

**ESTIMACIÓN DE ZONAS DE RIESGO DE INUNDACIÓN EN BASE
A LA RECONSTRUCCIÓN DEL EVENTO
HIDROMETEOROLÓGICO DEL AÑO 2018 EN LOS ÁNGELES**

Yerko Bastián Rodríguez Jofré

Proyecto de Título presentado al
Departamento de Ciencias Geodésicas y Geomática
Universidad de Concepción, Campus Los Ángeles

En cumplimiento del requisito parcial

Para obtener el título de

Ingeniero Geomático

Escrito bajo la orientación del profesor

Prof. Andreaw Rifo Pereira

Aprobado por la comisión

Prof. Rubén Cabalin Carrasco

Prof. Jesús Piña Valdés

Los Ángeles

Marzo, 2021

RESUMEN

Producto de intensas precipitaciones en las últimas décadas en la ciudad de Los Ángeles, han ocurrido importantes desbordamientos del estero Quilque, trayendo consigo grandes daños y pérdidas materiales.

Para poder prevenir los efectos que trae consigo una inundación, el presente estudio tiene como objetivo estimar las zonas de riesgo de inundación del estero Quilque, basado en la reconstrucción del evento hidrometeorológico ocurrido en mayo del año 2018. Las zonas inundables se determinaron mediante una simulación hidráulica del estero, apoyado de trabajos topográficos del área y de información recopilada mediante encuestas a los locatarios que protagonizaron la inundación de dicho año.

Las áreas inundables obtenidas se clasificaron según su probabilidad de ocurrencia asignándoles distintos niveles de amenaza por inundación. Así es como se obtuvieron mapas de riesgo de inundación, los cuales determinaron que gran parte del estero se encuentra bajo una amenaza media, a excepción de la zona centro con una amenaza alta.

Palabras clave: Inundación, mapas de riesgo, estero Quilque, modelamiento hidráulico, HEC-RAS.

DEDICATORIA

Este proyecto de título va dedicado especialmente a mi abuelita Juana Luisa Jara Castro que lucho hasta el último día de su vida.

Ella estuvo conmigo en cada etapa de mi vida, en momentos de alegría, de tristeza y frustraciones. Le agradezco a Dios por ponerte en mi vida, por haber sido parte de ti, de tu tiempo y de tu vida. No olvidaré jamás los momentos vividos juntos, las conversaciones en las tardes en aquella banca, cada abrazo que me reconfortaba, tus palabras de aliento, y la frase que desde pequeño me decías: “Hijo, tú tienes que salir adelante, la vida es difícil, tienes que estudiar, para que un día seas un gran Señor”. Espero que desde el cielo puedas darme ánimo, fuerzas y consuelo para esta nueva etapa, porque cada logro será para ti.

Te amo Gueli.

Siempre te llevare conmigo en lo más profundo de mi corazón.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer principalmente a mi familia; a mis padres Miguel y Johanna, que me dieron la posibilidad de estudiar, educarme y me entregaron las armas para esta etapa; a mis abuelos Fernando y Juanita, que me entregaron toda su atención y amor desde pequeño; a mi hermana Sophia, que estuvo conmigo en los momentos difíciles; y a todo mi lazo familiar, por sus buenas vibras, sonrisas y palabras de apoyo en cada momento.

A mi novia, amiga, confidente y compañera Abigail Barra, que fue un pilar fundamental en esta etapa universitaria, entregándome su amor incondicional y comprensión en todo momento, te agradezco cada momento a tu lado.

A mis mejores amigos, Alvaro Ortíz, Cristian Monge y Mirko Cuevas, que fueron parte de mi vida universitaria y serán parte de mí, hasta el último de mis días. Les agradezco de corazón todos los momentos juntos y por todo el apoyo en circunstancias buenas y malas.

Gracias a cada uno de los docentes y paradocentes que me apoyaron en esta etapa Universitaria, en especial a mi profesor guía Andrew Rifo, que desde el primer momento me apoyo y confió en mi para este proyecto.

¡Muchas gracias!

Índice de Contenidos

| | |
|--|------------|
| RESUMEN | II |
| DEDICATORIA | III |
| AGRADECIMIENTOS | IV |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. OBJETIVO GENERAL..... | 2 |
| 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 2 |
| 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 3 |
| 2.1. AMENAZA POR INUNDACIONES..... | 3 |
| 2.2. SISTEMA DE ANÁLISIS DE RÍOS DEL CENTRO DE INGENIERÍA HIDROLÓGICA (HEC-RAS)..... | 8 |
| 2.3. HIDROLOGÍA..... | 13 |
| 2.4. CARTOGRAFÍA..... | 18 |
| 2.5. ESTUDIOS RELACIONADOS CON EL OBJETO DE ESTUDIO..... | 20 |
| 3. ÁREA DE ESTUDIO | 23 |
| 3.1. GENERALIDADES..... | 23 |
| 3.2. ZONA DEL PROYECTO..... | 24 |
| 3.3. INUNDACIÓN MAYO 2018..... | 27 |
| 4. METODOLOGÍA | 28 |
| 4.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN..... | 28 |
| 4.2. ANÁLISIS DE CAUDALES DE CRECIDA..... | 31 |
| 4.3. DESARROLLO TOPOGRÁFICO..... | 31 |
| 4.4. MODELACIÓN HIDRÁULICA..... | 32 |
| 4.5. ELABORACIÓN DE MAPAS DE AMENAZA POR INUNDACIONES..... | 34 |

| | |
|--|-----------|
| 5. RESULTADOS | 37 |
| 5.1. ÁREAS AFECTADAS EN LOS PERIODOS DE FRECUENCIA DE LA INUNDACIÓN | 37 |
| 5.2. SUPERFICIES POTENCIALMENTE AFECTADAS POR AMENAZA DE INUNDACIÓN | 50 |
| 6. CONCLUSIONES | 55 |
| 7. SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES | 59 |
| 8. REFERENCIAS..... | 60 |
| 9. ANEXOS..... | 66 |



Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| TABLA 1 DIFERENCIAS MODELOS 1D Y 2D. FUENTE PIÑERO (2014)..... | 10 |
| TABLA 2 PERIODOS DE RETORNO. | 14 |
| TABLA 3: CAUDALES PREVIOS A LA INUNDACIÓN. LOS CAUDALES MÁXIMOS FUERON OBTENIDOS DE LA DGA Y LAS PRECIPITACIONES OBTENIDAS DEL VISOR METEOROLÓGICO. | 27 |
| TABLA 4: ENCUESTAS DE INUNDACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. | 29 |
| TABLA 5: CAUDALES DE CRECIDAS ADOPTADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA | 31 |
| TABLA 6: COEFICIENTE N DE MANNING ADOPTADO. FUENTE: U.S.A.C.E (2016)..... | 32 |
| TABLA 7: NIVELES DE INTENSIDAD. FUENTE: COSUDE (2005)..... | 35 |
| TABLA 8: NIVELES DE FRECUENCIA. FUENTE: COSUDE (2005)..... | 35 |
| TABLA 9: SIGNIFICADO DEL MAPA DE AMENAZAS POR INUNDACIÓN. FUENTE: COSUDE (2005) | 36 |
| TABLA 10: SUPERFICIES AMENAZADAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. SE APRECIAN LAS SUPERFICIES TOTALES PARA CADA NIVEL DE AMENAZA DEL ESTERO QUILQUE..... | 50 |

Lista de Figuras

| | |
|---|---|
| <p>FIGURA 1: MAPA DE UBICACIÓN DEL ESTERO QUILQUE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. SE PUEDE APRECIAR LA LONGITUD DE 9200 M DEL ESTERO QUILQUE, ATRAVESANDO LA CIUDAD DE LOS ÁNGELES.</p> <p>FIGURA 2: ZONIFICACIÓN DE LA CIUDAD DE LOS ÁNGELES. FUENTE: PLAN REGULADOR COMUNAL (2015). LA ZONIFICACIÓN ILUSTRADA CORRESPONDE SOLO A LA CLASIFICACIÓN DE ZONAS ALEDAÑAS AL ESTERO QUILQUE, LAS DEMÁS CLASIFICACIONES SE EXCLUYERON DE LA FIGURA.</p> <p>FIGURA 3: MAPA DE ENCUESTAS DE INUNDACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.</p> <p>FIGURA 4: TIPOS DE REVESTIMIENTOS DE ESTERO QUILQUE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.</p> <p>FIGURA 5: ZONAS DEL ESTERO QUILQUE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. LAS ZONAS QUE SE MUESTRAN EN LA FIGURA ESTÁN DEFINIDAS EN BASE A LAS CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ESTERO QUILQUE, LAS DE COLOR VERDE PRESENTAN UN CAUCE MÁS NATURAL, CON VEGETACIÓN Y PIEDRAS, A DIFERENCIA DE LA ZONA MORADA QUE PRESENTA REVESTIMIENTO DE CONCRETO.</p> <p>FIGURA 6: ZONA DE FRECUENCIA 10 AÑOS, EXTREMO A. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.</p> <p>FIGURA 7: ZONA DE FRECUENCIA 10 AÑOS, SECTOR URBANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.</p> <p>FIGURA 8: ZONA DE FRECUENCIA 10 AÑOS, EXTREMO B. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.</p> <p>FIGURA 9: ZONA DE FRECUENCIA 50 AÑOS, EXTREMO A. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.</p> <p>FIGURA 10: ZONA DE FRECUENCIA 50 AÑOS, SECTOR URBANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.</p> <p>FIGURA 11: ZONA DE FRECUENCIA 50 AÑOS, EXTREMO B. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.</p> <p>FIGURA 12: ZONA DE FRECUENCIA 100 AÑOS, EXTREMO A. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.</p> <p>FIGURA 13: ZONA DE FRECUENCIA 100 AÑOS, SECTOR URBANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.</p> <p>FIGURA 14: ZONA DE FRECUENCIA 100 AÑOS, EXTREMO B. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.</p> <p>FIGURA 15: ZONAS DE RIEGOS AMENAZADAS POR INUNDACIÓN, EXTREMO A. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.</p> <p>FIGURA 16: ZONAS DE RIEGOS AMENAZADAS POR INUNDACIÓN, SECTOR URBANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.</p> | <p>25</p> <p>26</p> <p>30</p> <p>33</p> <p>37</p> <p>39</p> <p>40</p> <p>41</p> <p>43</p> <p>44</p> <p>45</p> <p>47</p> <p>48</p> <p>49</p> <p>51</p> <p>53</p> |
|---|---|

FIGURA 17: ZONAS DE RIEGOS AMENAZADAS POR INUNDACIÓN, EXTREMO B. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.54

FIGURA 18: PERFIL TRANSVERSAL DEL ESTERO QUILQUE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.66

FIGURA 19: CAPTURA CALLE VILLAGRÁN CON CALLE RENGO. FUENTE: RADIO BIO-BÍO.67

FIGURA 20: CAPTURA DE INUNDACIÓN. FUENTE: RADIO BIO-BÍO.67

FIGURA 21: ESTERO QUILQUE. FUENTE: RADIO BIO-BÍO.68

FIGURA 22: INUNDACIÓN SECTOR URBANO. FUENTE: RADIO COOPERATIVA.68



Lista de Acrónimos

- DGA:** Dirección General de Aguas (Ministerio de Obras públicas).
- PRCLA:** Plan Regulador Comunal de Los Ángeles.
- HEC-RAS:** Hydrologic Engineering Center River Análisis System.
- ONEMI:** Oficina Nacional de Emergencia Del Ministerio del Interior.
- USACE:** US Army Corps of Engineers.
- COSUDE:** Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación.



