



Universidad
de O'Higgins

Escuela de Ingeniería
Ingeniería Civil Geológica

Evaluación del peligro de inundación por desborde fluvial del Estero Nilahue en los sectores de Barrancas y La Villa en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins (Chile).

Nicolás Esteban Bustamante Castro

Profesor guía: Laura Becerril

Comisión: Daniele Tardani

Etienne Bresciani

Ashley Apey

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Geólogo

Rancagua, Chile

Diciembre 2023

Índice de contenido

1. Introducción.....	4
1.1. Planteamiento del problema.....	5
1.2. Hipótesis	6
1.3. Preguntas de investigación.....	6
1.4. Zona de estudio	6
1.5. Objetivos.....	7
1.5.1. Objetivo general.....	7
1.5.2. Objetivos específicos	8
2. Marco teórico y Antecedentes	8
2.1. Antecedentes de investigaciones.....	8
2.2. Factores de una inundación	10
2.3. Climatología e Hidrografía	11
2.4. Marco geológico.....	13
2.5. Marco geomorfológico	15
3. Metodología	16
3.1. Recopilación y actualización de los eventos fluviales en la zona.	16
3.2. Modelación hidráulica	18
3.2.1. Bases de la modelación en QGIS.....	19
3.2.3. Simulación hidráulica	27
3.3. Difusión y comunicación de los peligros asociados a las inundaciones	28
4. Resultados	28
4.1. Recopilación de registros históricos de inundaciones por desborde fluvial	28
4.2. Modelación hidráulica	33

4.1. Resultados para la comunidad	36
5. Discusión	37
5.1. Eventos de inundaciones	37
5.2. Modelación Hidráulica	37
5.3. Difusión y comunicación de los resultados obtenidos	39
6. Conclusiones.....	39
7. Recomendaciones	40
8. Referencias.....	41
9. Anexos	44

Índice de figuras

Figura 1: Mapa de ubicación de la zona de estudio (polígono rojo), los puntos de colores indican las localidades ubicadas dentro del área de estudio.....	7
Figura 2: Climograma de la localidad de Cahuil, durante los últimos 20 años.	12
Figura 3: Mapa de la cuenca hidrográfica del estero Nilahue con su respectiva red hidrográfica.	13
Figura 4: Mapa geológico de la zona de Pichilemu, en el rectángulo rojo se puede apreciar la zona de estudio, Modificado de Farias et al., (2011).	14
Figura 5: Carta geomorfológica de la zona de estudio. Extraída de Ibarra (2013).....	16
Figura 6: Mapa de la zona de estudio, durante el proceso de la modelación hidráulica del estero Nilahue en las zonas de Barrancas y La Villa. En la imagen.....	21
Figura 7: Geometría de la modelación del estero Nilahue dentro del programa HEC-RAS, donde se observa en azul el eje principal del estero, en verde las secciones del estero y en rojo las riberas del estero en cuestión.	23

Figura 8: Fotografía aérea del sector Salinas de Barrancas, acá se puede apreciar el canal principal, con características de sinuosidad, con algunos bajíos. Fotografía tomada por Alberto Marcías, extraída de la raíz al plato (2021).....	24
Figura 9: Precipitaciones acumuladas durante 72 horas durante el evento del 18–22 de Agosto del 2023 en la Estación Nilahue – La Quebrada. Acá los círculos de colores morados indican las zonas con valores más altos de precipitación, que luego decaen a azul, celeste y verde, de igual manera el tamaño de estos da a entender la cantidad de precipitación, tamaños pequeños indican menores valores y viceversa. Imagen extraída de la plataforma VisMet.....	29
Figura 10: Precipitaciones acumuladas durante 72 horas durante el evento del 18–22 de Agosto del 2023 en la Estación Lolol. Acá los círculos de colores morados indican las zonas con valores más altos de precipitación, que luego decaen a azul, celeste y verde, de igual manera el tamaño de estos da a entender la cantidad de precipitación, tamaños pequeños indican menores valores y viceversa. Imagen extraída de la plataforma VisMet.	30
Figura 11: Valores de niveles de agua en metros del estero Nilahue en la estación Santa Teresa para el evento del 18–22 de Agosto del 2023. Imagen extraída de la plataforma DGA estaciones en línea.	31
Figura 12: Valores de caudal (m^3/seg) del estero Nilahue en la estación Santa Teresa durante el evento del 18–22 de Agosto del 2023. Imagen extraída de la plataforma DGA estaciones en línea.	31
Figura 13: Valores de la precipitación instantánea (mm) captados en la estación Cahuil durante el evento del 18 – 22 de Agosto de 2023. Imagen extraída de la plataforma DGA estaciones en línea.	32
Figura 14: Mapa de los eventos de inundaciones por desborde fluvial históricas ocurridas en la zona de estudio en los últimos 45 años.	33
<i>Figura 15: Gráfico de ajuste de la distribución Gamma (LM) utilizando L-Momentos (LM), obtenido a través del software HEC-SSP.....</i>	<i>34</i>
Figura 16: Mapa de peligros de inundaciones en las localidades de Barrancas y La Villa, para los distintos periodos de retorno asociados.....	35

Figura 17: Presentación destinada para la difusión del contexto de la zona y los resultados del mapa de peligros de inundación.	36
--	----

Índice de tablas

Tabla 1: Síntesis de la tabla de cálculos con el método HEC-SSP.....	34
--	----

1. Introducción

La humanidad, a lo largo de su historia, siempre se ha visto expuesta a distintos peligros geológicos, ya sea erupciones volcánicas, remociones en masa, terremotos, tsunamis o inundaciones, generados por la dinámica interna o superficial del planeta. Entre estos peligros las inundaciones destacan como un fenómeno más recurrente con el potencial de amenazar tanto las localidades presentes como a sus bienes, que a su vez pueden ser potenciadas por las condiciones climáticas extremas a causa del calentamiento global, afectando en su mayoría a las áreas urbanas.

En base a lo anterior pueden ser muchas las zonas que se vean afectadas por estos peligros, específicamente por las inundaciones, como es el caso de la zona de estudio.

Según FERRANDO (2006) las inundaciones se definen como una consecuencia derivada de otros procesos de recurrencia interanual, como son las crecidas de los cursos de agua, sumado a ello condiciones de insuficiencia de los sistemas de evacuación, sean estos cauces naturales, sistemas de drenajes artificializados, colectores urbanos, etc.

Dichas inundaciones tienen varios factores climáticos que condicionan su ocurrencia, tales como: lluvias intensas, fusión de nieves – hielos y lluvias prolongadas. También por factores antrópicos como: el desequilibrio del agua a evacuar y la capacidad de los sistemas artificiales de recolección, la intervención de cauces naturales y la ruptura de represas o abertura de compuertas (SENAPRED, 2023).

Estas crecidas, también llamadas desbordes fluviales en los cursos de agua son la base principal de estos eventos hidrometeorológicos. Este concepto de crecida, riada o avenida es un proceso natural y de grandes consecuencias ambientales, constituido por un incremento

importante y repentino de caudal en un sistema fluvial. Lleva consigo un ascenso del nivel de la corriente, que puede desbordar el cauce menor para ocupar progresivamente el cauce mayor, hasta alcanzar un máximo o punta de caudal o caudal-punta y descender a continuación (OLLERO, 1997).

Esta investigación se encuentra enmarcada en el proyecto FIC de "Energías renovables para producción de sal de Cáhuil", iniciado en 202, perteneciente al Instituto de Ciencias de la Ingeniería UOH, encabezado por el académico Daniele Tardani.

1.1. Planteamiento del problema

Las inundaciones causan un gran impacto al medio ambiente y al entorno trayendo problemas a las personas que ocupan las llanuras de inundación, tales como la pérdida de bienes materiales, la proliferación de enfermedades transmitidas por el agua y destruyendo los cultivos (PALAGI, 2014). En el ámbito mundial es el peligro natural más recurrente a lo largo de los años 2019 - 2022 según los últimos informes anuales de estadísticas de desastres (Centro de Investigación sobre Epidemiología de los Desastres, 2021; CRED, 2022; CRED, 2023), además de que fue el tipo de desastre más mortífero en 2019 a nivel mundial (CRED, 2020).

Según ROJAS (2014) en Chile durante el periodo de 1574-2012 se registraron 227 eventos de inundación fluvial, de los cuales el 71% de estos se asocian a eventos pluviales por precipitación.

Es por esto que surge la importancia de investigar estos eventos de inundaciones por desborde fluvial, especialmente tras los recientes eventos entre el 21 y 26 de junio y del 18 al 22 de agosto de 2023. Resultando este último evento en una inundación en la zona de estudio, la que generó la inundación de parte de la ruta que atraviesa estas localidades. El interés de estudiar estos fenómenos crece cuando lo que se estudia son las consecuencias en el territorio de dichos procesos. Son estas consecuencias, las repercusiones en el medio natural y humano de un proceso hidrológico extremo, las que convierten al proceso en riesgo y las que dan máximo sentido a un tema fundamental de la investigación geográfica contemporánea y de otras ciencias aplicadas (OLLERO, 1997).

El área de estudio contempla las localidades de Barrancas y La Villa. Si bien éstas se destacan por su gran atractivo turístico, patrimonial y cultural, son reconocidas principalmente por la producción de las plantas salinas ubicadas a las laderas del estero Nilahue, que a través de procesos de evaporación extraen la sal para su posterior venta, siendo este uno de los principales ingresos económicos de los pobladores. Sin embargo esta actividad se encuentra vulnerable ante la posible ocurrencia de eventos de inundación, con la posibilidad de generar retrasos en el proceso de producción, resultando en pérdidas económicas a la comunidad salinera.

1.2. Hipótesis

Se espera un aumento en la frecuencia y magnitud de las inundaciones en los sectores de Barrancas y La Villa en la cuenca del estero Nilahue, debido al cambio climático y su influencia en el incremento en la intensidad de las precipitaciones, lo que provocaría un aumento de las inundaciones por desborde fluvial, por lo que es necesario realizar una evaluación del peligro de estos eventos y así comprender su impacto en el área de estudio.

1.3. Preguntas de investigación

¿Cuáles son las zonas más susceptibles a inundaciones generadas por desbordes fluviales en el estero Nilahue en los sectores de Barrancas y La Villa? ¿Cuál ha sido la frecuencia de estos desbordes fluviales en los últimos 45 años? ¿Cuál es el peligro por inundaciones en la zona de estudio? ¿Cómo pueden comunicarse los resultados obtenidos en esta investigación?

1.4. Zona de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en la VI región del Libertador Bernardo O'Higgins, dentro de la provincia Cardenal Caro, comuna de Pichilemu, Chile. Dentro de este área tiene su origen el estero Nilahue ($34^{\circ}35'S$ $71^{\circ}46'W$), cuyo nacimiento es a unos 60 km al sur de Pichilemu, con dirección sur a norte en casi la totalidad de su recorrido y desemboca en la localidad de Cáhuil, ubicada a unos 10 km al sur de Pichilemu.

En el entorno del estero se ubica el área de interés para este estudio, la cual abarca las localidades de Barrancas y La Villa (Figura 1). El acceso principal para llegar a esta zona es a través de la carretera Panamericana Sur (ex Ruta 5) desde la ciudad de Rancagua,

posteriormente se toma la Ruta 90 en Peralillo, continuando por el Camino a Cahuil y finalizando en la ruta I-520.

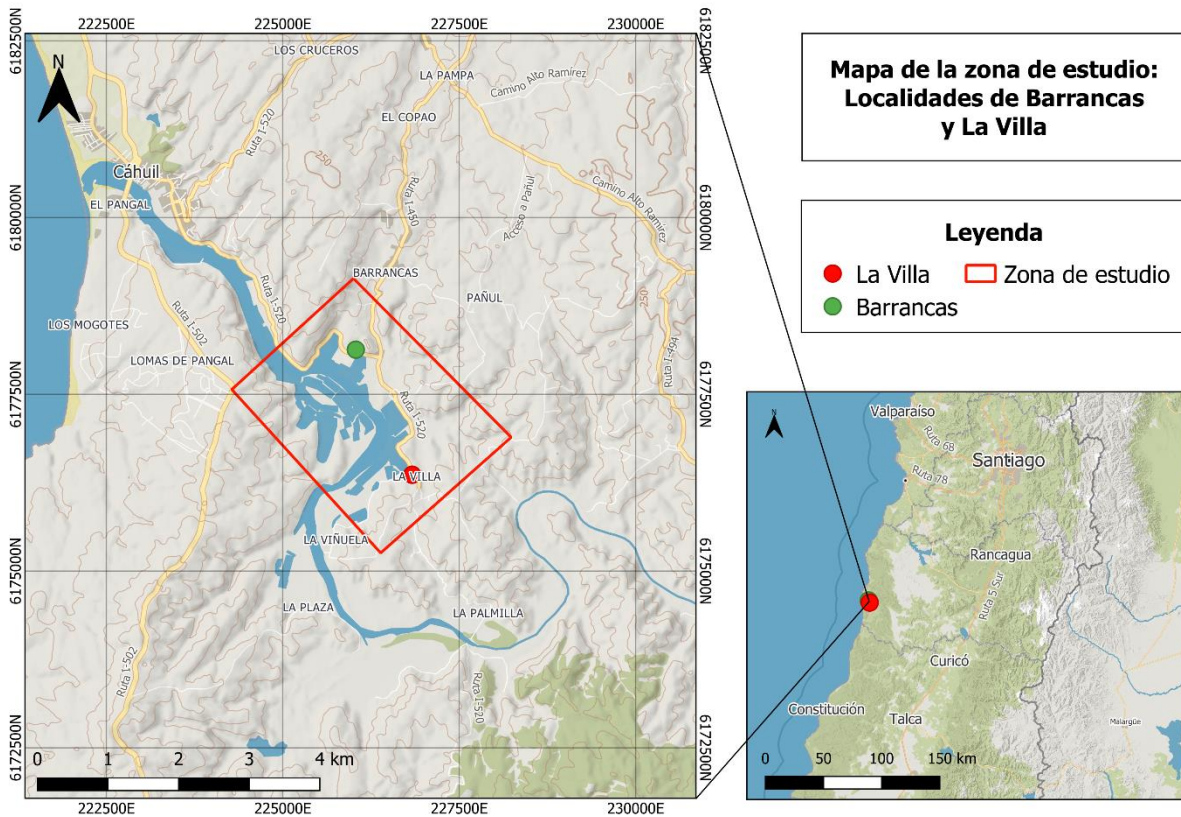


Figura 1: Mapa de ubicación de la zona de estudio (polígono rojo), los puntos de colores indican las localidades ubicadas dentro del área de estudio.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Evaluar las zonas expuestas a inundaciones por desborde fluvial asociadas al estero Nilahue en los sectores de Barrancas y La Villa, por medio de una simulación a través de los programas HEC-RAS, HEC-SSP y QGIS, para luego entregar a la comunidad los resultados obtenidos.

