces en crecida (mapas de profundidad y velocidad, superficies de inundación), y en base a este comportamiento definir y analizar las áreas de peligrosidad en el área de estudio.