1. Introducción

La ocupación de zonas cercanas a los cauces, ya sea para uso habitacional, comercial, entre otros, resulta poco apropiado, debido a que estas áreas presentan una amenaza latente de crecidas frecuentes y extremas, que producen no solo grandes inundaciones, sino que también, problemas sanitarios, de anegamiento y problemas de salud debido a la mala calidad de agua.

A nivel mundial, las inundaciones son el desastre natural más frecuente predominando en un 79%, causando un 55% de las muertes y un 86% de las pérdidas económicas (OMM, 2016); siendo la mayoría de estos desencadenados por eventos de precipitación extrema que aumentan sostenidamente año tras año. En el año 2010, 178 millones de personas fueron afectadas por ellas, donde las pérdidas totales en años excepcionales, como 1998 y 2010, sobrepasaron los 40.000 millones de dólares (Bloch, 2012). Chile no es una excepción a este fenómeno; ya que las características geográficas y el poblamiento de las llanuras fluviales, hacen al país vulnerable frente a este tipo de desastres (González, 2019).

En este sentido, en Chile se hace necesario abarcar el tema para sensibilizar a las personas sobre el peligro que conlleva habitar los sectores inundables de los cauces. Por esta razón el presente proyecto de título busca estimar las zonas inundables del tramo urbano del estero Quilque, ubicado en la comuna de Los Ángeles, en base a la inundación ocurrida en mayo del año 2018 en la ciudad. Allí se han registrado inundaciones importantes en los sectores ribereños, cuyos eventos han provocado costos materiales para los habitantes.

1.1. Objetivo General

Estimar las zonas de riesgos de inundación en la ciudad de Los Ángeles basado en la reconstrucción del evento hidrometeorológico del año 2018.

1.2. Objetivos Específicos

- Estimar llanuras de inundación dentro del límite urbano del estero Quilque.
- Establecer zonas con niveles de amenaza por inundación.
- Elaborar mapas de zonas de riesgo amenazadas por inundación.



2. Revisión Bibliográfica

2.1. Amenaza por inundaciones

En la actualidad, los peligros naturales y las acciones del hombre favorecen a las catástrofes que se producen por efecto de estos. En numerosas ocasiones, no se realizan trabajos o estudios adecuados del origen de los fenómenos naturales que inciden sobre una determinada zona, antes de realizar una actividad o intervención antrópica. Ahora bien, si no es posible prevenir en la ocurrencia de un suceso natural, se pueden tomar medidas adecuadas para minimizar la amenaza (Rodríguez & Valcarce, 2005).

Según la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (UNISDR) en el 2009, existen diversos tipos de amenazas como la biológica, geológica, socio-natural, hidrometeorológica, natural, etc., de las cuales la más relevantes para el ámbito de la reducción de riesgo de desastre es la de tipo natural, que puede surgir de fuentes geológicas, meteorológicas, hidrológicas, oceánicas o combinadas entre sí. En el caso de las inundaciones, la amenaza se ve relacionada a eventos hidrometeorológicos por medio de altas tasas de precipitaciones (Turcios, 2018).

En los últimos 40 años han ocurrido una serie de inundaciones a nivel mundial asociadas al cambio climático global que han cobrado la vida de miles de personas, destruyendo equipamientos críticos para la ciudad y sus comunidades, siendo la mayoría de éstos desencadenados por eventos de precipitación extrema que aumentan sostenidamente año tras año (González, 2019). Al respecto, observatorios internacionales revelan que las inundaciones son el tercer peligro natural más dañino globalmente (Wilby & Keenan, 2012) y Chile no es una excepción a este fenómeno, ya que las características geográficas

y el poblamiento de las llanuras fluviales hacen al país vulnerable frente a este tipo de desastres.

El Departamento de Urbanismo de la Universidad de Chile (2009), detalló que las inundaciones corresponden a una consecuencia derivada de procesos de recurrencia relacionados a crecidas de los cursos de agua, estas se asocian principalmente al régimen pluviométrico y térmico, el clima imperante, y, por las características morfológicas, volumen de los caudales, velocidad, etc. Por otra parte, el mismo autor, realizó una diferenciación entre inundación y anegamientos, ya que anegamiento, se define como una acumulación de aguas de lluvia sobre el terreno, siendo un desbalance entre el volumen de la lluvia precipitada y la capacidad de evacuación de un suelo, en términos de permeabilidad, saturación y micro-topografía.

La Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI) en el 2018, indica el riesgo de inundación como “Concentración anormal de agua causada por lluvias intensas y persistentes, que genera desbordes de ríos, esteros, lagos o lagunas y que se potencia por el crecimiento urbano de las ciudades y la deforestación de zonas aledañas, condiciones que alteran el proceso de infiltración y evacuación de aguas”. Además, ONEMI (2018) describió los riesgos hidrometeorológicos, los cuales son amenazas trascendentales a la planificación de los recursos, debido a la frecuencia con que ocurren estos tipos de fenómenos, entre ellos destacan las inundaciones por desbordes de cauces, que afectan comunas y zonas ribereñas.

IPCC (2012), definió inundación como “el rebase de los límites normales de confinamientos de una corriente o caudal u otro cuerpo de agua, o la acumulación de esta sobre áreas que no están sumergidas”; además, las inundaciones pueden ser clasificadas en inundaciones fluviales, súbitas, pluviales, costeras y asociadas a deslizamientos de glaciares.

- **Antecedentes internacionales de inundaciones**

A nivel mundial, las inundaciones son el desastre más frecuente, debido a sus efectos devastadores, provocando pérdidas de vidas humanas, de viviendas, ganado, infraestructura y de comunicaciones (FAO, 2020). Según Joy et al. (2019), los desastres naturales que ocurrieron desde el año 1995 al 2015, muestran que el 47% de ellos corresponden a inundaciones, con más de 2.300 millones de personas damnificadas en Asia, siendo Bangladesh el país más afectado por inundaciones en el mundo, seguido de India que cuenta con una quinta parte de tasa de mortalidad mundial a causa de las inundaciones.

- **Antecedentes nacionales de inundaciones**

Chile está centrado en el meridiano 71°W, extendiéndose entre los 17°y 56° de latitud S, dejando al descubierto un amplio rango de zonas climáticas. Destacando sus relieves montañosos con cimas cubiertas de nieve y de glaciares, amplia actividad sísmica y volcánica, estas modifican el clima de diversas zonas controladas por la latitud provocando un gran incremento a la ocurrencia de inundaciones fluviales (Di Castri & Hajek, 1976).

Según Rojas et al. (2014), en Chile se registraron 227 eventos de inundación fluvial entre los años 1574 y el 2012, siendo el 71% por eventos pluviales de precipitación frontal y convectiva. También los autores indican que entre los años 1900 y 2012 se concentraron en un 60% de los casos consignados en los últimos 500 años, manteniendo su alto porcentaje de inundaciones por lluvias intensas.

Existen factores naturales y de origen humano que modifican la vulnerabilidad, por ejemplo, los asentamientos humanos ubicados en las llanuras de inundación (aluviales), o también edificios y cimientos no resistentes (OMS, 2021).

- **Tipos de inundaciones**

- a. Inundaciones fluviales

Las inundaciones fluviales son fenómenos naturales producidos por desbordamientos de cauces, los que se tornan peligrosos cuando se habitan estos lugares con amenaza de inundación, transformándose en un riesgo para los asentamientos humanos, produciendo catástrofes o desastres (Rojas et al., 2014).

Para Adhikari et al. (2010), estas inundaciones están directamente relacionadas con diversas causas como precipitaciones persistentes, fusión de nieve y hielo, lluvias intensas de corta duración, procesos de remoción de masa, etc.

- b. Inundaciones súbitas

Las inundaciones súbitas o rápidas son producidas por crecidas de caudal ocurridas de manera repentina principalmente por altas pendientes de ríos y cuencas, ocasionando arrastre de materiales como lodo, rocas, árboles, etc. Estas inundaciones suelen ser de alta peligrosidad debido al poco tiempo de reacción que dispone la comunidad ante este desastre natural (González, 2014).

c. Inundaciones pluviales

Según Ambrosino et al. (2014), este tipo de fenómeno se crea principalmente por efectos negativos de la urbanización, es decir, por la impermeabilización del suelo, aceleración de escurrimientos, obstáculo al drenaje natural, etc. Como resultado de todos estos factores, las áreas urbanas generan una mayor escorrentía pluvial, debido a que las aguas no pueden ser evacuadas rápidamente, ya que la capacidad del sistema de drenaje se ve sobrepasada, provocando las inundaciones.

d. Inundaciones costeras

Este tipo de inundación se presenta en zonas costeras por ascenso del nivel del mar, principalmente cuando la marea tiende a subir por motivos de la atracción lunar y fuertes vientos de origen hidrometeorológico (González, 2014). Además, según CENAPRED (2009), también pueden generarse debido a intensos vientos de un ciclón, en forma de marea de tormenta que penetran tierra adentro en zonas de costa, cubriendo grandes extensiones de terreno.

e. Inundaciones por deslizamientos de glaciares

Estas inundaciones son producidas por roturas de lagos supraglaciales, que son auténticos embalses con alto potencial que pueden afectar valle abajo, desprendiendo bloques de hielo que lo arrasan todo a su paso antes de desintegrarse, y que, crean terrenos yermos que podrían necesitar milenios para el desarrollo de suelos, la colonización vegetal y el uso humano (Del rio et al., 2014).

2.2. Sistema de Análisis de Ríos del Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC-RAS)

○ Conceptos básicos de HEC-RAS

- Flujo permanente: Las características hidráulicas del flujo (caudal, velocidad media, tirante, etc.) permanecen constantes con respecto al tiempo en una sección del canal (Chereque, 1993).
- Flujo no permanente: Las características hidráulicas del flujo (caudal, velocidad media, tirante, etc.) no permanecen constantes con respecto al tiempo en una sección del canal (Chereque, 1993).
- Régimen de flujo subcrítico: Representa velocidades bajas y las ondas pueden ir aguas arriba. Además, las fuerzas inerciales son sobrepasadas de gran manera por las gravitacionales (Saltos et al., 2018).
- Régimen de flujo supercrítico: Representa velocidades altas y las ondas o perturbaciones son arrasadas por la velocidad de flujo aguas abajo. Además, las fuerzas inerciales presentan una influencia mucho mayor que las fuerzas gravitacionales (Saltos et al., 2018).
- Régimen de flujo mixto: Este régimen se define como la transición entre el flujo subcrítico y flujo supercrítico, siendo la energía específica mínima. El valor que toma depende únicamente de la geometría del canal y de la velocidad de descarga (Saltos et al., 2018).

○ **Criterios para escoger entre un análisis hidráulico 1D o 2D**

- Modelos hidráulicos Unidimensionales (1D): Este modelo requiere que variables como velocidad y profundidad cambien en una sola dirección a lo largo de un estero o canal, siendo empleado principalmente para canales y planicies aluviales menores. Durante eventos de inundación extrema proveen resultados bastantes adecuados para planicies aluviales estrechas o moderadas, es decir que, si las velocidades laterales son pequeñas o despreciables, este modelo proveerá mejores resultados (Piñero, 2014).

- Modelos hidráulicos Bidimensionales (2D): Este modelo computa las velocidades en dos direcciones, siendo mejorado en el cálculo de variables hidráulicas como puentes, atarjeas, etc. Además, provee un mejoramiento de resultados de distribuciones de flujo y velocidad, elevaciones de la superficie del agua, magnitud y dirección de velocidades, profundidad del flujo y esfuerzos cortantes (Piñero, 2014).