1.5.2. Objetivos específicos

- Revisar la documentación histórica de los últimos 45 años para hacer un registro de los eventos de inundación por desborde fluvial en los sectores de Barrancas, La Villa y zonas aledañas.
- Pronosticar las zonas de inundaciones por desborde fluvial relacionadas al estero Nilahue, a través de un modelo hidráulico unidimensional, mediante los softwares HEC-RAS, HEC-SSP y QGIS.
- Identificar y evaluar las zonas de peligros de inundaciones en el área de estudio mediante la modelación hidráulica con HEC-RAS y la generación de mapas de peligros de inundaciones.
- Difundir los resultados obtenidos a la comunidad a través del programa del proyecto FIC de “Energías renovables para producción de Sal de Cáhuil” mediante un poster informativo y una presentación.

2. Marco teórico y Antecedentes

2.1. Antecedentes de investigaciones

Las investigaciones llevadas a cabo en la zona abordan distintas temáticas relacionadas con la geología y peligros geológicos. Aunque este estudio se concentra en una superficie de 7.5 km², se han realizado estudios en los sectores aledaños asociados a peligros geológicos por inundaciones en esta área. En esta sección se exponen los resultados de estas investigaciones previas entorno a la temática de investigación:

García (2007) analizo los riesgos naturales en el área urbana de la zona costera de la comuna de Pichilemu, VI región, en la cual evaluó las amenazas a la comunidad, destacando las amenazas asociadas a inundaciones por tsunami, destacando el alto peligro de inundaciones por tsunami en la zona de Cáhuil, donde el peligro continua más arriba por la ruta I-520, ruta que lleva el sector de Barrancas. Sin embargo no analiza las amenazas por inundación fluvial en la zona, ya que considera que en Pichilemu la amenaza es baja.

El estudio de riesgo PUC (2010) sí analiza con mayor profundidad el peligro por inundaciones de la zona de estudio. En él se realizó una modelación hidrológica/hidráulica en las localidades de Pichilemu y Cahuil que permitió estimar los caudales, volúmenes de escorrentía de los cauces, alturas de agua y la velocidad de escurrimiento, pudiendo determinar las zonas de la planicie de inundación por desborde fluvial que serían afectadas. Los resultados mostraron parte de la localidad de Cahuil con peligro de inundación por desborde fluvial, inundando gran parte de las salinas y algunas casas presentes en las zonas más cercanas a las riberas del río. Dicha modelación se generó en periodos de retorno de 5, 10 y 100 años, donde en este último abarca zonas más alejadas que ya se encuentran más urbanizadas.

Ibarra (2013) genera mapas de susceptibilidad de inundaciones por anegamientos y por desborde fluvial, siendo este último el más relevante para este estudio. En este se consideran zonas de susceptibilidad alta, moderada y baja en base a los periodos de retorno asociados, los cuales se generaron para las localidades de Cahuil, Barrancas y La Villa.

En los resultados Cahuil presenta una susceptibilidad alta donde se ven afectadas en gran medida zonas de uso residencial, e incluso en el caso de una susceptibilidad baja se logra ver que parte del camino es susceptible a ser afectado por estas inundaciones. Pasando a las zonas de Salinas de La Villa gran parte del tramo se ve afectado con susceptibilidad alta, llegando a afectar en algunas zonas el camino I-520 e incluso casi todas las salinas ubicadas en el sector. El poblado de Barrancas, en cambio, presenta una susceptibilidad moderada.

Dentro de la Modificación del Plan Regulador Comunal (PRC, 2014) se realizó un análisis de las zonas de riesgo en los sectores de Pichilemu y Cahuil, donde se identificaron riesgos de Inundación, remoción en masa, marejadas y tsunamis. Acá se destaca el riesgo de inundación por cauces y/o lagunas, donde se distinguió que en el poblado de Cahuil estaba bajo riesgo, inclusive el camino que va hacia Barrancas (Ruta I-520).

La principal diferencia que se llevara a cabo en esta investigación será la aplicación de valores de caudales obtenidos a través de una estación fluviométrica, por lo que no se aplicaran metodologías de obtención hidrometeorológicas basadas en conversiones. Además de esto se

realizará una actualización de los eventos de inundaciones por desborde fluvial en la zona, debido al evento ocurrido el presente año 2023.

2.2. Factores de una inundación

Las inundaciones son un evento natural y recurrente para un río/estero. Estas son el resultado de lluvias fuertes o continuas que sobrepasan la capacidad de absorción del suelo y la capacidad de carga de los ríos, riachuelos y áreas costeras, lo que provoca que este curso de agua rebalse su cauce e inunde las áreas adyacentes (OAS, 1993). Dentro de este ámbito existen distintas causas que pueden generar una inundación, estas pueden ser:

- Precipitaciones intensas: Estas precipitaciones pueden saturar el suelo y así aumentar el caudal de los ríos, lo que genera una inundación.
- Derretimiento de nieves: El rápido deshielo de la nieve en zonas con mayor altitud tiende a generar un exceso de agua, que una vez que ingresa al río/estero genera una inundación aguas abajo; algunas de estas pueden asociarse a derretimientos producto del volcanismo.
- Crecidas producto de remociones en masa: que pueden bloquear ríos/cauces generando un colapso temporal, que al romperse desencadena en una inundación.
- Crecidas por tsunamis: la generación de olas de gran energía llega a zonas costeras generando inundaciones.
- Crecidas producto de fallas de obras hidráulicas: Ya sea por razones hidrológicas o de fallas de operación, como por ejemplo rotura de presas, canalizaciones o acueductos.

A su vez también existen tres tipos de inundaciones principales, que se definen según su origen las cuales son:

a) Inundaciones por anegamientos: Definida como la acumulación de aguas de lluvia sobre un terreno, originada por el desbalance, la cual se da entre el volumen de la lluvia precipitada en un determinado lapso de tiempo y la capacidad de evacuación de un suelo dado, tanto horizontal como verticalmente (Ferrando, 2006). No obstante esta acumulación de aguas no está relacionada directamente con la red fluvial (Ibarra, 2013).

b) Inundaciones costeras: Dentro de estas se encuentran distintos subtipos, una de las más conocidas con las asociadas a tsunamis o maremotos que son olas de gran envergadura causadas por la perturbación a gran escala, de corta duración del fondo marino, resultado de un gran terremoto/sismo. Otra causa son los macareos, que son fenómenos que ocurren cuando la marea comienza a ingresar por la desembocadura de los ríos, lo que genera olas de gran envergadura hacia el nacimiento del río.

c) Inundaciones por desborde fluvial: Según Mardones & Vidal (2001) Se entiende por inundación fluvial, la invasión de un territorio por el escurrimiento descontrolado de un flujo fluvial, debido a una crecida. Las aguas desbordan de su cauce habitual, invaden el lecho mayor del río o las llanuras de inundación y terrazas inferiores, paleocauces, etc., lugar donde decantan los aluviones generalmente finos. Estos procesos están asociados en su mayoría a precipitaciones persistentes o intensas de corta duración, aunque sus causas pueden deberse a muchos otros factores asociados.

Estas inundaciones conllevan un periodo de recurrencia, que se define como periodo de retorno, este es una medida estadística de la frecuencia con la que es probable que ocurra un evento de lluvia de cierta magnitud, por ejemplo: se espera que la lluvia con un período de retorno de 10 años ocurra solo cada 10 años. Un período de retorno de 100 años corresponde a un evento tan extremo que esperamos que ocurra solo cada 100 años (Melice y Reason, 2007). Este periodo se utiliza para gestionar el riesgo de inundaciones y el diseño de las mismas infraestructuras, ya que entrega la información necesaria para adecuar las estructuras frente a las amenazas de inundaciones.

2.3. Climatología e Hidrografía

En cuanto al clima de la zona de estudio ubicada en el litoral de la sexta región presenta un clima templado cálido, propio de la zona mediterránea central de Chile, que además se ve influenciado en gran parte por la acción termorreguladora del océano que se manifiesta en bajas oscilaciones térmicas entre el día y la noche. En cuanto a la estación seca es bastante

prolongada (7 a 8 meses), mientras que en la estación lluviosa (de aproximadamente 4 meses) se registran abundantes precipitaciones (PLADETUR, 2021).

La temperatura media anual es de 13.9°C, mientras que la temperatura máxima media del mes más cálido (enero) es de 24.8°C y la mínima media del mes más frío (julio) de 6°C. (PLADETUR, 2021). Respecto a las precipitaciones se puede notar que en la estación de Pichilemu durante el periodo 2000 – 2022 se registró un promedio anual de precipitación acumulada de 458.9 mm, siendo la mayor concentración de lluvias durante el mes de junio en todos los sectores aledaños, como se observa en el climograma de la localidad de Cáhuil (Figura 2).

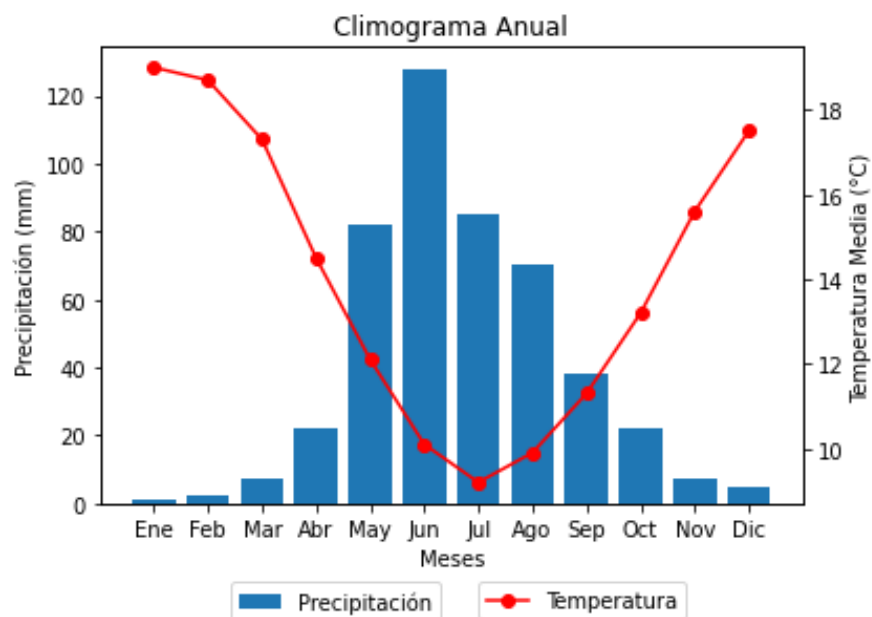


Figura 2: Climograma de la localidad de Cáhuil, durante los últimos 20 años.

Otro factor para tener en cuenta son las características intrínsecas del sector a estudiar, una de estas es la cuenca en donde surge el cauce principal de estudio. APARICIO, (1993) define una cuenca hidrológica como una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

La cuenca hidrográfica del estero Nilahue (Figura 3), tiene su origen en el estero Los Coipos, donde convergen los esteros Altos de Caune y el Parrón. Drena finalmente en el estero Nilahue, ubicado en la zona costera de la localidad de Cáhuil, a unos 10 km al sur de Pichilemu. A lo largo del curso de este estero se presenta una dirección sur a norte casi en la totalidad de su recorrido (DGA 2014). La extensión total de la cuenca hidrográfica abarca un área de 1776 km² (Ibarra, 2013), con una longitud del cauce principal de 115 km. Esta cuenca hidrográfica posee un régimen hidrológico completamente pluvial, debido que no existen aportes provenientes de la nieve.

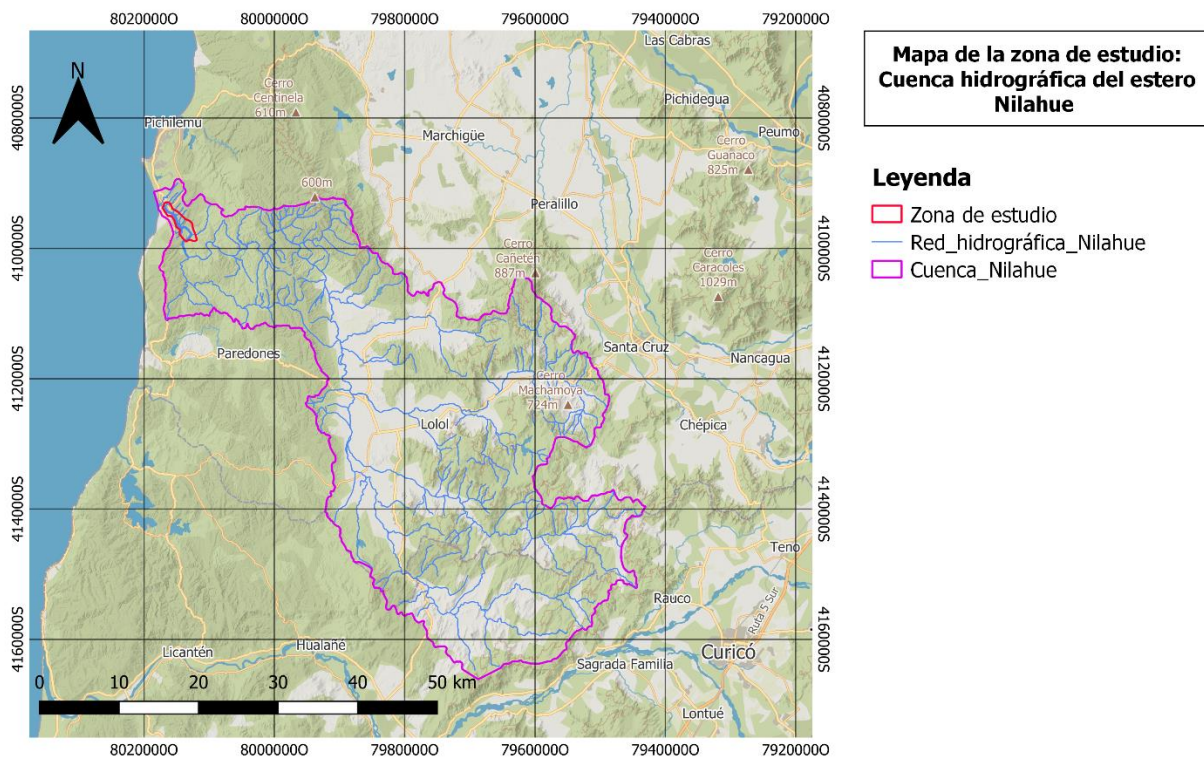


Figura 3: Mapa de la cuenca hidrográfica del estero Nilahue con su respectiva red hidrográfica.