- Diferenciación 1D y 2D: Según Piñero (2014) los modelos unidimensionales solo deben ser utilizados si las velocidades laterales son despreciables o pequeñas y cuando los cálculos sencillos resultan suficientes para recrear la modelación. A diferencia de este, los modelos bidimensionales deben usarse en caso de que los patrones de flujo sean complejos, velocidades laterales sean significantes y las presunciones del modelo unidimensional no sean aptas para desarrollar el análisis.

En la Tabla 1, se puede apreciar de manera general la diferencia y combinación de los modelos 1D Y 2D.

| 1D | 2D | 1D Y 2D combinadas |
|--|--|--|
| Canal y planicie bien definida | Interacciones complejas entre el canal principal y la planicie | Permite una representación de los canales y conductos en 1D en conjunto con una cuadrícula de un modelo 2D para la topografía de la planicie |
| Flujo predecible | Multi-direccional | |
| Flujo predominantemente en una dirección | Varios patrones de flujo en la misma planicie | |

Tabla 1: Diferencias modelos 1D y 2D. Fuente: Piñero (2014).

○ **Software HEC-RAS**

“HEC-RAS es un software gratuito, creado principalmente para realizar trabajos con flujos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales, transporte de sedimentos, modelado de temperatura en el agua y modelado generalizado de la calidad del agua” (USACE, 2016).

El Manual de HEC-RAS creado por US Army Corps of Engineers (USACE) (2016), indica que:

Este software integrado, fue diseñado para uso interactivo en una multitarea, compuesto por una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI, siglas en ingles), componentes de análisis hidráulico separados, capacidades de gestión y almacenamiento de datos, gráficos e instalaciones de informes.

El sistema HEC-RAS contiene cuatro componentes de análisis de río unidimensionales para cálculos de perfiles de la superficie del flujo del agua, simulación del flujo inestables, cálculos de transporte de sedimentos en límites móviles y análisis de la calidad del agua.

Además, estos cuatro componentes utilizan el mismo patrón geométrico común, representación de datos y rutinas de cálculo geométricas e hidráulicas.

Capacidades hidráulicas del software

- Perfiles de superficie de agua de flujo constante: Este componente del sistema de modelado está destinado al cálculo de los perfiles de la superficie del agua para un flujo constante gradualmente variado. Además, el componente de flujo constante es capaz de modelar perfiles de superficie de agua en régimen de flujo mixto, subcrítico y supercrítico.
- Transporte de sedimentos/ Cálculos de límites móviles: Este componente del sistema de modelado está destinado a la simulación de transporte de sedimentos unidimensional/ límite móvil de cálculos resultantes de la socavación y la depositación durante periodos de tiempo moderados (generalmente años, aunque serán posibles aplicaciones a eventos de inundación únicos).
- Análisis de la calidad del agua: Este componente del sistema de modelado está destinado a permitir al usuario a realizar un análisis de la calidad del agua fluvial, siendo la última versión del software capaz de analizar temperatura y transporte de un número limitado de componentes de la calidad del agua (algas, oxígeno disuelto, entre otros).

- Simulación de flujo inestable: Este componente del sistema de modelado HEC RAS es capaz de simular un flujo inestable unidimensional; flujo inestable bidimensional; o combinado 1D y modelado 2D de flujo inestable a través de una red completa de canales abiertos.



2.3. Hidrología

○ Coeficiente de Manning

Existen numerosos factores empíricos que deben ser valorados una y otra vez hasta lograr que los modelos hidrográficos reproduzcan lo más fielmente posible el comportamiento de la naturaleza. Dentro de esos factores, uno de los que más peso tiene en la modelación del comportamiento del movimiento del agua por la red hidrográfica es el factor dinámico de la ecuación de Manning (n), el cual tiene una incidencia fundamental en el estudio de las inundaciones (Fernández de Córdova et al., 2020).

Según León y Martínez (2013), la n de Manning es el parámetro más importante para cuantificar de forma certera un caudal y lograr obtener buenos resultados. Este factor es muy variable y depende de diversos factores: rugosidad del perímetro mojado del cauce, vegetación, irregularidad, alineamiento, sedimentación y socavación, obstrucción, nivel y caudal, cambio estacional (Chow, 1959).

En cauces artificiales los factores que afectan a la variabilidad de la n de Manning es mucho más controlada que un cauce natural, porque los factores que afectan este coeficiente pueden ser eliminados o disminuidos. En el caso de los cauces naturales, existe un lecho principal que presenta distinta composición de materiales, vegetación, irregularidad, obstáculos, por lo que la resistencia al flujo y la n son diferentes, tornándose más compleja y requiriendo un mayor cuidado (Fernández de Córdova et al., 2018).

○ **Determinación de la probabilidad**

El tiempo de ocurrencia de eventos hidrológicos futuros no puede predecirse, no obstante, es posible recurrir a un estudio de probabilidad o frecuencia (Linsley et al., 1988).

Según Pizarro y Novoa (1986), existen dos conceptos para consignar la definición de probabilidad; el primero es el periodo de retorno, que se define, como el tiempo que transcurre entre dos sucesos iguales; sea ese tiempo, T . El segundo concepto es la probabilidad de excedencia, el cual, es una probabilidad asociada al periodo de retorno, donde la variable aleatoria toma un valor igual o superior a X , definiéndose como:

$$P(x) = \frac{1}{T}$$

La probabilidad de que un valor de la variable aleatoria no sea excedido, está dado por la función de distribución de probabilidad $F(x)$, y se expresa de la siguiente forma:

$$F(x) = \int_0^x f(x)dx = P(x \leq X) = 1 - \frac{1}{T}$$

Finalmente, la probabilidad de que la variable aleatoria sea mayor que X , se expresa como:

$$P(x > X) = 1 - F(x) = \frac{1}{T}$$

Según Aguilera (2007), para cada periodo de retorno existe un valor probable para que la variable no sea excedida, como se puede visualizar en la Tabla 2.

| Periodo de Retorno (T) | $F(x) = 1 - \frac{1}{T}$ |
|----------------------------|--------------------------|
| 10 años | 0,9 |
| 50 años | 0,98 |
| 100 años | 0,99 |

Tabla 2: Períodos de retorno. Fuente: Aguilera (2007).

○ **Análisis de frecuencia**

El análisis de frecuencia es una herramienta utilizada para predecir el comportamiento futuro de los caudales en una zona determinada. Es un método estadístico, que permite calcular la magnitud del caudal asociado a un periodo de retorno, y su confiabilidad depende de la incertidumbre propia de la distribución (Aguilera, 2007).

Las distribuciones de probabilidades son usadas en estudios hidrológicos: análisis del clima, precipitaciones, de caudales, volúmenes de embalse, etc., donde la muestra de datos recolectadas debe ser ajustada a una determinada función de distribución de probabilidades teórica, con el fin de ayudar a la estimación de parámetros relacionados a los periodos de retorno (Sciortino, 2019). A continuación, se indica la formulación de dos de las diversas distribuciones existentes para la estimación de datos:

- Distribución de Gumbel

Según Aparicio (1997), si se tienen N muestras, cada una de las cuales contienen n eventos y si se selecciona el máximo de x de los n eventos de cada muestra, es posible demostrar que, a medida que n aumenta, la función de distribución de probabilidad de x tiende a:

$$F(X) = P[\varepsilon \leq X] = e^{-e^{-d(x-u)}} \text{ con } -\infty \leq \infty \quad (1)$$

Donde " x " presenta el valor a asumir por la variable aleatoria, con " d " y " u " parámetros y " e " base de los logaritmos neperianos.

Despejando " x " de (1), queda;

$$x = u - \frac{\ln(-\ln F(X))}{d} \quad (2)$$

Para la determinación de los parámetros "d" y "u", se utilizan las siguientes expresiones que los definen:

$$u = \bar{x} - 0,450047S \quad (3)$$

$$\frac{1}{d} = 0,779696S \quad (4)$$

Donde:

\bar{x} = media aritmética de la serie de datos considerados.

S = desviación típica de la muestra de datos considerados.

Según Heras (1983) los valores 0,450047 y 0,779696, son válidos para cualquier tamaño de población, debido a la escasa de relevancia que poseen.

- Distribución de Pearson tipo III

Según Chow et. Al., (1994), señalan que esta distribución posee un gran flexibilidad y diversidad de forma, dependiendo de los valores de sus parámetros, asimilando su utilización para precipitaciones o caudales máximos anuales. La función de densidad de probabilidad de Pearson III se define como:

$$F(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \int_0^1 e^{-\left(\frac{x-\delta}{\delta}\right)} \left(\frac{x-\delta}{\delta}\right)^{\beta-1} dx$$

Donde α, β, δ son los parámetros de la función y $\Gamma(\beta)$ es la función Gamma. Los parámetros α, β, δ se evalúan a partir de n datos medidos.

Asimismo, los parámetros de la distribución pueden ser estimados en función del promedio (\bar{x}) y desviación estándar (S) de la muestra, por medio de las siguientes expresiones:

$$\alpha = \frac{S}{\sqrt{\beta}}; \quad \beta = \left(\frac{2}{\gamma}\right)^2; \quad \delta = \bar{x} - \alpha\beta$$

Donde:

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})}{S^3}$$

γ : Coeficiente de sesgo

e : Constante de Neper

α, β, δ : parámetros

S : Desviación típica de los datos de entrada

\bar{x} : media aritmética de los datos de entrada

Así mismo, la variable estandarizada y se presenta a continuación:

$$\gamma = \frac{x - \delta}{\alpha}$$

Posteriormente, el ajuste, se realiza a través de la tabla chi-cuadrado, donde:

$$\chi^2 = 2\gamma$$

$$\mu = 2\beta$$

Por lo tanto, el valor que asume la variable aleatoria "x" a partir de lo anteriormente señalado, se define como:

$$x = \gamma\alpha + \delta$$

2.4. Cartografía

La cartografía es la ciencia, la técnica y el arte de la elaboración y usos de los mapas (Rysted, 2014). Según la Asociación Cartografía Internacional (en inglés International Cartographic Association, ICA), un mapa es la representación gráfica abstracta de la superficie de la Tierra que muestra las relaciones espaciales entre las características geográficas, generaliza sus apariencias simplificándolas con fines comunicativos y aplica símbolos para facilitar su interpretación.

Desde el lanzamiento en la década de 1970 de los satélites Landsat por parte de los Estados Unidos, se han realizado estudios de la superficie terrestre por medio de equipos topográficos de alta resolución. Por lo tanto, la cartografía moderna se basa en una combinación de observaciones sobre el terreno y la percepción remota.

- **Tipos de mapas**

Un mapa requiere dos elementos fundamentales: la posición de un elemento y sus atributos (atributos se pueden referir a su naturaleza, actividad, incidencias, cantidad, etc.). Los mapas tienen diferentes escalas, funciones y contenidos (Ormeling, 2014):

- a. Mapas topográficos

Son aquellos que muestran las relaciones espaciales entre los diferentes elementos geográficos tales como relieve, edificios, carreteras, límites, cursos o masas de agua, etc.

- b. Mapas especiales

Corresponde a las cartas de navegación marítima y mapas de aviación, siendo mapas de usos profesionales y estandarizados por la Organización de la Naciones Unidas (ONU).

c. Mapas temáticos

Representan variables específicas del territorio. Se centran en la información de un tema en concreto y pueden llevar información adicional del relieve. Los ejemplos de mapas temáticos son muy variados, mapas geológicos, mapas de usos de suelo, de riesgo de incendios forestales, mapas de turismo, mapas de sismicidad, mapas de riesgo de inundaciones, etc.

o **Mapas de zonas de riesgo**

Los análisis de riesgos naturales requieren en la mayor parte de su desarrollo la expresión espacial de las áreas asociadas a peligros, como la ubicación geográfica de los elementos en riesgo. Por ello, la cartografía se ha convertido en una herramienta imprescindible en el análisis y evaluación de los riesgos naturales, ya que, a través de mapas de zonificación de peligrosidad, se pueden delimitar las zonas en función de la frecuencia e intensidad de ocurrencia de un determinado fenómeno natural (Pérez, 2012).

Además, se señala que el papel de la cartografía es realmente importante en el caso de delimitar el riesgo de inundación, ya que existen diferentes parámetros y variables que pueden ser representados por su componente espacial (profundidad, velocidad, carga de sedimento, etc.), además, esta expresión cartográfica facilita su integración con las medidas preventivas de carácter territorial, como lo es la ordenación y gestión de usos de suelo en áreas de riesgo (Elízaga, 1983).

2.5. Estudios relacionados con el objeto de estudio

Estudios realizados con HEC-RAS:

- Puentes (2014), determinó las áreas potencialmente amenazadas por el desborde del estero Bellavista en Tomé del año 2006, mediante una modelación hidráulica con el software HEC-RAS, pudiendo finalmente crear mapas de áreas inundadas.
- Sepúlveda (2014), determinó las posibles áreas afectadas por desbordes del año 2006 del río Biobío, en el tramo comprendido entre San Rosendo y la desembocadura, todo esto mediante una simulación con el software HEC-RAS.
- Irarria (2016), analizó las inundaciones del estero Quilque en el centro urbano de Los Ángeles mediante la estimación de la capacidad de porteo y su relación con la mejora predictiva del sistema de alerta temprana basado en el año 2006, todo este análisis lo realizó mediante el software de modelación hidráulica HEC-RAS.
- Peña-Guzmán et al. (2016), realizó un estudio para determinar las áreas de inundación de la cuenca baja del río Frío, ocurrida en los años 2010 y 2011 en el área urbana del municipio de Chía Colombia, mediante el software HEC-RAS. El autor comenta que gracias al modelo desarrollado por el software pudo obtener los niveles máximos de agua alcanzados en la zona del río Frío para periodos de retorno de lluvias de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

- López (2017), en su trabajo de diplomado, mediante la utilización de los softwares ArcGIS y HEC-RAS realizó una simulación hidráulica a partir de los eventos extremos máximos, tomando como caso de estudio la cuenca del río Sagua la Chica, para así obtener la zona de inundación en un área para un caudal dado.
- Chilito (2018), estudió las áreas de inundación del barrio Rubi de la ciudad de Villavicencio por un periodo de seis meses. Y luego de haber usado herramientas como AutoCAD, ArcGIS y HEC-RAS, logró obtener las áreas de inundaciones de la zona estudiada para poder informar a la comunidad mediante mapas de riesgos.
- Huancas (2019), realizó un modelamiento hidráulico con el software HEC-RAS del río Reque con el fin de identificar los tramos críticos y así prevenir las inundaciones debido a la inexistencia de obras de protección de defensas ribereñas de este río.
- Mamani & LLanchipa (2020), determinaron las áreas afectadas por inundaciones del desbordamiento del río Coata, mediante el modelo de simulación hidráulica HEC-RAS, obteniendo como resultado un mapa de inundación. Con los resultados obtenidos se pudo obtener que el periodo de retorno para el caudal de $428.06 \text{ m}^3/\text{s}$, es de 5 años.

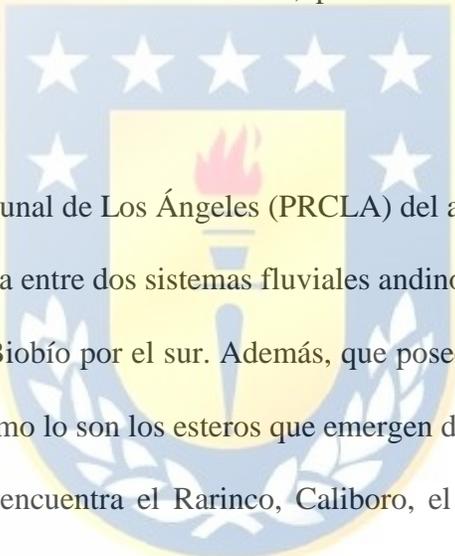
Estudios realizados con otros métodos cartográficos:

- Riccardi (1997), elaboró mapas de riesgo de inundación por medio de una modelación matemática bidimensional hidrodinámica del Arroyo Ludueña en Argentina, teniendo resultados para crecidas con 50, 100 y 500 años de periodo de retorno, ayudando indirectamente a la planificación y control de los recursos hídricos para un desarrollo sustentable.
- Bescos & Camarasa (2000), elaboraron mapas de riesgo del llano de inundación del río Arga en Navarra, mediante la combinación de diferentes métodos estadísticos, hidráulicos, hidrológicos y geomorfológicos, de los cuales algunos fueron automatizados mediante Sistemas de Información geográfica.
- Rodríguez & Valcarce (2005), estudiaron el territorio cubano a ser inundado, utilizando una combinación de factores como la topografía, geomorfología, tipo y calidad del suelo, hidrología, precipitaciones, entre otros. Los autores recolectaron toda esta información y la procesaron empleando un sistema de Información Geográfica (SIG) para obtener mapas de peligro de inundaciones de cuba.

3. Área de estudio

3.1. Generalidades

En el Valle Central de Chile se han registrado una serie de devastadoras inundaciones, detonadas por eventos de precipitaciones intensas y de corta duración desde la década de 1980, asociadas al fenómeno de El Niño y al cambio climático global (Sanhueza, 2015). Entonces, este estudio se centra en la ciudad de Los Ángeles, Región del Biobío, que ha tenido grandes impactos en el centro de la ciudad, producto de desbordes del estero Quilque,



Según el Plan Regulador Comunal de Los Ángeles (PRCLA) del año 2015 se indica que: La ciudad se encuentra ubicada entre dos sistemas fluviales andinos de alto dinamismo, el río Laja por el norte y el río Biobío por el sur. Además, que posee un importante recurso no explotado en la comuna como lo son los esteros que emergen de napas subterráneas. Entre los ríos principales se encuentra el Rarincó, Caliboro, el Huaqui, el Coreo y el Duqueco, siendo los principales cauces que drenan de oriente a poniente esta comuna, sumándole a esta red hídrica una importante cantidad de esteros a la ciudad de Los Ángeles. Uno de estos esteros es el Quilque, el cual atraviesa toda la ciudad de Los Ángeles, desembocando en el Huaqui, siendo este recurso hídrico importante en la ciudad como fuente de agua para usos industriales y urbanos.

3.2. Zona del proyecto

La ciudad de Los Ángeles se fundó en el año 1739 por órdenes del Gobernador de Chile José Manso de Velasco, con el objetivo de reunir a los habitantes dispersos de la zona y como refugio de los constantes ataques de indígenas. La plaza de la ciudad se situó en una planicie irregular estratégica de fácil defensa, debido a las protecciones naturales que le daban riachuelos y pantanos que circundaban, siendo el estero un muro de defensa natural (PRCLA, 2005). Posteriormente en el año 1960, el arquitecto Santa María en su reacondicionamiento al plan regulador de 1945, propone como parte fundamental del proyecto un área verde central entorno al estero Quilque, que vincule la ciudad con sus características naturales (Pérez & Andaur, 2005).

El área de estudio es parte del centro de la ciudad, que es cruzada de oriente a poniente por el estero Quilque, el cual según se observa en la Figura 1, es un cuerpo hídrico que se incorpora en el trazado urbano de la ciudad, derivando este y otros cuerpos de agua menores (acequias y lagunas artificiales) que se desbordan de su cauce debido a fenómenos hidrometeorológicos intensos. Complementariamente en la Figura 2, se muestra la zonificación establecida por el PRC vigente de la ciudad, donde se observa que asociado al estero Quilque no existen definiciones de zonas de restricción o riesgo (Ver Figura 2).

El estero Quilque es un cauce natural de 13 km de longitud que se inicia aproximadamente a unos 5 km al oriente de la Avenida Las Industrias. Este estero nace de afloramientos de agua subterráneas y cuenta con un afluente correspondiente al estero Pichiquilque, el cual, entre septiembre y abril recibe aguas de riego provenientes del canal Laja (PRCLA, 2015).

En el sector céntrico de la ciudad, el Estero Quilque se presenta restringido a una menor sección de escurrimiento, con viviendas, locales comerciales y calles construidas muy cercanas al cauce. Por el contrario, en los sectores de menor desarrollo urbano fuera del área consolidada de la ciudad, el estero Quilque se presenta como un cauce abierto, y presenta usos de suelo principalmente agrícolas.

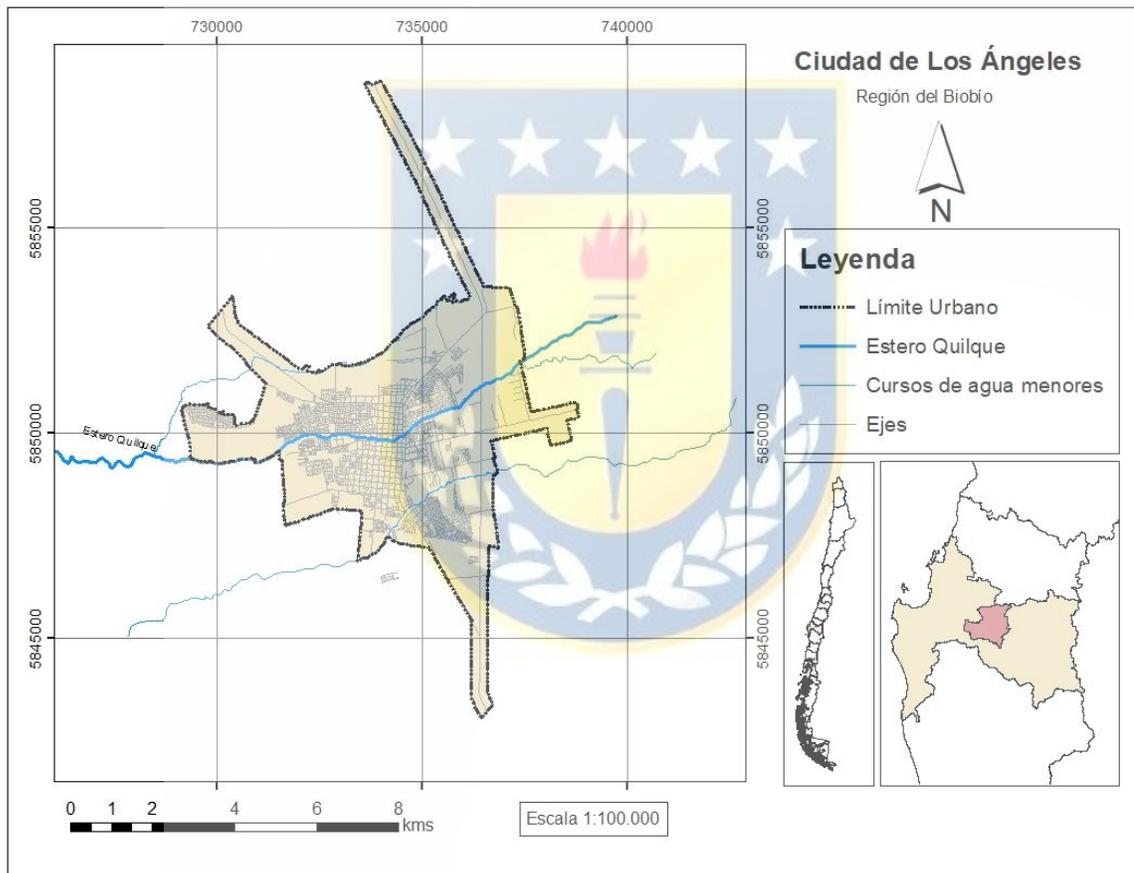


Figura 1: Mapa de ubicación del estero Quilque. Fuente: Elaboración propia. Se puede apreciar la longitud de 9200 m del estero Quilque, atravesando la ciudad de Los Ángeles.