2.4. Marco geológico

La geología de la zona de estudio se caracteriza por la presencia del complejo metamórfico de Pichilemu del Paleozoico tardío, cuerpos intrusivos, depósitos marinos y continentales del Neógeno (Farias et al., 2011). En la Figura 4 se puede observar el mapa

geológico de la zona de estudio que está basado principalmente en la carta geológica de Chile 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2002).

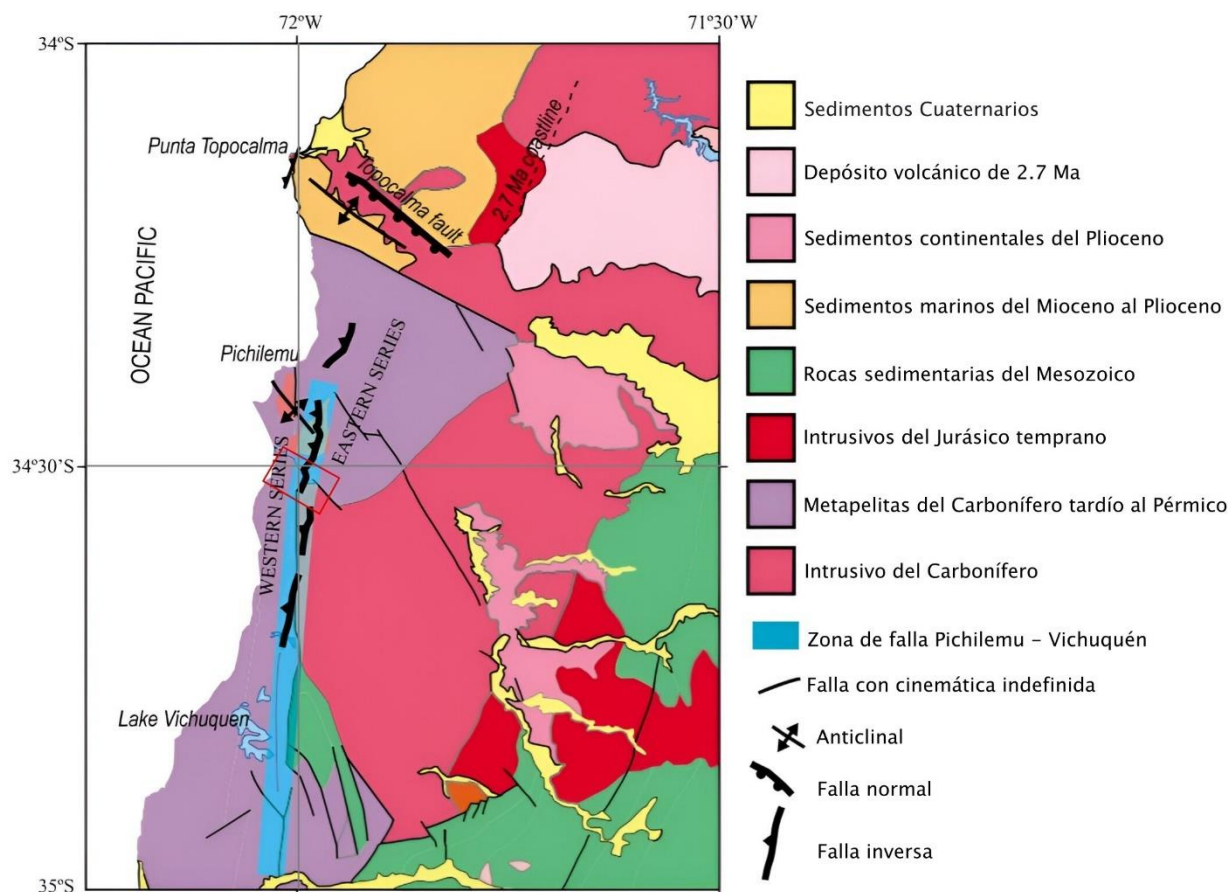


Figura 4: Mapa geológico de la zona de Pichilemu, en el rectángulo rojo se puede apreciar la zona de estudio, Modificado de Farias et al., (2011).

Con respecto a las unidades presentes dentro del área de estudio nos encontramos con rocas metamórficas pertenecientes a las metapelitas del carbonífero tardío al Pérmico, compuesta por metareniscas, pizarras, filitas, esquistos, gneisses y anfibolitas, de edad Paleozoica (Silúrico–Carbonífero) (Tapia, 2018). También aparecen rocas plutónicas e hipabisales pertenecientes a los intrusivos del Carbonífero, compuestas principalmente por granitos, granodioritas tonalitas y dioritas de hornblenda, biotita y moscovita (SERNAGEOMIN, 2003).

2.5. Marco geomorfológico

Desde una perspectiva geomorfológica la zona de estudio presenta diversas formas, siendo las principales las de origen marino, en la que predominan terrazas de abrasión marina. En el curso inferior del estero Nilahue se desarrolla en un estrecho valle fluviomarino profundamente disectado (Ibarra, 2013). En esta área se encuentran las siguientes formas presentes en la Figura 5:

- **Terrazas de abrasión marina altas:** Terrazas compuestas principalmente por esquistos del basamento metamórfico y algunos depósitos sedimentarios.
- **Llanuras aluviales:** Llanuras están compuestas en su mayoría por sedimentos finos, limos y arcillas, derivados de materiales coluviales.
- **Terraza estuarial:** Depósitos sedimentarios en zonas de transición entre el agua de río y agua salada.
- **Salinas de Cáhuil:** Depósitos a las riberas del río en donde las intrusiones marinas se acumulan, donde posteriormente se extrae la sal.

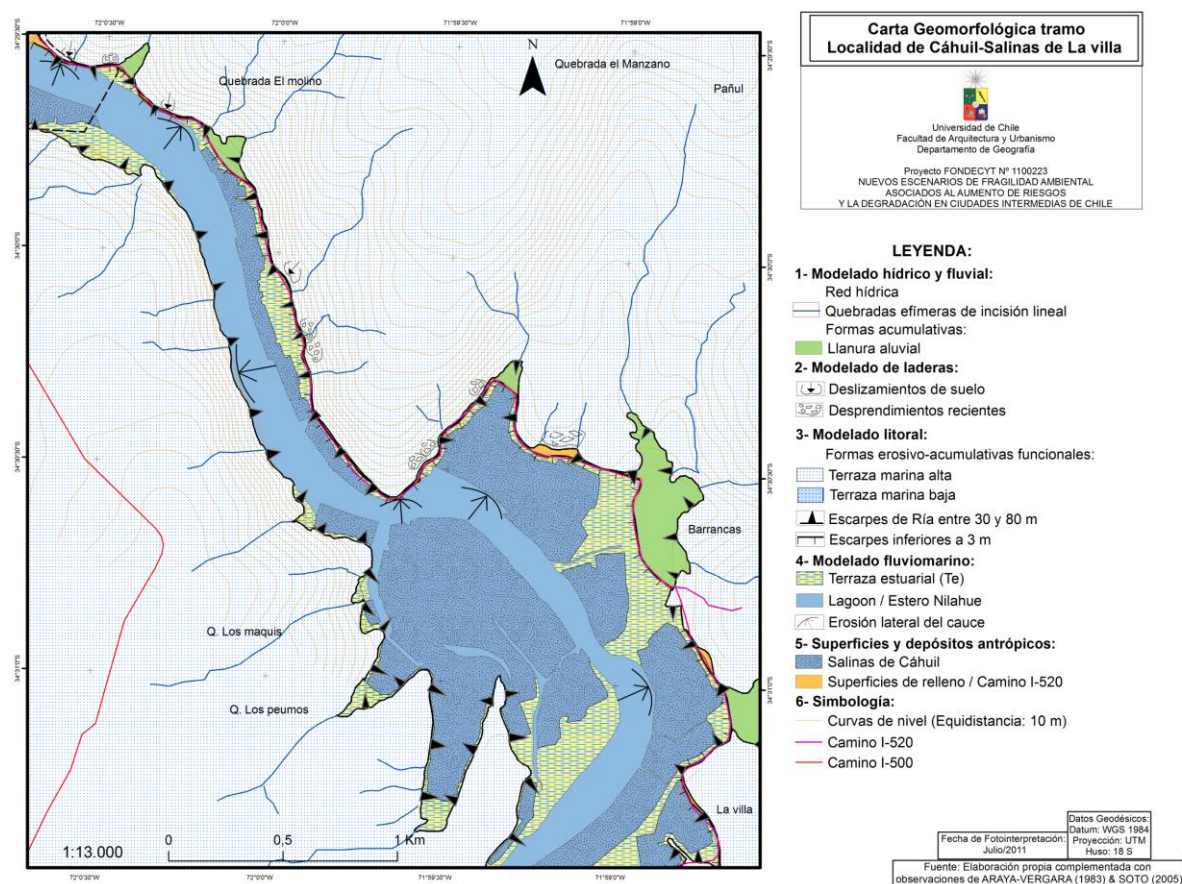


Figura 5: Carta geomorfológica de la zona de estudio. Extraída de Ibarra (2013).

3. Metodología

Con el objetivo de analizar el proceso de las inundaciones causadas por desbordes fluviales, la metodología seguida en este trabajo abarca tres etapas principales. Estas etapas se centran en: (1) la recopilación y actualización de los últimos eventos fluviales en la zona en los últimos 45 años y una fotointerpretación de estos, (2) la creación de una modelación hidráulica con distintos periodos de retorno y (3) una campaña de difusión y comunicación destinada a bajar la información obtenida a los residentes de la zona con el propósito de dar a conocer sobre los impactos generados por las inundaciones.

3.1. Recopilación y actualización de los eventos fluviales en la zona.

Para la generación de un catastro de eventos de inundaciones en la zona, se consultó en diversas plataformas, con el fin de obtener registros que mencionen sucesos ocurridos históricamente. Parte de esto se llevó a cabo con una búsqueda en repositorios de

universidades, sitios gubernamentales, medios de comunicación, revistas científicas, organismos encargados de gestión de emergencias y plataformas en línea de información hidrometeorológica.

Por otro lado, para la recopilación de los eventos fluviales más recientes se consultaron diversas plataformas que monitorean en línea los registros hidrometeorológicos de distintas estaciones del país, tales como:

- Explorador climático (CR)²: Que contiene una base de datos meteorológicos, la cual permite realizar cálculos y estadísticas simples en series de tiempo. Los registros en esta página contemplan datos de temperatura, precipitación y caudal.
- CAMELS: Esta plataforma integra información física e hidrometeorológica de las cuencas de Chile, obteniendo datos de las estaciones fluviométricas, incluyendo datos de caudales, escorrentía, entre otros fundamentales para la modelación hidráulica.
- Mawün: Plataforma dedicada a explorar distintas estimaciones espacialmente distribuidas de precipitación.
- VISMET: Sistema de despliegue de datos meteorológicos actuales e históricos (precipitación y temperatura del aire), registrados por las estaciones operadas por la Dirección Meteorológica de Chile, la Dirección General de Aguas y la Red Agroclimática Nacional.
- Servicio Hidrométrico en línea: Plataforma que cuenta con datos en línea que mide parámetros fluviométricos de caudal, nivel del agua y temperatura, junto a datos meteorológicos de precipitación y humedad del aire de distintas estaciones.

En cuanto a la recopilación histórica de los datos se recurrió a los datos obtenidos por Ibarra (2013), específicamente a los relacionados con inundaciones originadas por desborde fluvial, localizadas entre el pueblo de Cáhuil y el sector de las salinas de La Villa. Dicha lista abarca desde el año 1978 al 2010, cabe destacar que estas áreas pudieron ser inferidas dada la alta humedad del suelo que hay en forma lateral al estero (ver Anexos 1 y 2).

Finalmente con los resultados de este paso se generó una fotointerpretación de los eventos históricos ocurridos en la zona, destacando los puntos más lejanos donde logro llegar la inundación.

3.2. Modelación hidráulica

Para la modelación hidráulica se utilizaron los softwares libres QGIS y HEC-RAS. El primero es un programa de Sistema de Información Geográfica (SIG) que permite la creación, gestión, edición y análisis de datos o mapas con diversas capas de distintos formatos. El segundo software HEC-RAS es un programa que permite realizar sistemas hidráulicos de flujo constante unidimensionales, permitiendo calcular perfiles de la superficie del agua para un flujo constante y gradualmente variado. El sistema puede manejar una red completa de canales, un sistema dendrítico o un solo tramo de río. El componente de flujo constante es capaz de modelar perfiles de superficie de agua de régimen de flujo subcrítico, supercrítico o mixto (HEC-RAS, 2023). El procedimiento computacional básico se basa en la solución de la ecuación de energía unidimensional. Las pérdidas de energía se evalúan mediante la fricción (ecuación de Manning).

El sistema de flujo constante está diseñado para su aplicación en el manejo de llanuras aluviales y estudios de inundaciones, lo que permite hacer un análisis y modelado de flujo de aguas en ríos, canales y esteros, pudiendo evaluar el comportamiento del agua a lo largo del río y así estimar las áreas que pueden verse afectadas por inundaciones. Dicha modelación se ha realizado en 1D con un flujo permanente utilizando datos de caudales de crecidas y perfiles topobatimétricos.