Durante los últimos años el estero Quilque ha sufrido varias crecidas de importancia por eventos de precipitación (Iraira, 2016). Este es el caso de las inundaciones ocurridas en los

años 2006, 2014 y 2018, donde gran parte del sector céntrico de la ciudad de Los Ángeles sufrió daños por el desborde del estero.

Durante desborde más reciente, el ocurrido el año 2018, se vieron afectados por el ingreso del agua a sus casas los habitantes y locatarios de sectores como población Contreras Gómez, La Vega, y sector céntrico de la ciudad, alcanzando niveles de agua considerables.

Debido a esta realidad, es que se hace necesario una actualización constante de la información que existe en el sector, generando mapas de peligros de inundación por desborde del cauce, que sirvan para apoyar el desarrollo y planificación urbana.

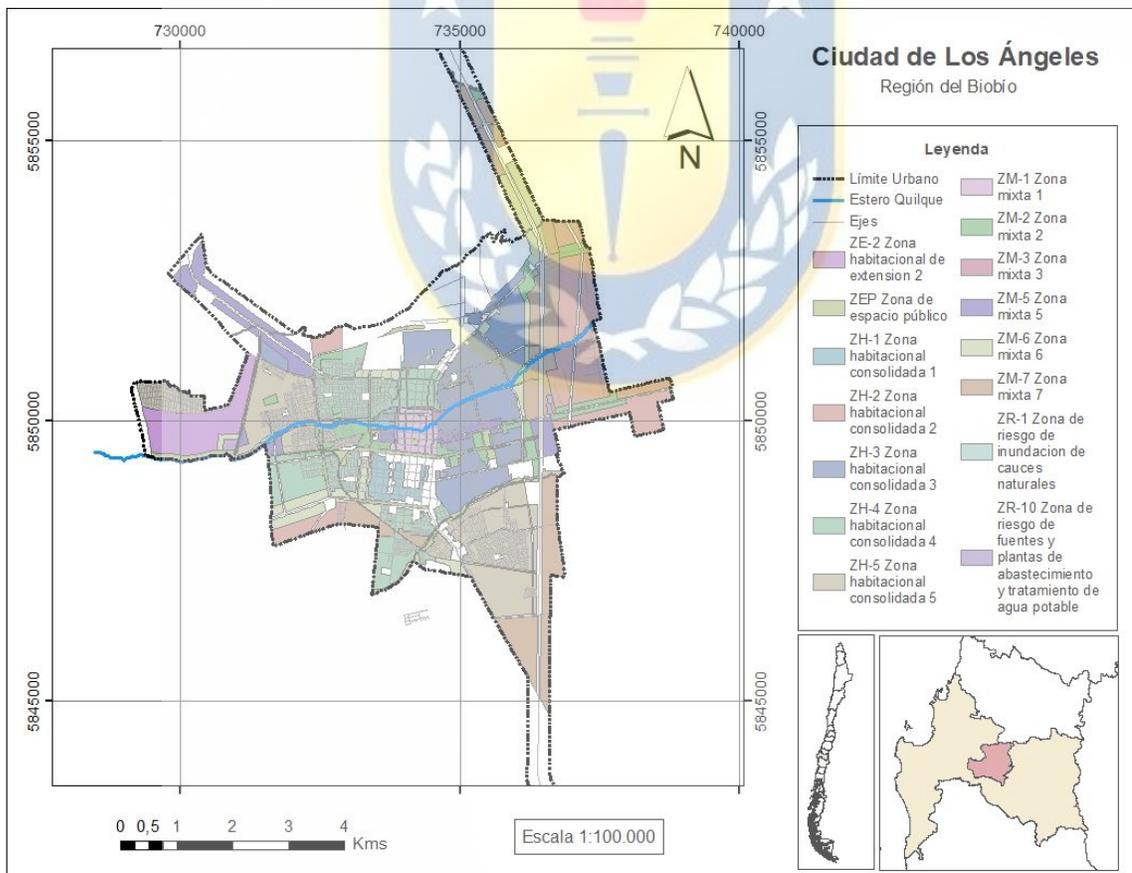


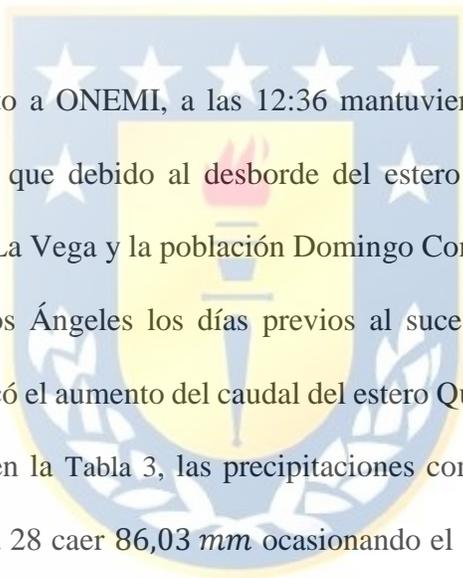
Figura 2: Zonificación de la ciudad de Los Ángeles. Fuente: Plan regulador comunal (2015). La zonificación ilustrada corresponde solo a la clasificación de zonas aledañas al estero Quilque, las demás clasificaciones se excluyeron de la figura.

3.3. Inundación mayo 2018

La información proporcionada por la Dirección General de Aguas (DGA), mediante sus registros hidrométricos entregados por la estación instalada en el Estero Quilque, declara el día 28 de mayo del año 2018 a las 09:46, Alerta Roja para la comuna de Los Ángeles por aumento de caudal. Se indicó que la crecida de caudal llegó a un nivel de 1,53 metros de altura, quedando sobre el umbral de alertamiento técnico Roja de la DGA. Lo que, podría afectar a la población Domingo Contreras Gómez y al sector La Vega en la comuna de Los Ángeles.

Posteriormente, la DGA junto a ONEMI, a las 12:36 mantuvieron Alerta Roja para la comuna de Los Ángeles, ya que debido al desborde del estero Quilque se registraron inundaciones en el sector de La Vega y la población Domingo Contreras Gómez.

El clima de la ciudad de Los Ángeles los días previos al suceso se encontraban bajo precipitaciones, lo que provocó el aumento del caudal del estero Quilque el día 28 de mayo de 2018. Tal y como se ve en la Tabla 3, las precipitaciones comenzaron el día 26 con 19,12 mm, para luego, el día 28 caer 86,03 mm ocasionando el desborde del estero con un caudal de 11.87 m³/s.



| Día | Caudal máximo (m ³ /s) | Precipitaciones (mm) |
|---------------------|-----------------------------------|----------------------|
| 25 de mayo del 2018 | 8,91 | 0,20 |
| 26 de mayo del 2018 | 10,94 | 19,12 |
| 27 de mayo del 2018 | 8,23 | 6,79 |
| 28 de mayo del 2018 | 11,87 | 86,03 |
| 29 de mayo del 2018 | 6,45 | 16,18 |

Tabla 3: Caudales previos a la inundación. Los caudales máximos fueron obtenidos de la DGA y las precipitaciones obtenidas del Visor Meteorológico. Fuente: Elaboración propia.

4. Metodología

4.1. Recopilación de información

La recopilación de información sobre la inundación del año de estudio se realizó mediante antecedentes de fuente secundaria extraídas mediante información periodística de los diarios de la zona y canales de prensa; también de fuentes primarias extraídos por la comunidad afectada

- **Fuente secundaria**

Se revisó la información emitida por la prensa, entre ellas “BiobioChile”, “CNNChile”, “Cooperativa” para el 28 de mayo del año 2018, la cual anunciaba la crecida del caudal del estero Quilque. Esta información se complementó con videos emitidos por canales de televisión como el Canal 13 y TVN, donde se puede apreciar visualmente la inundación de dicho año. Además, ONEMI para dicha fecha, decreto “Alerta Roja” para la comuna de Los Ángeles por aumento del caudal del estero Quilque, corroborando la información emitida por los canales de prensa y diarios de la zona.

- **Fuente primaria**

Esta etapa consistió en realizar una pequeña encuesta online a los locatarios de los sectores aledaños al estero, con el fin de conocer los niveles de agua alcanzados en la inundación. Principalmente se extrajo información relacionada al nombre, dirección o esquina de referencia y altura alcanzada por este suceso.

Se realizaron un total de 15 encuestas online (Tabla 4), las cuales ayudaron a definir el ancho de los perfiles transversales en las zonas inundadas. Además, gracias a esta

información se validó la modelación que se realizó en el software HEC-RAS con el fin de adecuarse a la realidad del suceso. Principalmente estas encuestas se realizaron en la zona urbana de la ciudad, específicamente en locales comerciales y algunas viviendas afectadas (Figura 3).

| Nombre | Lugar de referencia | Altura estimada de inundación (m) |
|------------------|--|-----------------------------------|
| Persona 1 (P1) | Tienda Rhino BIKE | 0,7 |
| Persona 2 (P2) | Ex Golosín | 1 |
| Persona 3 (P3) | Líder exprés | 0,6 |
| Persona 4 (P4) | “J.R” Distribuidora | 0,5 |
| Persona 5 (P5) | Casa habitacional n°155, José Manso de Velasco | 0,6 |
| Persona 6 (P6) | Escuela republica de Grecia | 0,3 |
| Persona 7 (P7) | Esquina Costanera Quilque con calle Arrayan | 0,3 |
| Persona 8 (P8) | Áridos y Hormigones Ríos San Martín | 0,7 |
| Persona 9 (P9) | Instituto Profesional Virginio Gómez | 0,3 |
| Persona 10 (P10) | Ferretería El martillo | 0,4 |
| Persona 11 (P11) | Ferretería El copihue S.A | 0,5 |
| Persona 12 (P12) | Restaurant Génesis | 0,3 |
| Persona 13 (P13) | Club de rayuela “Cacique Colo Colo” | 0,25 |
| Persona 14 (P14) | Tienda “La Covadonga” | 0,25 |
| Persona 15 (P15) | Calzados Mariela | 0,7 |

Tabla 4: Encuestas de inundación. Fuente: Elaboración propia.

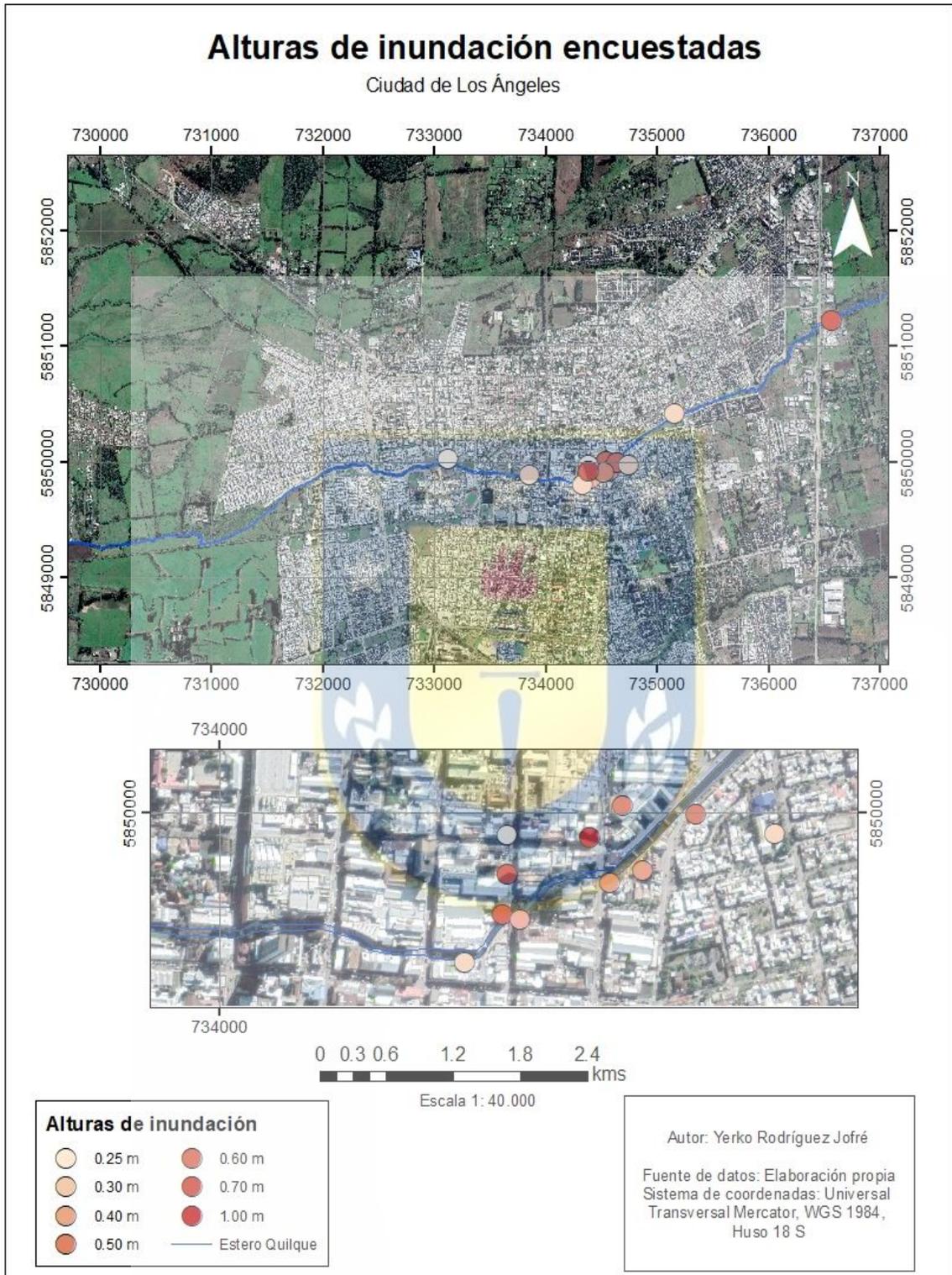


Figura 3: Mapa de encuestas de inundación. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Análisis de caudales de crecida

Los caudales máximos instantáneos para el año 2018 se obtuvieron de los registros de la Estación estero Quilque Los Ángeles, entregados por la Dirección Nacional de las Aguas (DGA, 2020), dando un promedio de $9,37 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal. Estos datos de caudal entregados por la DGA tienen una frecuencia de una lectura cada media hora.

Posteriormente se realizó un análisis de frecuencia para el caudal de crecida (caudal promedio) obtenido anteriormente, mediante las funciones de Distribución de Gumbel y Pearson Tipo III (en base a la aplicación de las fórmulas revisadas en apartado revisión bibliográfica Hidrología), para periodos de retorno de 10, 50 y 100 años, siendo el promedio de estas dos distribuciones el dato que se usará para cada periodo (Tabla 5).

| Periodos de retorno | Probabilidad de no excedencia | Distribución de Gumbel | Distribución de Pearson tipo III | Promedio de caudal (m ³ /s) |
|---------------------|-------------------------------|------------------------|----------------------------------|--|
| 10 | 0,9 | 12,615 | 12,627 | 12,621 |
| 50 | 0,98 | 15,815 | 14,872 | 15,344 |
| 100 | 0,99 | 17,168 | 15,704 | 16,436 |

Tabla 5: Caudales de crecidas adoptados. Fuente: Elaboración propia

4.3. Desarrollo topográfico

○ Perfiles transversales

El levantamiento topográfico fue obtenido de los planos de “Secciones geométricas del estudio de factibilidad y mejoramiento estero Quilque y Paillihue”, precisamente en los planos del 22 al 44 (MOP-DPH, 2008), donde se obtuvieron coordenadas de los extremos de los perfiles ya existentes. Mediante cálculos de coordenadas con las distancias de los planos, se procedió a reconstruir el estero Quilque al detalle, con extensión de 9200 m de

largo mediante el software AutoCAD Civil 3D, junto a su superficie con curvas de nivel de intervalos de 2 m.

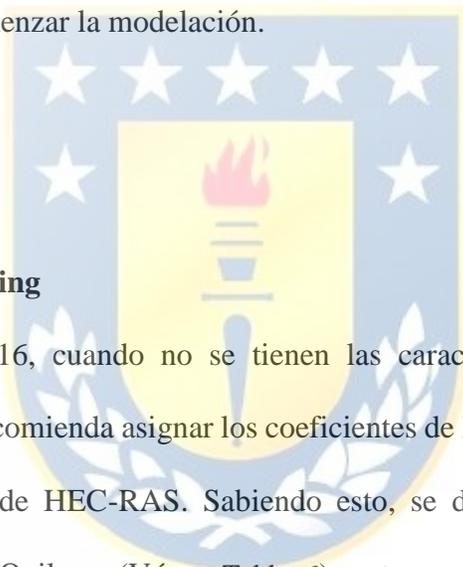
Posteriormente, se digitalizó el eje del lecho del estero, que corresponde al punto más bajo de la sección, y sus respectivos bordes. Luego, se crearon secciones transversales cada 20 m y 10 m entre curvas, aumentando la longitud de la sección transversal para las zonas inundadas según la información de las encuestas.

Finalmente, se exportó los perfiles transversales del software AutoCAD Civil 3D al software HEC-RAS para comenzar la modelación.

4.4. Modelación hidráulica

- **Coefficiente de Manning**

Según U.S.A.C.E, en el 2016, cuando no se tienen las características de rugosidad específicas de un cauce, se recomienda asignar los coeficientes de Manning recomendados en el manual de referencia de HEC-RAS. Sabiendo esto, se designaron valores para diferentes zonas del estero Quilque (Véase Tabla 6), estos valores van directamente relacionados con la rugosidad del estero Quilque (por ejemplo: concreto, piedras, alto nivel de vegetación, etc.), y se adoptaron para tramos sin revestimiento, revestimiento de concreto y revestimiento de gaviones o piedras (Véase Tabla 6).

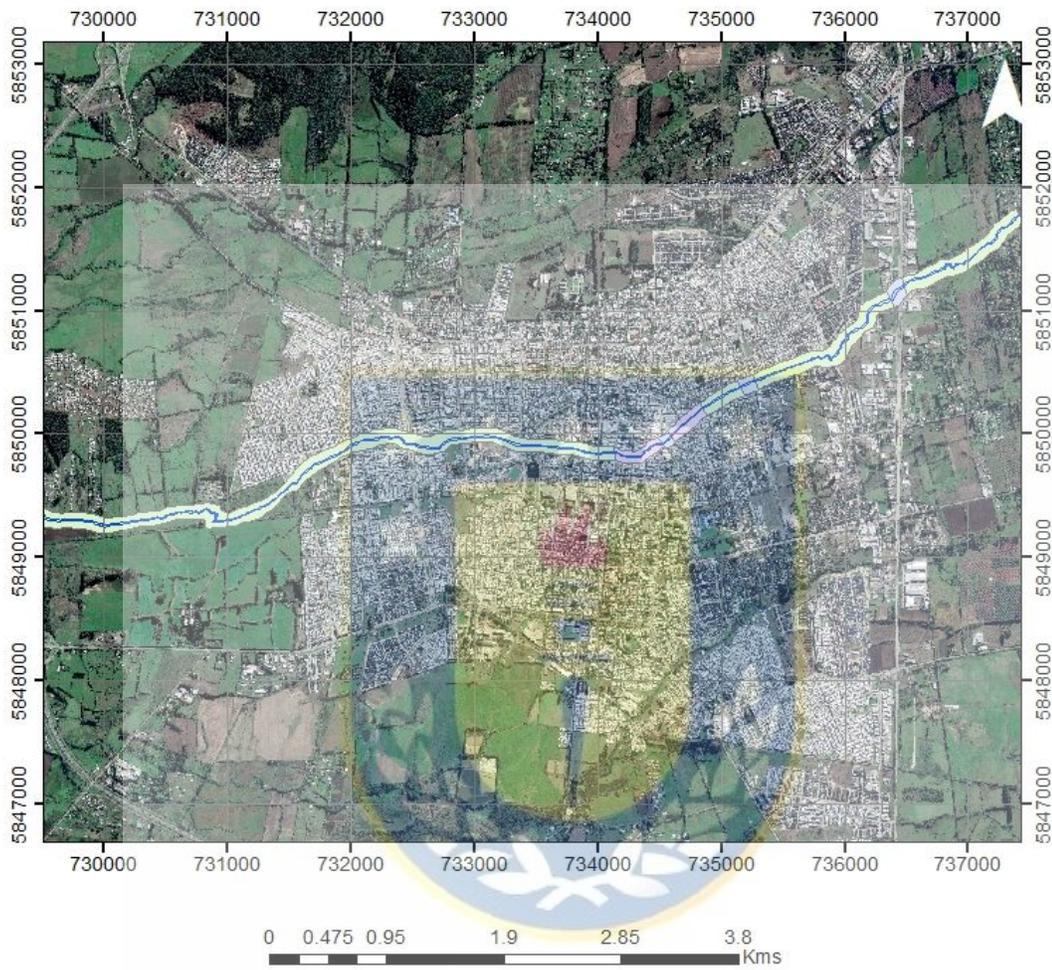


| Variabilidad de n de Manning | | |
|----------------------------------|-------|-------|
| Tramo | Desde | Hasta |
| Sin revestimiento | 0,050 | 0,080 |
| Revestimiento de concreto | 0,011 | 0,015 |
| Revestimiento gaviones o piedras | 0,015 | 0,020 |

Tabla 6: Coeficiente n de Manning adoptado. Fuente: U.S.A.C.E (2016).

Tipos de revestimiento del estero Quilque

Ciudad de Los Ángeles



Escala 1: 40.000

Leyenda

- Estero Quilque
- Sin revestimiento
- Revestimiento de piedra o gaviones
- Revestimiento de concreto

Autor: Yerko Rodríguez Jofré

Fuente de datos: Elaboración propia
Sistema de coordenadas: Universal
Transversal Mercator, WGS 1984,
Huso 18 S

Figura 4: Tipos de revestimientos de estero Quilque. Fuente: elaboración propia.

- **Simulación del modelo**

El software HEC-RAS, mediante datos topográficos y caudales es capaz de simular el comportamiento hidráulico del cauce (U.S.A.C.E., 2016).

Se procedió a realizar la simulación en el software de forma unidimensional, con un caudal constante en todo el tramo de 9200 m, ya que básicamente lo que se busca en este proyecto es obtener las zonas de inundación, independiente del tiempo en que se alcance.

En primer lugar, se ingresaron los coeficientes de Manning ya designados (Véase Tabla 6) al software. Posteriormente se modificó la variable caudal para crecidas asociadas a periodos de retorno de 10, 50 y 100 años (Véase Tabla 5), para lograr obtener los límites de las áreas de inundaciones para distintas condiciones de amenaza.