En la modelación hidráulica 1D se asume que una de las dimensiones prevalece sobre las otras dos. En el caso del cauce de un río o canal seria la longitud. De tal modo que, al introducir la información, se asignan características por secciones. Los resultados de esta simulación darán una altura del perfil del agua y velocidad por sección. Estos resultados estarán en función de los caudales máximos instantáneos, para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años, esto con el objetivo de que al considerar periodos de retorno más pequeños, como es el caso de entre 2 a 10 años permiten evaluar eventos de inundaciones que sean más

frecuentes y ayudar a comprender los riesgos a corto plazo. Por otra parte los eventos con periodos de retorno más grandes que son el caso de 50 y 100 años permiten evaluar eventos más extremos y menos frecuentes, cruciales para proyectos a largo plazo.

3.2.1. Bases de la modelación en QGIS

Para las bases de la modelación se utilizó el programa QGIS. Se consideró el sistema de referencias de coordenadas WGS 84 / UTM zone 19S / EPSG:32719 y medidas en el Sistema Internacional (SI). Se ocuparon tres elementos fundamentales como la base de la modelación hidráulica:

1. Imagen georreferenciada del área de estudio: se emplea una imagen obtenida a través de Google Earth en la máxima resolución (8192x4968 px), que posteriormente es georreferenciada en QGIS. Esta imagen sirvió como guía para demarcar el contorno del estero Nilahue.
2. Archivo shape del área de estudio: se realizó un archivo shape en forma de polígono que delimita toda la zona de estudio a evaluar.
3. Archivo shape de curvas de nivel: se generó un archivo shape de líneas de curvas de nivel a 2m en el área de estudio, a través de las opciones de Ráster → Extracción → Curvas de nivel, usando como base un remuestreo del Modelo Digital de Elevación (DEM) SRTM a resolución 5m x 5m del área de estudio, obtenido a través de la plataforma QGIS, cabe destacar que estas curvas de nivel fueron modificadas con la herramienta de vértices propia de QGIS, con el fin de eliminar elevaciones erróneas/montículos que existían en el DEM.

Con esta información geoespacial se realizó una interpolación para generar un nuevo DEM de trabajo con la herramienta → Interpolación TIN, donde se ingresan los datos de las curvas de nivel de 2 m junto con el polígono de la zona de estudio. El resultado fue un DEM interpolado de resolución 2m x 2m. La elección de esta resolución se basó en el tamaño del área a trabajar, que abarca 7.5 km² y posee cambios bruscos de elevación, zonas habitadas e

infraestructuras. La resolución más alta proporciona una representación más precisa del terreno y por ende una modelación más exacta en la identificación de las zonas de peligro.

Con el DEM generado se procedió a trabajar con el complemento RiverGIS, donde se creó un nuevo esquema de trabajo a través de la opción → Create New Schema, lo que permitió trabajar con las herramientas del programa, luego se utilizó la herramienta → Create River Database Tables, la cual generó una base de datos la que almacena las principales propiedades del estero a trabajar:

- StreamCenterlines: polilínea la cual indica el eje principal del estero la cual se trazó desde aguas arriba hacia aguas abajo, tomando de base la imagen georreferenciada.
- BankLines: polilínea que indica los márgenes/riberas del estero, desde aguas arriba hacia aguas abajo.
- Flowpaths: polilínea que indica las líneas de flujo en el cual se indican la posible llanura de inundación, tanto del margen izquierdo y el derecho.
- XSCutLines: polilínea que indica los cortes del estero para la posterior generación de perfiles del río, estas fueron trazadas de izquierda a derecha.

Cabe destacar que la realización de estos datos se demarca a mano, con el fin de abarcar el área de interés, la base de datos con estas geometrías se puede apreciar en la siguiente Figura:

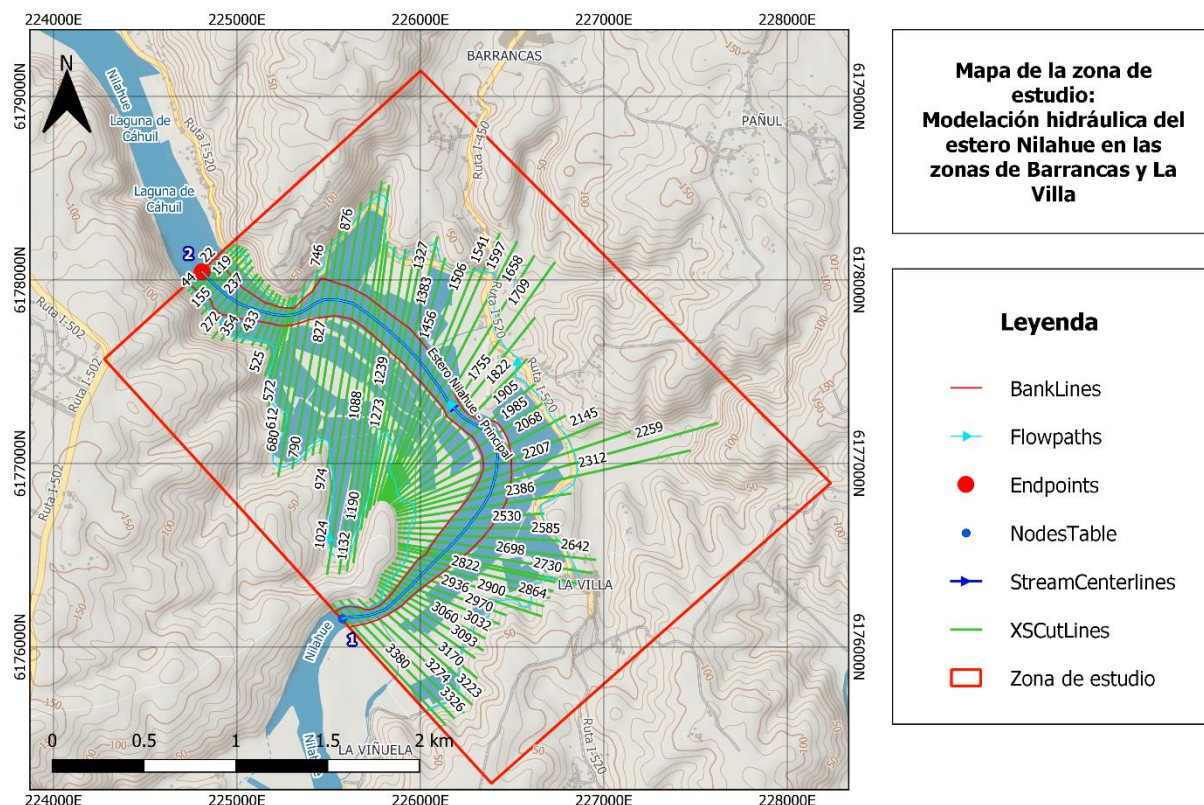


Figura 6: Mapa de la zona de estudio, durante el proceso de la modelación hidráulica del estero Nilahue en las zonas de Barrancas y La Villa. En la imagen

Con los resultados obtenidos de la geometría del modelo se procedió a obtener las propiedades de los largos y las elevaciones de las líneas de flujo (Flowpaths) y líneas de corte (XSCutLines), esto se hizo a través del complemento RiverGIS, donde en la pestaña de herramientas se seleccionó RAS Geometry → Stream Centerline Attributes → All (Topology- Lengths/Stations) lo que generó dos puntos correspondientes al inicio y al final del tramo del estero, que se pueden observar en la Figura 6, donde el punto 1 (NodesTable) indica el comienzo del cauce a evaluar y el punto 2 (EndPoints) el fin del mismo. Por otro lado para la obtención de los atributos de las líneas de corte del estero (XSCutLines) se utilizó la herramienta → XS Cut Line Attributes → All, ubicada en la misma pestaña RAS Geometry. Esta herramienta junto al DEM interpolado de 2m x 2m permite obtener las elevaciones y los largos de las secciones transversales que se trabajan posteriormente en el software HEC-RAS. Como

se aprecia en la Figura 6 las líneas verdes corresponden a estas secciones de corte del estero y los valores que aparecen encima de estas son la distancia en metros desde el final del cauce.

Finalizado el paso anterior, se realizó la exportación de los resultados; dentro de RiverGIS en RAS Geometry → Create RAS GIS Import File, esta herramienta creo el archivo .sdf para su posterior uso en el programa HEC-RAS.

3.2.2. Asignación de datos de geometría y flujos en HEC-RAS

Dentro de HEC-RAS se generó un nuevo proyecto, donde se utilizó el sistema internacional métrico (SI) para trabajar los resultados obtenidos en el paso anterior, luego se importó la geometría resultante del paso anterior a través de Edit → Geometry Data → File → Import Geometry Data → GIS Format y se seleccionó el archivo .sdf obtenido de QGIS a través de RiverGIS. Acá se visualizó la geometría del estero, con los segmentos del estero (XSCutLines) y los puntos que indican las riberas de este (Bank Lines) como se observa en la Figura:

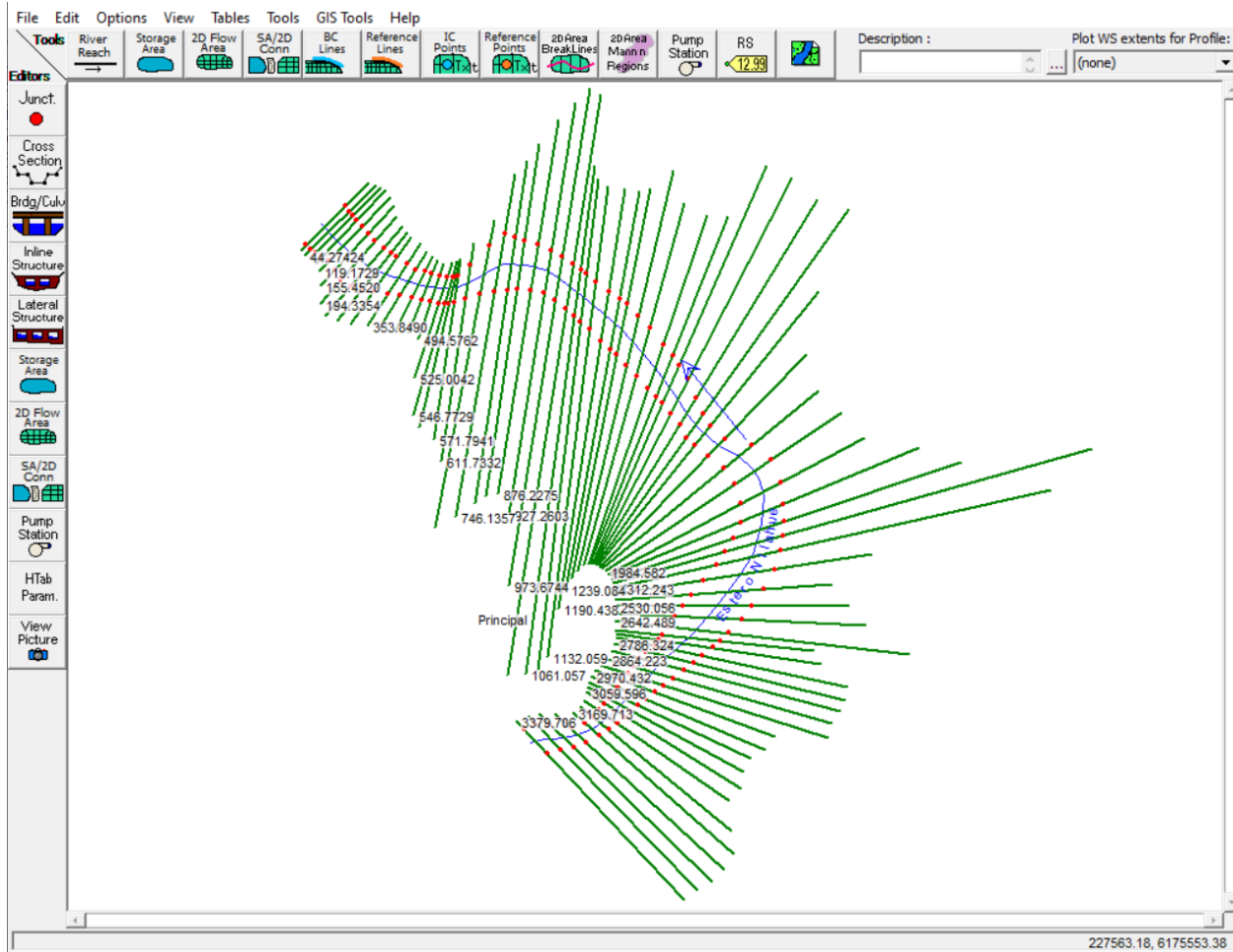


Figura 7: Geometría de la modelación del estero Nilahue dentro del programa HEC-RAS, donde se observa en azul el eje principal del estero, en verde las secciones del estero y en rojo las riberas del estero en cuestión.

Posterior a esto se filtraron los datos de las secciones, debido a que los perfiles más largos sobrepasan la cantidad máxima de puntos de elevación permitidas por el programa HEC-RAS, que son de 500 puntos, por lo que se utilizó la herramienta → Cross Section Point Filter, la cual permite filtrar los puntos innecesarios entre elevaciones, bajando este número a un valor menor de 500.

Con las secciones del estero definidas se asignó un coeficiente de rugosidad de Manning a todos los tramos del estero, para esto se revisó el manual HEC-RAS Hydraulic Reference Manual (2023), donde en tipo de canal se asignó a un arroyo natural, del tipo canal principal, con características de limpio, sinuoso, algunos charcos y bajíos, con algunas malas hierbas y

piedras, lo que entrega valores de Manning de 0.035 mínimo y 0.05 máximo. Valores que se respaldan con fotografías del sector.



Figura 8: Fotografía aérea del sector Salinas de Barrancas, acá se puede apreciar el canal principal, con características de sinuosidad, con algunos bajíos. Fotografía tomada por Alberto Marcías, extraída de la raíz al plato (2021).

Estos valores de coeficiente de rugosidad de Manning se establecieron a lo largo de todo el tramo a evaluar, mediante la herramienta → Manning's n Values, otorgando un valor de 0.035 al centro del cauce y de 0.05 para las riberas derecha e izquierda.

Finalizado el paso anterior se procedió a asignar las condiciones de flujo del estero Nilahue, a través de Edit → Steady Flow Data. Acá se consideró evaluarlo en periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años, se generaron 6 perfiles, cada uno correspondiente a un periodo de retorno, a los que se les asignó las condiciones de borde correspondientes con la herramienta → Reach Boundary Conditions, esta permitió asignarles a los 6 perfiles las

condiciones de profundidad, que para este caso se estableció en profundidad normal (Normal Depth) que permite fijar una pendiente a lo largo del tramo a trabajar, en este caso ese valor fue de 0.002 tanto para aguas arriba (Upstream), como para aguas abajo (Downstream).

El siguiente paso de las condiciones de flujo fue asignar los caudales correspondientes a los periodos de retornos elegidos. Para ello se deben obtener los valores de caudales instantáneos máximos asociados a los periodos de retorno. Una de las formas de obtener estos valores fue con el programa HEC-SSP el cual se aplica para estudios de crecidas en cuencas con control fluviométrico como es el caso de la cuenca de estudio.

3.2.2.1. Métodos de estimación de caudales HEC-SSP

La aplicación de este método aplica para estudios de crecida en cuencas con control fluviométrico, el cual en base a los datos históricos de caudales los analiza y aplica técnicas estadísticas para proyectar los caudales correspondientes a diversos periodos de retorno.

En este caso la cuenca de estudio posee la estación fluviométrica Nilahue – Santa Teresa de la DGA, que registra medidas de caudal y de altura del estero Nilahue. Para este paso se descargó la información histórica de la estación desde CAMELS, que contiene los valores de caudales máximos diarios y anuales durante el periodo de registro que va de 1985–2019, los que se usaron para aplicar este método. El siguiente paso fue identificar el tipo de régimen hidrológico de la cuenca a tratar, que para este caso fue un régimen completamente pluvial, debido a que no existen aportes de nieve en la cuenca o son ínfimos.

Ya en HEC-SSP se creó un nuevo proyecto donde se buscó generar un análisis de frecuencia. Para esto se generó un nuevo proyecto y se importaron los datos obtenidos de CAMELS a través de → Data → New → Tradicional Import, acá se cargó la serie de caudales medios máximos diarios a través de → "Import to Study DSS file".

Posterior a esto se abre la tabla de datos y se hace clic en plot, lo que muestra la gráfica de los datos de caudales medios máximos diarios a lo largo del registro histórico. Para visualizar, inspeccionar y seleccionar una combinación de distribución de método de ajuste se abre el editor de análisis, y se seleccionó New → Distribution Fitting Analysis y se agregaron los

datos de caudales. Luego en la misma ventana se selecciona la pestaña Analysis, donde se seleccionó:

- El botón de mostrar todas las distribuciones (Display All Distributions) en el panel Filtro de distribución (Distribution Filter).
- En el panel Métodos de ajuste de distribuciones (Distribution Fitting Methods) se seleccionó Momentos L (L-Moments, LM).
- Se seleccionó el estadístico de prueba Kolmogorov-Smirnov en el panel Prueba de bondad de ajuste (Goodnes of fit test).
- En la lista de distribuciones disponibles se seleccionó la distribución Gamma (LM), correspondiente al método de ajuste utilizado.

La elección de la Distribución Gamma (LM) utilizando L-Momentos (LM) resulto ser la representación más precisa y adecuada para los datos analizados, al seleccionarla los límites de confianza y una curva de probabilidad esperada se calculan automáticamente. Finalmente el método de ajuste de la distribución aceptada se visualiza en la pestaña Resultados, donde se observa el grafico de la distribución elegida y la estimación de los caudales asociados a los distintos periodos de retorno.

Con los resultados obtenidos del paso anterior se procedió a multiplicarlo por 2 factores, para obtener valores que sean más precisos. El primero de estos es un factor de transposición de área, debido que los datos obtenidos de CAMELS representan solo una parte de la cuenca del estero Nilahue, específicamente contemplan un área de 1454 km², siendo la cuenca completa del estero Nilahue de 1776 km², por ende la transposición por área queda así:

$$\text{Factor 1} = \text{Área cuenca Nilahue} / \text{Área cuenca CAMELS} = 1776 \text{ km}^2 / 1454 \text{ km}^2 = 1.221$$

El segundo Factor a considerar es el de conversión de los caudal medios máximo diarios asociados a los periodos de retorno (que son los valores obtenidos con el método HEC-SSP) a caudales instantáneos máximos, esto ya que los valores de caudales que se deben ingresar al programa HEC-RAS corresponden a los de caudal instantáneo máximo. Para obtener dicho factor se recurrió al manual de la DGA (1995), en donde tenemos que definir la zona

homogénea de la cuenca en función de La ubicación/latitud, que para este caso se encuentra entre las latitudes 32°S y 35°S, específicamente en la latitud 34°S (ver Anexo 3). Las precipitaciones medias anuales (Pma) son de 707.27 mm según el registro de precipitaciones (1979 – 2019) de la plataforma CAMELS (precip_cr2met_day). Además la estación está ubicada a 61m.s.n.m. por ende según la tabla 3.24 de la DGA (1995), la zona homogénea correspondiente es Mp, dando un Factor 2= 1.48 (ver Anexo 4). Con los resultados de ambos factores se procedió a multiplicarlos para conseguir los caudales máximos instantáneos de la cuenca del estero Nilahue.

Finalmente, con los resultados de los caudales máximos instantáneos se procedió a ingresarlos a los valores de caudal para los 6 perfiles de periodo de retorno establecidos en el paso anterior y así obtener las condiciones de flujo del estero Nilahue.

3.2.3. Simulación hidráulica

Con los datos de la geometría y las condiciones de flujo ingresados, el último paso fue agregar el plan a través de la pestaña Run → Steady Flow Analysis, en las opciones para el régimen de flujo se asignó como mixto para tener flujos subcríticos como supercríticos y se procedió a correr el modelo para los seis periodos de retorno.

Para la obtención de los resultados de la modelación hidráulica se procedió a abrir la herramienta → RAS Mapper la que genero un visualizador de los resultados obtenidos en el paso anterior, acá se seleccionó la geometría, la que cargo el eje principal, las riberas y las secciones del estero. Luego para visualizar los datos se asigna una proyección agregando un archivo que contenga la proyección WGS 84 19S trabajada en el proyecto. Posteriormente en el apartado de Terrains en las opciones se seleccionó → Create a New RAS Terrain, la que agrega el DEM interpolado de 2m x 2m utilizado a lo largo del proyecto.

Finalmente para descargar los resultados de las modelaciones en los distintos periodos de retorno asignados se seleccionó → Project → Manage Results Maps → Add New Map y se generaron todos los mapas de profundidad (Depth) para 2, 5 , 10, 20, 50 ,100 años, finalmente

se computa con la opción → Compute/Update Stored Maps, lo que entrego los mapas de peligro para los distintos periodos de retorno en formato .tif, los que son transformados a formato .shp, mediante la herramienta → poligonizar en QGIS.

3.3. Difusión y comunicación de los peligros asociados a las inundaciones

Los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología anteriormente descrita fueron adaptados a un lenguaje sencillo para generar una presentación a la comunidad, con el fin de mostrar las zonas con mayor peligro a sufrir inundaciones por desborde fluvial, esto enmarcado dentro del proyecto FIC de “Transferencia de energías renovables para la producción de sal en Cahuil.

Dicha presentación cuenta con la información necesaria para dar un pequeño contexto geológico y geomorfológico de la zona, además de incluir los mapas de peligros de inundación resultantes.

4. Resultados

4.1. Recopilación de registros históricos de inundaciones por desborde fluvial

- 1) Año 1978: Se registran trece sectores con suelos húmedos, entre las más destacables son pasando la localidad de Barrancas, cercano a la ruta I-520, se aprecian 2 marcas oscuras, y la otra en la curva cerrada antes de llegar a la localidad de Barrancas, evidencias de inundaciones que lograron alcanzar dichas zonas (Ibarra, 2013) (Anexo 1).
- 2) Año 1994: Aunque no son tan claras, se identifican estrechas franjas en la ribera norte y sur del estero Nilahue (Ibarra, 2013) (Anexo 1).
- 3) Año 2004: Se identifican 2 sectores, que presentan la condición de suelos húmedos, en el sector Oeste del estero, antes de llegar al poblado de Barrancas (Ibarra, 2013) (Anexo 2).
- 4) Año 2007: Se identificó 3 sectores con la condición de suelos húmedos, en los mismos sectores asociados al año 2004 y parte del sector Suroeste de la zona (Ibarra, 2013) (Anexo 2).

- 5) Año 2010: Acá se aprecian más sectores reconocibles, en donde se identificó dieciséis zonas con suelos húmedos, destacando que varias se encuentran cercanas a la ruta I-520, y parte de la zona Oeste del poblado de La Villa (Ibarra, 2013) (Anexo 2).
- 6) Año 2012: En este año también se destaca una inundación por desborde fluvial originada durante un temporal el 26 de Mayo, de la cual se tiene registro fotográfico, donde destaca por un avance lateral aproximado de 138 metros (Ibarra, 2013) (Anexo 5).
- 7) Año 2020: Se tiene evidencia de una inundación durante el año 2020 la cual afecto a sectores de Cáhul y Barrancas, inundando calles y casas en la zona (Anexo 6).
- 8) Año 2023: Ocurrencia de un evento de inundación ocurrido entre el 18-22 de Agosto del presente año 2023. Los primeros datos de este evento se obtuvieron a través de la plataforma VisMet, donde se pueden ver valores de las estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca del estero Nilahue, las cuales registran precipitaciones acumuladas de 172.6 mm en la estación Nilahue – La Quebrada como se ve en la Figura 9. Parte de la evidencia de estos eventos se encuentran en Anexos 7-10.

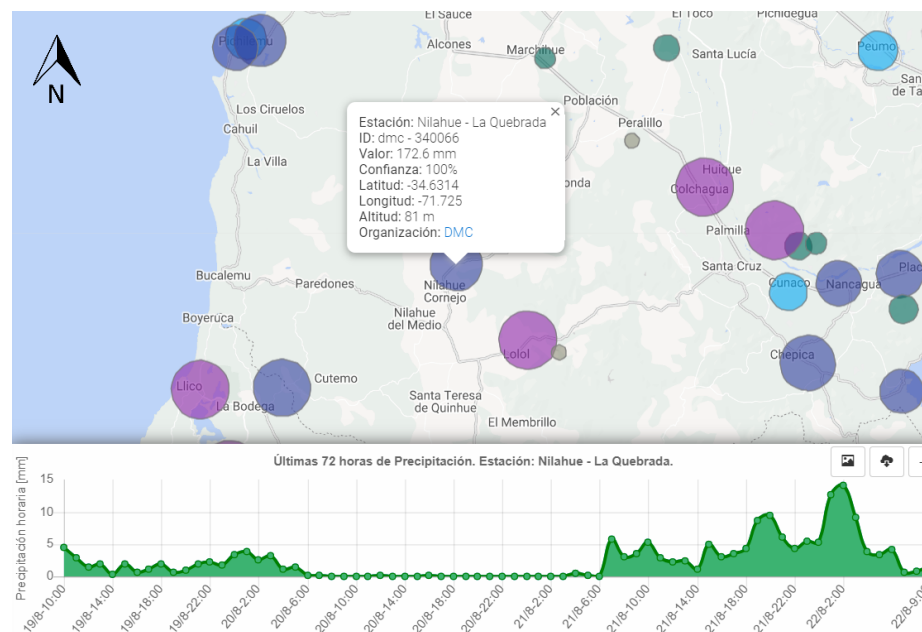


Figura 9: Precipitaciones acumuladas durante 72 horas durante el evento del 18-22 de Agosto del 2023 en la Estación Nilahue – La Quebrada. Acá los círculos de colores morados indican las zonas con valores más altos de precipitación, que luego decaen a azul, celeste y verde, de igual

manera el tamaño de estos da a entender la cantidad de precipitación, tamaños pequeños indican menores valores y viceversa. Imagen extraída de la plataforma VisMet.

Por otra parte en la estación Lolol para este mismo evento registro una precipitación acumulada de 227.6 mm como se ve en la Figura 10.

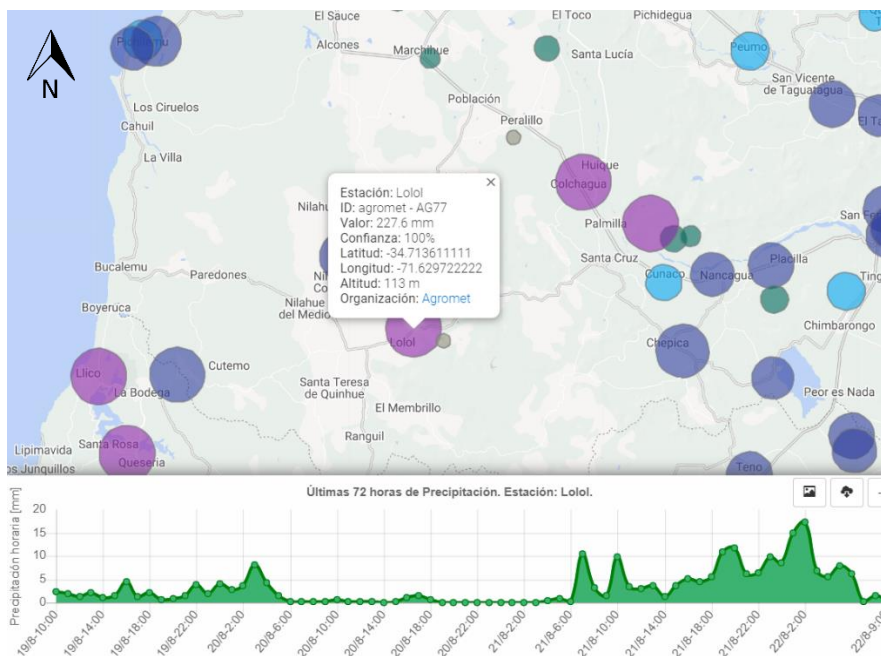


Figura 10: Precipitaciones acumuladas durante 72 horas durante el evento del 18–22 de Agosto del 2023 en la Estación Lolol. Acá los círculos de colores morados indican las zonas con valores más altos de precipitación, que luego decaen a azul, celeste y verde, de igual manera el tamaño de estos da a entender la cantidad de precipitación, tamaños pequeños indican menores valores y viceversa. Imagen extraída de la plataforma VisMet.