Finalmente se usó RAS Mapper para visualizar las zonas de inundación del estero Quilque, junto con los niveles de agua alcanzados para cada periodo de retorno definido.

4.5. Elaboración de mapas de amenaza por inundaciones

- **Digitalización**

La digitalización se realizó mediante el software ArcGIS, de la siguiente manera:

Se descargó una imagen base de la ciudad de Los Ángeles georreferenciada mediante un programa gratuito (freeware con licencia GNU) denominado SASPlanet, el cual permite descargar imágenes de satélite de alta resolución y mapas convencionales (MappingGIS, 2014).

Luego desde el software ArcGIS se procedió a dibujar las zonas de inundación visualizadas desde RAS Mapper para los periodos de retorno de 10, 50 y 100 años, creando un *shapefile* para cada uno de estos periodos con un gran nivel de detalle.

- **Mapas de amenaza por inundaciones**

Para la elaboración de los mapas de amenaza es necesario conocer que la definición de amenaza está en función de la probabilidad de ocurrencia del suceso junto con su intensidad o profundidad del agua, por lo que es fundamental establecer los criterios a utilizar para poder definir los niveles de manera correcta (COSUDE, 2005).

Los criterios recomendados para inundaciones estáticas se considera la profundidad o altura de flujo, los cuales han sido utilizados en el ámbito internacional en España, Venezuela y Suiza, entre otros. (Sepúlveda, 2014)

Los umbrales para los distintos niveles de intensidad de amenaza se definieron considerando la peligrosidad que una determinada inundación puede significar para una infraestructura o viviendas aledañas al estero. COSUDE (2005), definió los siguientes rangos para cada nivel de amenaza en inundaciones (Tabla 7):

| Niveles de intensidad | Profundidad del flujo (H) (m) (Inundaciones estáticas) |
|------------------------------|---|
| Alto | $H \geq 1$ |
| Medio | $0,5 \leq H < 1$ |
| Bajo | $0,25 \leq H < 0,5$ |

Tabla 7: Niveles de intensidad. Fuente: COSUDE (2005)

El mismo autor, indica que la frecuencia o recurrencia de una inundación dependerá de la frecuencia de precipitaciones excepcionalmente fuertes, entonces los periodos de retorno para cada año se establecieron en tres categorías (Tabla 8):

| Frecuencia | Periodo de Retorno en años (Tr) |
|-------------------|--|
| Alto | $T \leq 10$ años |
| Medio | $10 < T \leq 50$ años |
| Bajo | $50 < T \leq 200$ años |

Tabla 8: Niveles de frecuencia. Fuente: COSUDE (2005)

Un buen conocimiento de los niveles de amenaza por inundación para las áreas aledañas a un cauce resulta de gran ayuda y generalmente es utilizado en los procesos de ordenamiento y planificación territorial para apoyar el desarrollo urbano. Por ello COSUDE (2005), definió el uso que se le puede dar a un área para cada nivel de amenaza y los potenciales daños a que estos estarían expuestos, como se puede apreciar en la Tabla 9.

| Significado de los mapas de amenazas para la planificación del territorio | | |
|--|---|--|
| Leyenda mapas amenaza por inundaciones | Perdidas y daños previsibles en caso de uso para asentamientos humanos | Implicaciones para el ordenamiento territorial |
| Amenaza Alta | Las personas están en peligro tanto dentro como fuera de edificios. Los eventos se manifiestan con una intensidad relativamente débil, pero con una frecuencia elevada. | Zona de prohibición, no apta para la instalación, expansión o densificación de asentamientos humanos. Áreas ya edificadas deben ser reubicadas a largo plazo, o protegidas con obras de protección, sistemas de alerta temprana y evacuación temporal. |
| Amenaza Media | Las personas están en peligro afuera de los edificios. Se debe contar con daños en los edificios, pero no destrucción repentina de estos, siempre y cuando su modo de construcción haya sido adaptado a las condiciones del lugar | Zona de reglamentación, en la cual se puede permitir la expansión y densificación de asentamientos humanos, siempre y cuando existan y se respeten reglas de ocupación del suelo y normas de construcciones existentes que no cumplan con las reglas y normas deben ser reforzadas, protegidas o desalojadas y reubicadas. |
| Amenaza Baja | Los eventos se manifiestan con una probabilidad de ocurrencia débil, pero con una gran intensidad | Zona de sensibilización, apta para asentamientos humanos, en la cual los usuarios del suelo deben ser sensibilizados ante la existencia de amenazas muy poco probables, para que conozcan y apliquen reglas de comportamiento apropiadas ante estas |

Tabla 9: Significado del mapa de amenazas por inundación. Fuente: COSUDE (2005)

5. Resultados

5.1. Áreas afectadas en los periodos de frecuencia de la inundación

Las áreas para cada periodo de retorno se dividieron según la Figura 5, sabiendo que aguas abajo para este estero va desde extremo A hacia extremo B.

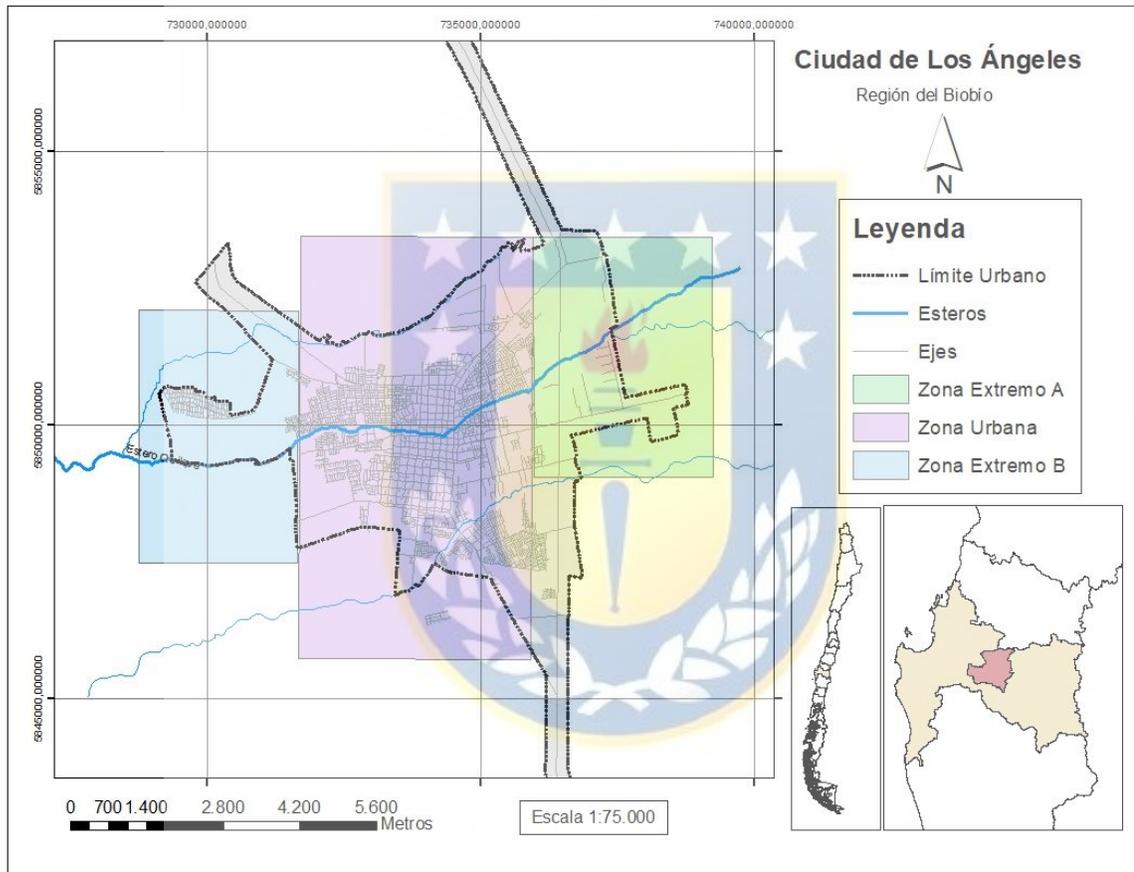


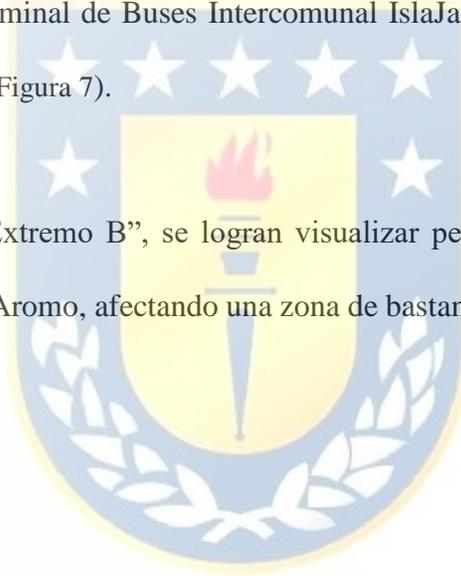
Figura 5: Zonas del estero Quilque. Fuente: Elaboración propia. Las zonas que se muestran en la figura están definidas en base a las características generales del estero Quilque, las de color verde presentan un cauce más natural, con vegetación y piedras, a diferencia de la zona morada que presenta revestimiento de concreto.

- **Periodo de retorno de 10 años**

El estero Quilque presentó un desborde para un periodo de retorno de 10 años en la “Zona Extremo A”. En esta área limítrofe de la ciudad se presentan áreas de mucha vegetación, y también en menor cantidad en el sector Avenida Las Industrias y en Costanera Estero Quilque (Figura 6).

En la “Zona Urbana” de la ciudad, se obtuvieron desbordes de gran medida entre las calles Colón, Almagro, Rengo, Terminal de Buses Intercomunal IslaJacoob y en parte de villa Domingo Contreras Gómez (Figura 7).

Finalmente, para la “Zona Extremo B”, se logran visualizar pequeños desbordes en el sector cercano a Avenida El Aromo, afectando una zona de bastante vegetación (Figura 8).