Posteriormente se consultó la plataforma de sistema hidrométrico en línea de la DGA, donde se analizaron los datos de la estación fluviométrica Nilahue – Santa Teresa para el evento del 18–22 de agosto examinando los datos de niveles de agua y caudal de dicha estación, que se observan en las Figuras 11 y 12. Resultando en valores de 5.6 metros de nivel de agua, junto a un caudal de 630.9 m³/s. Además de una precipitación instantánea de 20 mm aproximadamente en la localidad de Cahuil de en la Figura 13.

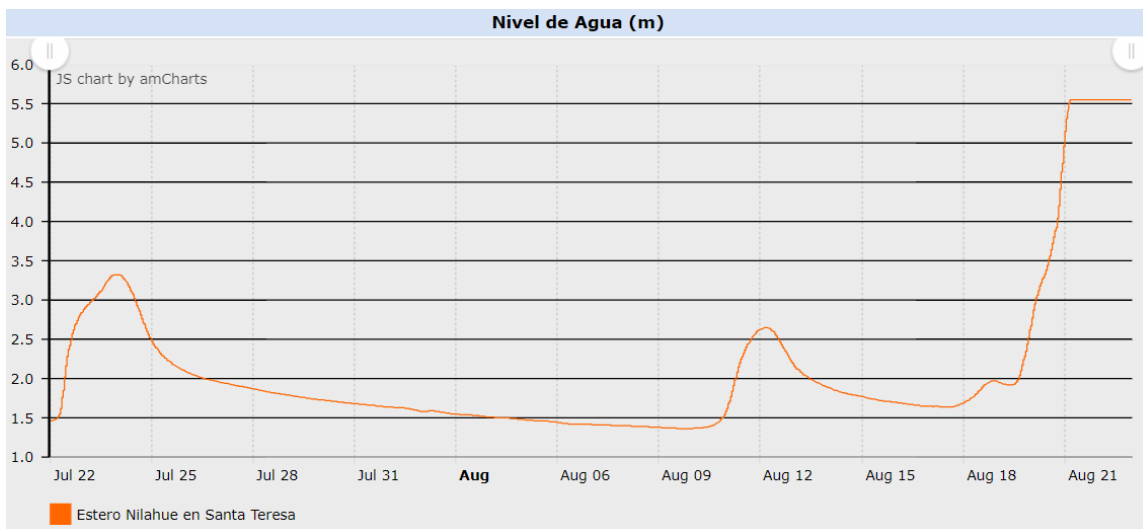


Figura 11: Valores de niveles de agua en metros del estero Nilahue en la estación Santa Teresa para el evento del 18-22 de Agosto del 2023. Imagen extraída de la plataforma DGA estaciones en línea.

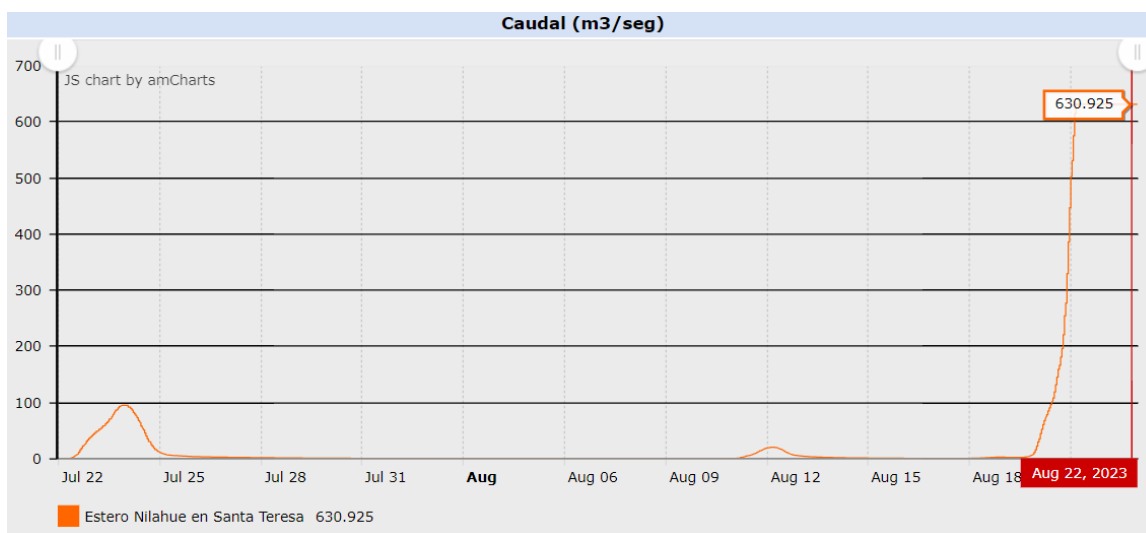


Figura 12: Valores de caudal (m³/seg) del estero Nilahue en la estación Santa Teresa durante el evento del 18-22 de Agosto del 2023. Imagen extraída de la plataforma DGA estaciones en línea.

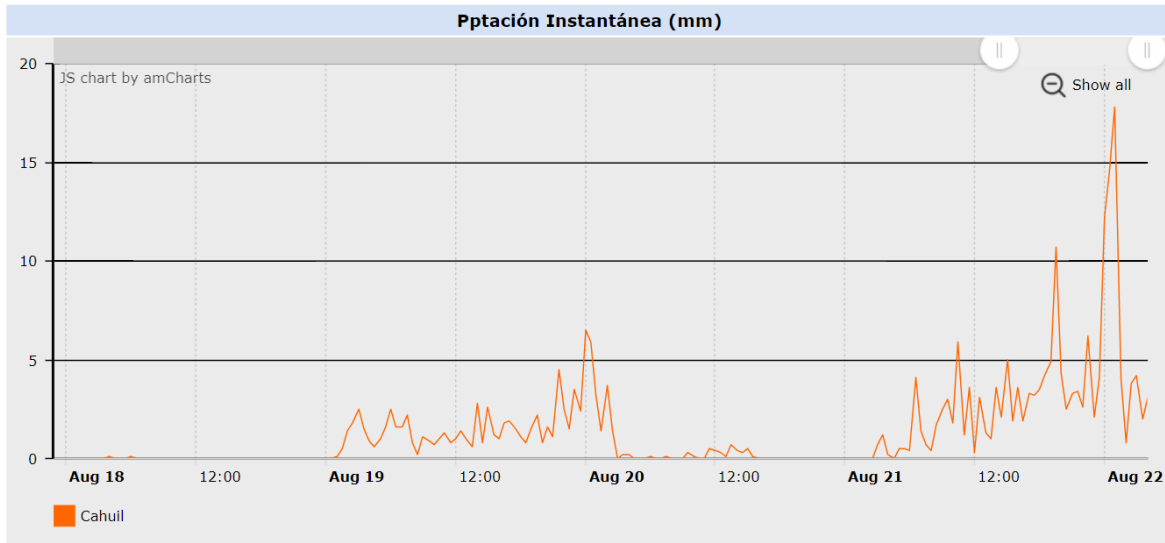


Figura 13: Valores de la precipitación instantánea (mm) captados en la estación Cahuil durante el evento del 18 – 22 de Agosto de 2023. Imagen extraída de la plataforma DGA estaciones en línea.

Finalmente con la recopilación histórica de los eventos se procedió a generar una fotointerpretación de los eventos ocurridos en la zona de estudio, en la cual se observan los puntos donde ocurrieron los eventos históricos, siendo los puntos máximos donde llegaron las inundaciones por desborde fluvial en la zona como se observa en la Figura 14.

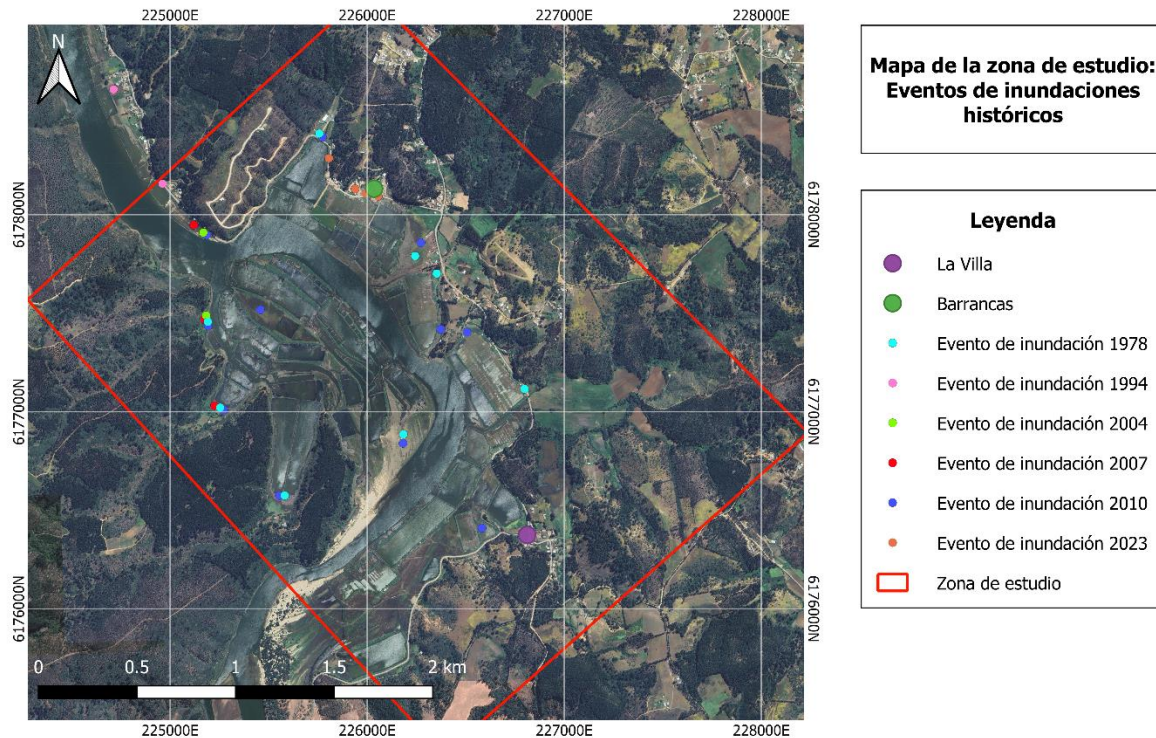


Figura 14: Mapa de los eventos de inundaciones por desborde fluvial históricas ocurridas en la zona de estudio en los últimos 45 años.

4.2. Modelación hidráulica

La base de la modelación comenzó con la generación de la geometría de la zona de estudio, que posteriormente se ingresó a HEC-RAS y se le ingresaron los datos de caudales obtenidos con el método HEC-SSP (Figura 15), que se resumen en la tabla a continuación:

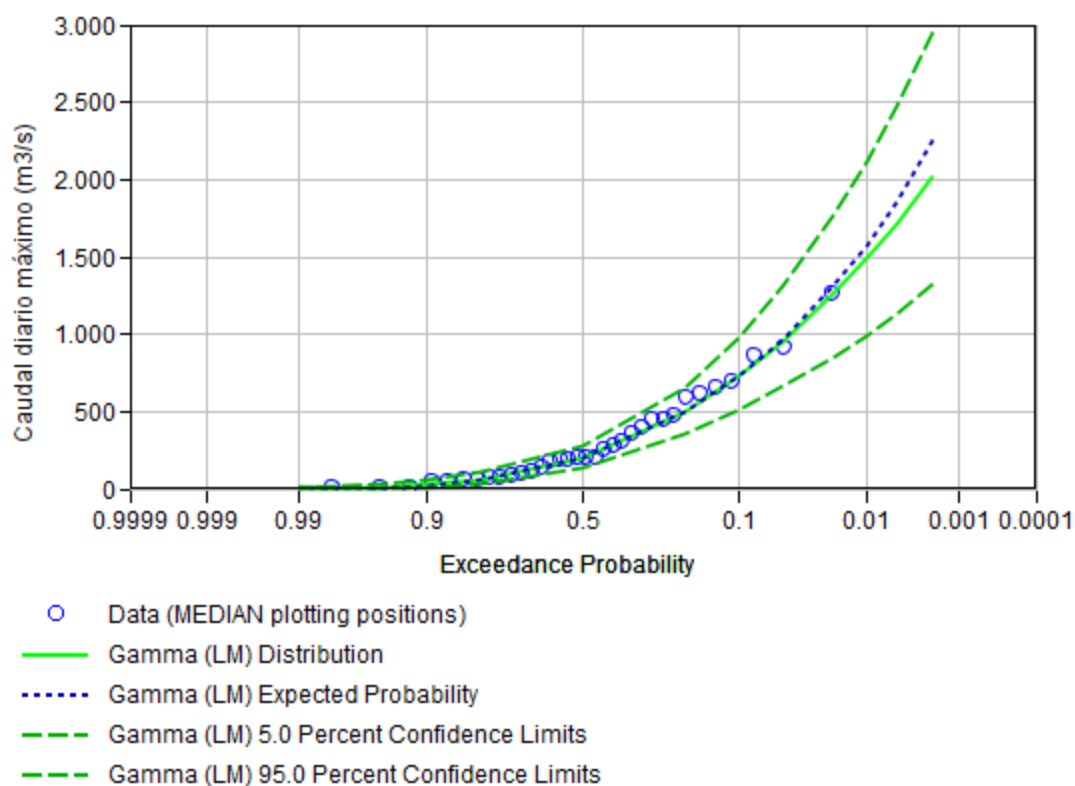


Figura 15: Gráfico de ajuste de la distribución Gamma (LM) utilizando L-Momentos (LM), obtenido a través del software HEC-SSP.

Tabla 1: Síntesis de la tabla de cálculos con el método HEC-SSP.

Periodo de retorno	Curva media	Factor de transposición por área	Factor de zona homogénea	Q
T [años]	[m³/s]			[m³/s]
2	205.6	1.221	1.48	371.68
5	499.7	1.221	1.48	903.34
10	726.2	1.221	1.48	1312.79
20	954.4	1.221	1.48	1725.32
50	1257.6	1.221	1.48	2273.44
100	1487.8	1.221	1.48	2689.58

Dichos valores de caudales son los que se ingresaron en el programa HEC-RAS con el cual se realizaron las modelaciones hidráulicas correspondientes a los periodos de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. A su vez estos periodos de retorno se clasificaron en 3 categorías, que son las que se utilizaron finalmente en el mapa de peligros por inundación:

Zonas de alto peligro: Dichas zonas están asociadas a un periodo de retorno de **10 años**, la cual permite evaluar eventos de inundaciones más frecuentes y así entender el peligro a corto plazo en la zona.

Zonas de mediano peligro: Estas zonas representan las áreas que presentan un nivel de peligro intermedio, estas se basaron en el peligro de inundación en un periodo de retorno de **50 años**.

Zonas de bajo peligro: Estas zonas representan las zonas con menor peligro de inundación a largo plazo, la cual se basa en el peligro de inundación de **100 años**.

Los que dieron como resultado el mapa de peligros de inundaciones para cada uno de estos, los cuales se detallan a continuación (Figura 16):

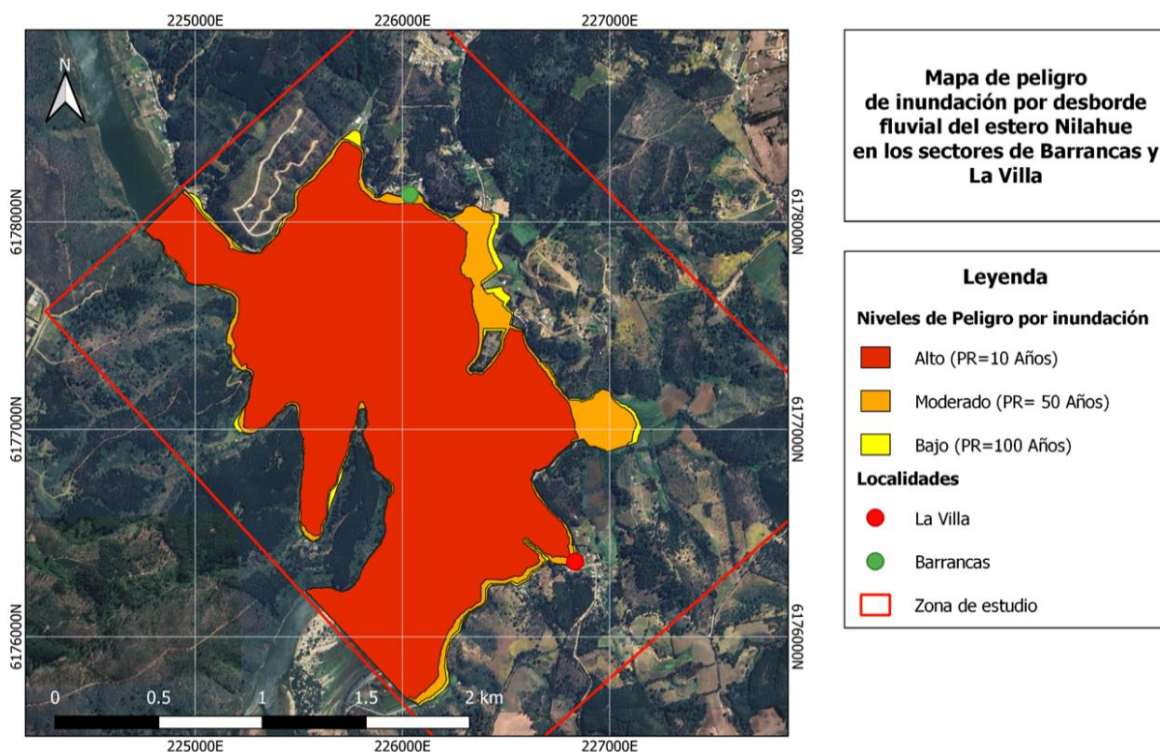


Figura 16: Mapa de peligros de inundaciones en las localidades de Barrancas y La Villa, para los distintos periodos de retorno asociados.

4.1. Resultados para la comunidad

En este apartado se generó una presentación preliminar con el cual se busca dar una bajada de los resultados obtenidos en esta investigación a la comunidad de salineros, enmarcado en el proyecto FIC de "Energías renovables para producción de sal de Cáhuil", esto con el fin de generar un taller que explique de manera más amigable y básica los procesos que ocurren en la zona donde habitan y así informar a la comunidad los peligros a los que se encuentran expuestos.



Figura 17: Presentación destinada para la difusión del contexto de la zona y los resultados del mapa de peligros de inundación.

Como este trabajo se encuentra enmarcado dentro de un proyecto FIC, se realizará una campaña a terreno con un previo acuerdo a los salineros de la zona para divulgar los resultados de este trabajo, debido a que el proyecto aún se encuentra vigente.

5. Discusión

5.1. Eventos de inundaciones

En cuanto a los registros históricos de la zona se identificaron 8 inundaciones durante los años de 1978 – 2023, dichos registros se concentran en su mayoría en el periodo de 2004, 2007, 2010 y 2012 las cuales fueron más frecuentes en este tiempo con menores años de diferencia entre un evento y otro. Cabe destacar que de estas inundaciones históricas tan solo tenemos un registro de ocurrencia, por lo que no se puede verificar los daños y pérdidas que pueden haber causado estas.

A partir de los resultados obtenidos del último evento de inundación del presente año 2023, se registraron valores de caudal de $630.9 \text{ m}^3/\text{s}$ y de nivel de agua de hasta 5.5 metros. Cabe mencionar que durante el evento meteorológico de lluvias intensas la estación fluviométrica de Nilahue–Santa Teresa experimento una interrupción en su funcionamiento producto del mismo evento, cesando la toma de datos de caudales y alturas, por lo que valores de estos datos podrían ser más altos.

Con esta información, se procedió a examinar el modelo hidráulico realizado, con el fin de asociar este evento con un periodo de retorno que se adapte a este. A partir de los resultados que se obtuvieron de caudal de $630.9 \text{ m}^3/\text{s}$ se puede considerar a un periodo de retorno entre 2 y 5 años, sin embargo, dado que este valor de caudal pudiese haber sido más alto, podría estar asociado a un periodo de retorno mayor, equivalente a 10 años.

5.2. Modelación Hidráulica

Para la selección de los periodos de retorno utilizados en la modelación, se tomaron en cuenta las características específicas de la zona de estudio, que corresponde a una llanura aluvial, también conocida como llanura de inundación. Es por esto que modelar con periodos de retorno más bajos en esta zona no mostraría diferencias significativas, ya que la zona ya está acostumbrada a ciertos niveles de inundación, influida también por las salinas existentes en la zona. Es por esto que se optó por utilizar valores más altos de periodos de retorno para

identificar el verdadero riesgo de inundaciones por desborde fluvial más allá de las áreas de las salinas.

Pasando a los resultados obtenidos de la modelación hidráulica en la zona de Barrancas y la Villa, se identificaron como áreas de alto peligro lugares que en su mayoría presentan una baja pendiente, ya que la zona de estudio está sobre una llanura aluvial o valle de inundación caracterizado por bajas pendientes y partes del río/estero con forma sinuosa, acompañado de montañas que encajonan el sector. Las zonas que se encuentran mayormente afectadas en este caso corresponden a las salinas, debido que la mayoría de estas están a las riberas del estero Nilahue tanto en el lado Oeste como Este, lo que las hace las zonas más propensas a verse afectadas por estos eventos de inundación. Para este periodo de retorno de 10 años toda el área de las salinas se ve afectadas por la crecida. Junto a esto existen zonas donde puede verse afectada la ruta I-520 que conecta las localidades del área de estudio, principalmente en el comienzo de la zona de estudio, como en la parte final antes de llegar a la localidad de La Villa. Incluso llegando en algunos sectores de La Villa a las viviendas más cercanas a las riberas del estero.

En cuanto a las zonas de mediano peligro se observa que el área inundada total crece un 11% respecto a la de alto peligro, inundando parte de las viviendas dentro del sector de Barrancas, donde se aprecia que parte del laboratorio y restaurant ubicados a los costados de la ruta I-520 son inundados. Por otro lado la localidad de la Villa también se ve afectada, debido la cantidad de viviendas afectadas es mayor, llegando inclusive a la mitad del pueblo. Además se observaron inundaciones en parte de la ruta I-450, y destacando parte de las casas que se encuentran aledañas a dicha ruta.

Finalmente para las zonas de bajo peligro, la zona de afectación crece entorno a un 14% respecto a la de alto peligro, inundando gran parte de las localidades de Barrancas y La Villa, quedando a salvo solo las infraestructuras que se encuentran a una mayor altitud, también se ve afectada gran parte de la ruta I-520 donde el sector NO se inunda totalmente. Por otro lado la ruta I-450 se ve aún más afectada, llegando la inundación a zonas de mayor pendiente.

En general la topografía es bastante relevante para este caso, ya que al tratarse de una llanura de inundación es factor que aumenta mucho el desarrollo de estos eventos.

Estos resultados son de vital importancia para los planos reguladores de la zona, ya que permiten planificar de manera correcta los sectores ideales para la construcción de viviendas, disminuyendo la exposición a inundaciones a la mayor parte de la comunidad.

5.3. Difusión y comunicación de los resultados obtenidos

La comunicación a la población de las zonas con exposición a eventos de inundaciones es muy importante, debido que al estar expuestos a la ocurrencia de estos eventos los hace vulnerables a ser afectados tanto económicamente, como socialmente. Es por esto que se busca dar la bajada de información a los residentes y la población presente en el área de estudio de los resultados obtenidos en la simulación hidráulica. Lo que permitirá que a través del proyecto FIC la comunidad entienda como puede verse afectada por estos eventos de inundaciones, ya sea a corto o largo plazo

Los resultados obtenidos permitirán a los locales comprender más el área donde viven, con los respectivos peligros asociados a los que se encuentran expuestos, dando así una idea más clara de los posibles riesgos y la importancia de la preparación ante un evento como este.

Esta difusión de los impactos hará que locales adquieran una comprensión más profunda respecto a los riesgos asociados con las inundaciones y las medidas de preparación pertinentes. Estos resultados finalmente se presentan a través de una presentación, la que define principalmente las zonas más expuestas a sufrir estos eventos, además de dar un contexto Geo patrimonial del sector.

6. Conclusiones

El estudio de los eventos históricos de inundaciones por desborde fluvial en la zona ha revelado patrones claros de las zonas de inundación más recurrentes, destacando áreas como las Salinas, la ruta I-520 y algunas viviendas en los sectores de Barrancas las más afectadas a corto plazo, mientras que a mediano y largo plazo la mayoría de las poblaciones aledañas al

estero experimentan impactos significativos. En cuanto al último evento registrado, se observa una mayor afectación en la zona este del área de estudio, siendo viviendas cercanas a la ruta I-520 del sector de Barrancas las que se ven más perjudicadas.

Los valores de caudales obtenidos mediante el método HEC-SSP muestran una aproximación conforme a los métodos empíricos propuestos por la DGA (Dirección General de Aguas), junto a esto el mapa de peligros de inundación por desborde fluvial generado se relaciona satisfactoriamente con los registros históricos en la zona de estudio.

Sin embargo, la precisión del modelo hidráulico fue limitada por el modelo de elevación digital utilizado, junto a los errores implícitos de la corrección aplicada a las curvas de nivel para la interpolación. Frente a esto se propone la realización de un levantamiento LIDAR con el fin de aumentar la precisión del modelo.

7. Recomendaciones

Dado que esta investigación se encuentra en el marco de un proyecto FIC vigente hasta el año 2025 se generaron recomendaciones que pueden ser aplicadas a futuro para la continuación de este proyecto, una de estas es la realización de un levantamiento con mayor detalle, esto debido que dada la metodología empleada para la obtención del DEM que sirvió de base para gran parte de la modelación hidráulica, se observó que se podían generar diversos resultados en función de los mismos archivos que se emplean durante este proceso, partiendo por la elección del DEM base, que para este caso se utilizó el remuestreo de SRTM a 5m. Hay otros estudios que utilizan el DEM SRTM de 30m x 30m, lo que puede generar algunas variaciones dentro del modelo. Estos cambios pueden verse reflejados a la hora de generar las curvas de nivel, las que fueron la base de la interpolación del DEM aplicado en HEC-RAS.

Continuando la misma línea, otro factor que puede haber influenciado este proceso es la interpolación de curvas de nivel en el área de estudio, para así generar un DEM interpolado, si bien no se disponía de algún DEM de mayor resolución del área de estudio, quedan pendientes

los cambios en la modelación que podría generar esto. Debido que podrían generar una modelación mucho más precisa.

Por otro lado existe la necesidad de implementar un registro de datos de eventos de inundaciones en Chile, ya que no existe ningún registro gubernamental de todos los eventos históricos de estos eventos, junto a esto se propone la idea de un monitoreo de los cauces ante posibles desbordes como una medida de mitigación.

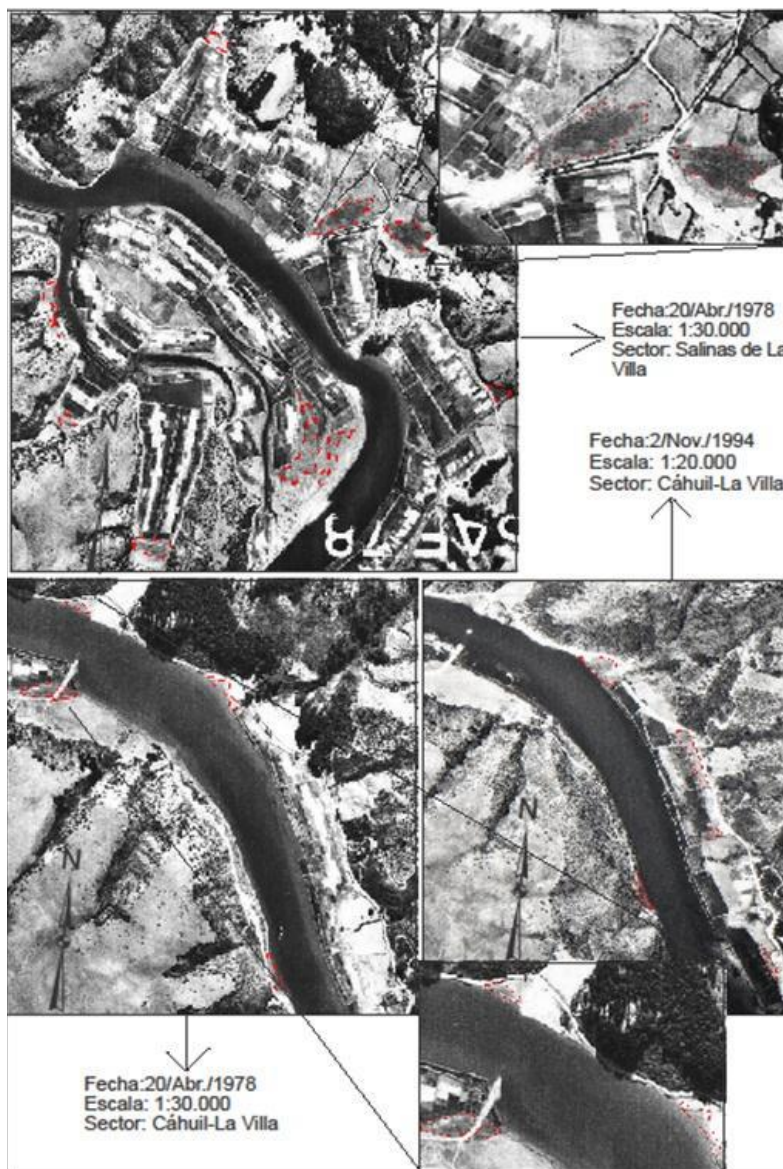
8. Referencias

- Aparicio, J. 1993. Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa. México, D.F. 303 p.
- Calle Gardella, D. (2018). Tomografía sísmica pasiva 3D de estructuras corticales en el margen costero de Chile Central: Caracterización en profundidad de la falla de Pichilemu. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168419>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). (2020, August 20). Natural disasters 2019. UN Spider. <https://www.un-spider.org/news-and-events/news/cred-publishes-2019-disaster-statistics>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). (2020, August 20). Natural disasters 2019. UN Spider. <https://www.un-spider.org/news-and-events/news/cred-publishes-2019-disaster-statistics>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). (2022, April 29). 2021 Disasters in Numbers. UN Spider. <https://www.un-spider.org/news-and-events/news/cred-publication-2021-disasters-numbers>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). (2023, March 21). 2022 Disasters in Numbers. UN Spider.
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)², CAMELS-CL explorer. Recuperado el 29 de Noviembre de 2023 de <https://camels.cr2.cl/>
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)², Explorador climático. Recuperado el 29 de Noviembre de 2023 de <https://www.cr2.cl/explorador-climatico/>
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)², Explorador de precipitaciones Mawün. Recuperado el 29 de Noviembre de 2023 de <https://www.cr2.cl/mawun-explorador-de-precipitaciones/>
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)², Visualizador Meteorológico (VISMET). Recuperado el 29 de Noviembre de 2023 de <https://www.cr2.cl/visualizador-meteorologico/>

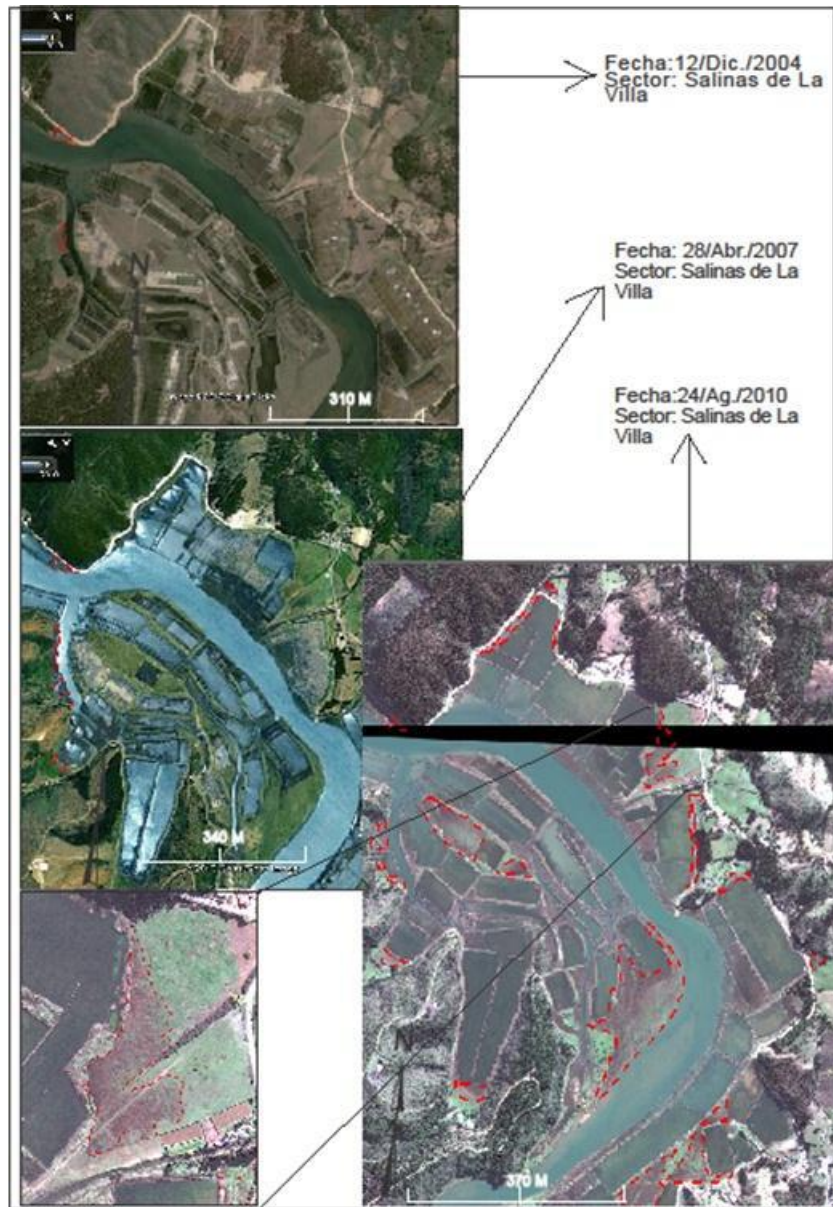
- DGA, Sistema Hidrométrico en Línea. Recuperado el 5 de
- DGA. (1995). Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica.
- DGA. (2007). Evaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero de Nilahue.
- DGA, Departamento de administración de recursos hídricos. (2005). Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la VI región.
- DGA. (1991). Precipitaciones máximas en 1, 2 y 3 días, :escala 1:500.000.
- Farías, M., Comte, D., Roecker, S., Carrizo, D., and Pardo, M. (2011), Crustal extensional faulting triggered by the 2010 Chilean earthquake: The Pichilemu Seismic Sequence, *Tectonics*, 30, TC6010, doi:10.1029/2011TC002888.
- Ferrando, F. J. (2006). Sobre inundaciones y anegamientos. *Revista de urbanismo*, (15), pág-25.
- HEC-RAS. (2023). Introduction to HEC-RAS, versión 6.3.
- HEC-RAS. (2023). Hydraulic Reference Manual V6.4, Energy Loss Coefficients, Table 3-1 Manning's n Values p.119–122.
- Hyppolito, & Juliani, Caetano & Garcia-Casco, Antonio & Meira, Vinícius & Bustamante, & F., Hervé. (2014). The nature of the Palaeozoic oceanic basin at the southwestern margin of Gondwana and implications for the origin of the Chilenia terrane (Pichilemu region, central Chile). *International Geology Review*. 56.
- Ibarra Cofré, I. (2013). Geomorfología aplicada en la evaluación y análisis de amenazas naturales en la zona sur de la Comuna de Pichilemu: sectores de Punta Lobos Cahuil Estero Nilahue VI Región Chile.
- Lorca Carrizo, J. (2013). Riesgos y desarrollo en la zona costera de la comuna de Pichilemu, VI región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/115774>
- Mardones, María, & Vidal, Claudia. (2001). La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción. *EURE* (Santiago), 27(81), 97–122. <https://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612001008100006>
- Mélice, J. L. and C. J. C. Reason (2007), "Return period of extreme rainfall at George, South Africa", *South African Journal of Science*, vol. 103, nos. 11–12, pp. 499–501.
- Niemeyer, Hans. Chile. Dirección General de Aguas. 1980. Hoyas hidrográficas de Chile. DGA. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/2348>.
- OAS. (1993) Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado.

- OLLERO, A. (1997) Crecidas e inundaciones como riesgo hidrológico un planteamiento didáctico. Lurralde inves. esp., N° 20, p. 261–283.
- Ojeda, A. O. (1997). Crecidas e inundaciones como riesgo hidrológico. Un planteamiento didáctico. Revista Lurralde Invés. Esp, 20, 261–283.
- Palagi, Sandra, Patzlaff, Jeferson, Stumpf, Marco, & Kern, Andrea. (2014). Análisis del impacto de las inundaciones en el valor de las propiedades inmobiliarias en la ciudad de Lajeado, Brasil: Estudio de caso de viviendas unifamiliares. Revista ingeniería de construcción, 29(1), 87–97.
- Palape Reyes, C. (2014). Deformación del basamento metamórfico paleozoico en la transecta Tanumé – Pichilemu, entre los 34,2° y 34,5° S, Cordillera de la costa, Chile Central. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/116874>
- PEÑA, H. Desastres de origen hidrológico. Santiago de Chile: Dirección General de Aguas, 1986.
- PLADETUR. (2021, Abril). Plan de Desarrollo Turístico de Pichilemu. Ilustre Municipalidad de Pichilemu. <https://www.pichilemu.cl/wp-content/uploads/2021/04/PLADETUR-2021-2026.pdf>
- PRC. (2014). Modificación Plan Regulador Comunal de Pichilemu.
- Proyecto GEF Humedales Costeros. (2021). Propuesta de delimitación del humedal laguna de cáhuil e identificación de áreas prioritarias a restaurar en su cuenca aportante.
- Rojas, Octavio, Mardones, María, Arumí, José Luis, & Aguayo, Mauricio. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574–2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. Revista de geografía Norte Grande, (57), 177–192. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022014000100012>
- Tapia Fuentes, W. (2018). Características de suelos de la zona Nilahue Pichilemu, afectada por la catástrofe incendiaria del 2017, Región de O’Higgins. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168501>

9. Anexos

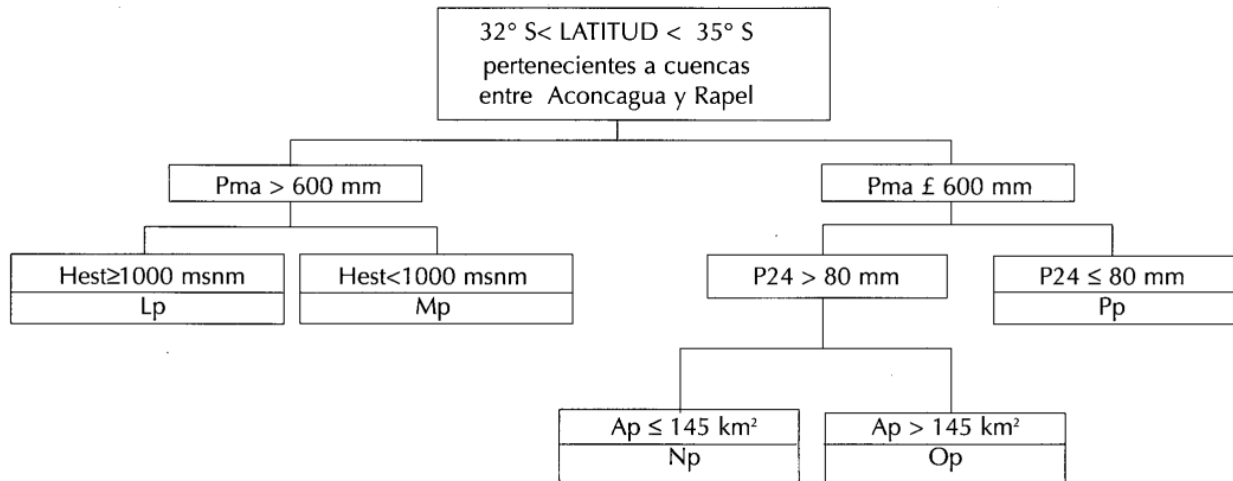


Anexo 1: Análisis multitemporal por desborde fluvial entre el pueblo de Cáhuil y las salinas de La villa: 1978 a 1994. Extraído de Ibarra (2013).



Anexo 2: Análisis multitemporal por desborde fluvial entre el pueblo de Cáhuil y las salinas de La Villa entre el periodo de 2004 al 2010. Extraído de Ibarra (2013).

Cuencas Ubicadas Entre Lat 32° S y Lat 35° S



Donde:

Pma : Precipitación media anual, mm

P24 : Precipitación máxima en 24 horas y período de retorno 10 años, mm

Hest : Cota de la estación, msnm

Ap : Area pluvial, km².

Anexo 3: Definición para zonas homogéneas pluviales entre las latitudes 32°S y 35°S. Extraída de DGA (1995).

Tabla 3.24 Factores de Conversión del Caudal Medio Diario Máximo a Caudal Instantáneo Máximo

ZONA HOMOGÉNEA	α
Dp	2,19
Ep	1,13
Fp	3,07
Gp	1,40
Hp	1,13
Ip	1,25
Jp	2,14
Kp	1,59
Lp	1,67
Mp	1,48
Np	1,87
Op	1,76
Pp	1,43
Qp	1,51
Rp	1,45
Sp	1,37
Tp	1,28
Up	1,2-1,5(*)
Vp	1,16
Wp	1,19
Xp	1,22
Yp	1,27
Zp	1,24

Anexo 4: Factores de conversión del caudal medio diario máximo a caudal instantáneo máximo.

Extraído de DGA (1995).



Anexo 5: Inundaciones por desborde fluvial en el temporal del 26 de mayo del 2012, Extraídas de Ibarra (2013).



Anexo 6: Registro fotográfico de inundaciones del evento del 28–29 de junio de 2020. Extraído de Proyecto GEF Humedales Costeros, (2021).



Anexo 7: Inundación en la localidad de Barrancas, durante el evento del 18-22 de agosto de 2023, Imagen capturada por Daniele Tardani.



Anexo 8: Perdidas relacionadas a las inundaciones, durante el evento del 18-22 de agosto de 2023.



Anexo 9: Inundación de la ruta I-520, durante el evento del 18-22 de agosto de 2023.



Anexo 10: Inundación en la ruta I-520, durante el evento del 18-22 de agosto de 2023.