Frecuencia de 10 años

Ciudad de Los Ángeles, extremo A

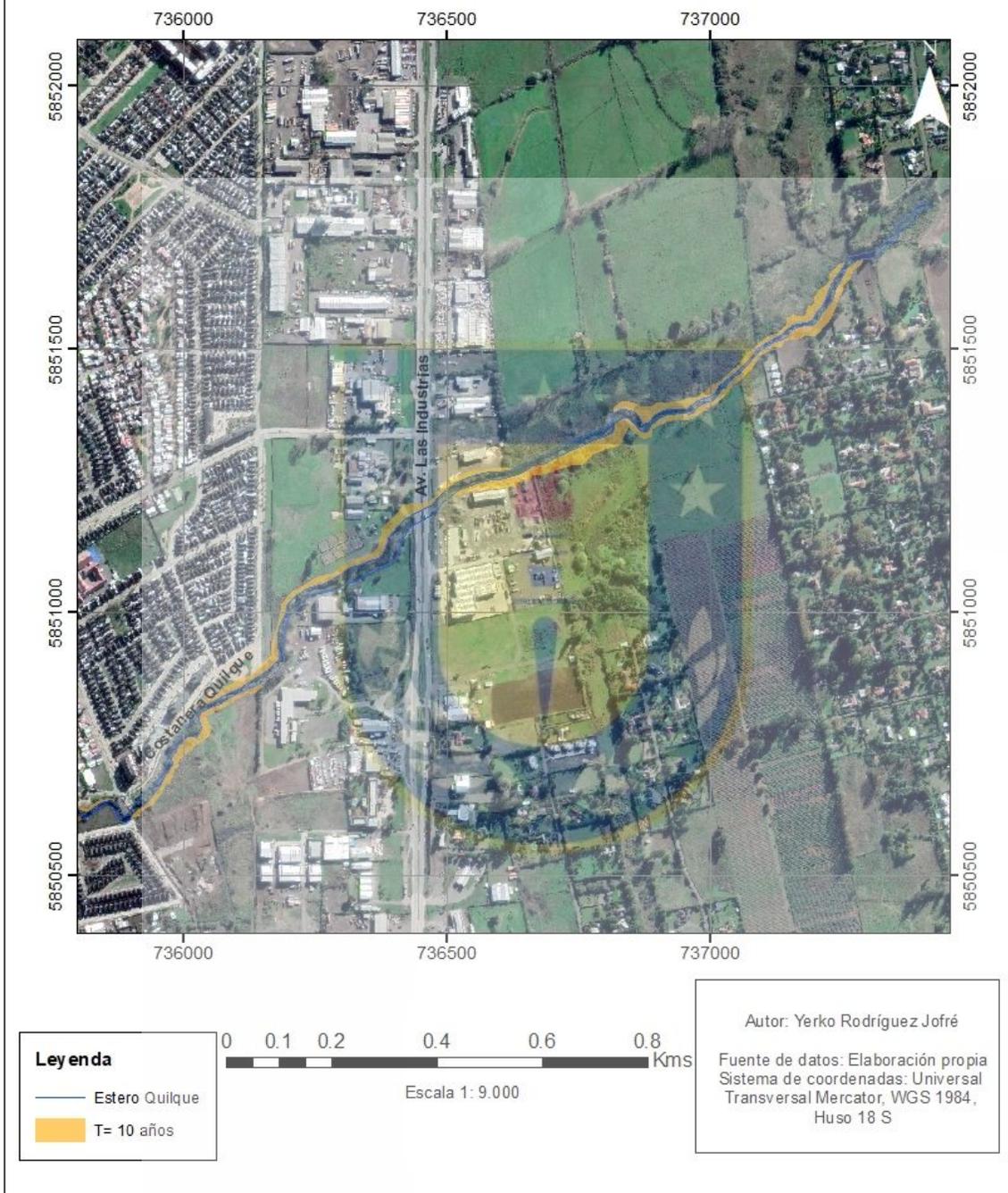


Figura 6: Zona de frecuencia 10 años, extremo A. Fuente: Elaboración propia.

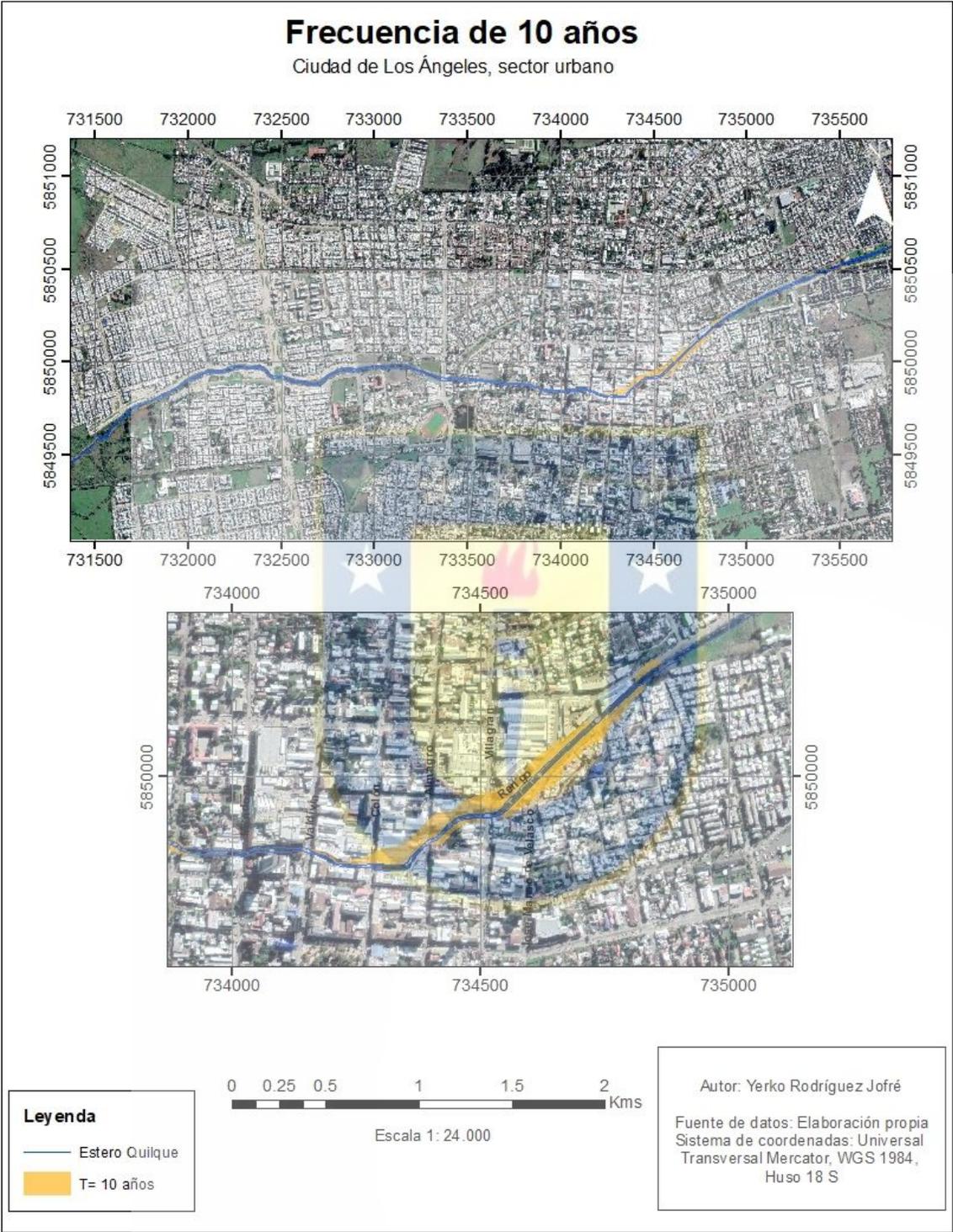


Figura 7: Zona de frecuencia 10 años, sector urbano. Fuente: Elaboración propia.



Figura 8: Zona de frecuencia 10 años, extremo B. Fuente: Elaboración propia.

- **Periodo de retorno 50 años**

Para crecidas asociadas a un periodo de retorno de 50 años, se observan desbordes en el estero Quilque, aumentando en gran cantidad el área inundada con respecto a la crecida anterior. Para el “Extremo A” se puede observar en la Figura 9, que se desborda prácticamente en todo el tramo, aumentando la inundación en zonas de vegetación, en Avenida Las Industrias y Costanera Quilque.

También para la “Zona Urbana” de la ciudad, es posible observar desbordamiento en la mayoría del estero, comprometiendo principalmente la misma zona de la crecida anterior, pero expandiéndose hacia el Mercado Central de Los Ángeles, calle Villagrán y Mall Plaza Los Ángeles. Asimismo, aumentó débilmente la superficie inundada en comparación con el periodo de retorno de 10 años, para la población Domingo Contreras Gómez y parque urbano estero Quilque (Figura 10).

Finalmente, para la “Zona Extremo B”, aumentó considerablemente la superficie afectada en la zona aledaña a Av. El Aromo, sumándose el sector norte de Av. Ferrocarril y zonas de vegetación aledañas a Villa Los Profesores (Figura 11).

Frecuencia de 50 años

Ciudad de Los Ángeles, extremo A

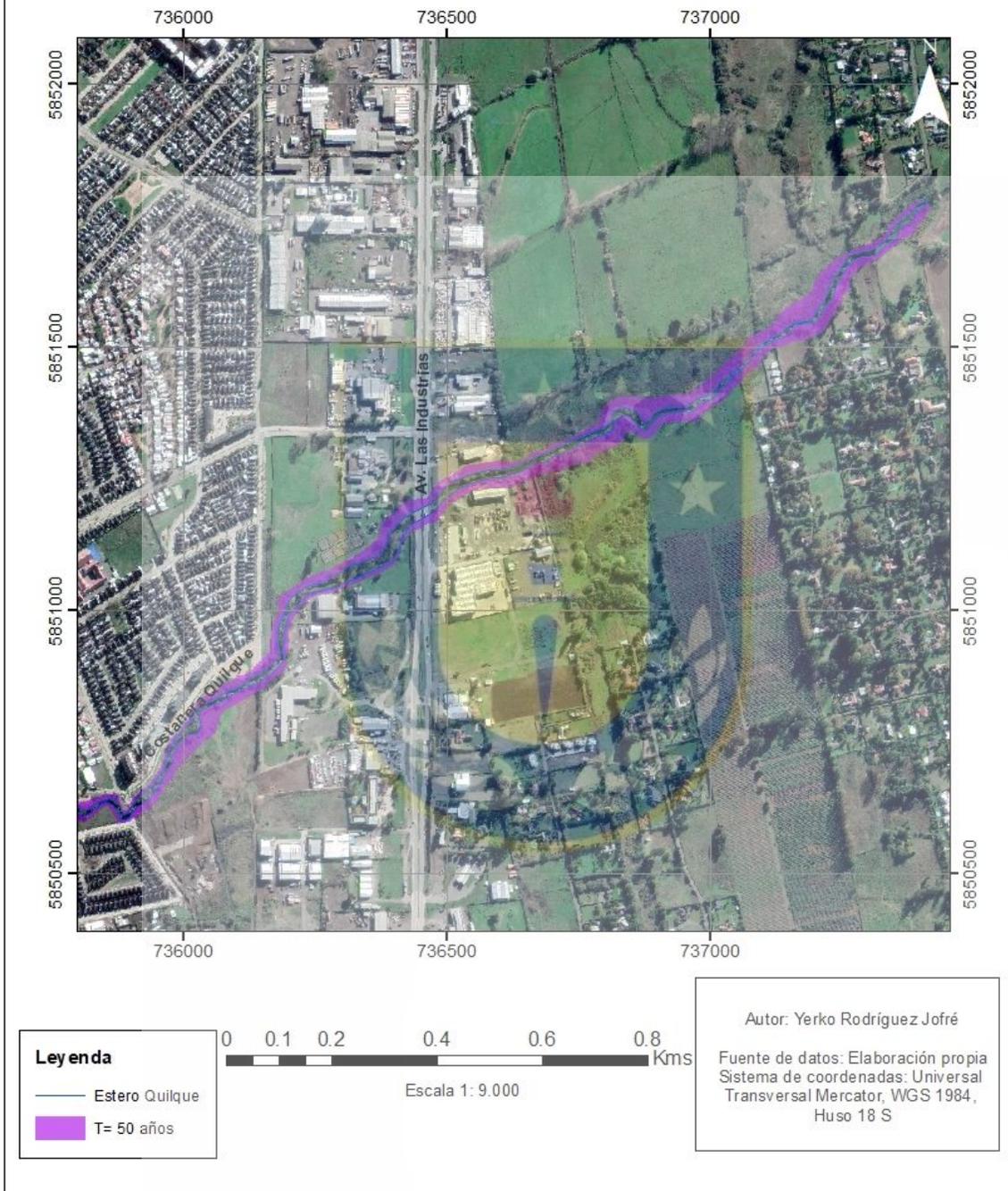


Figura 9: Zona de frecuencia 50 años, extremo A. Fuente: Elaboración propia.



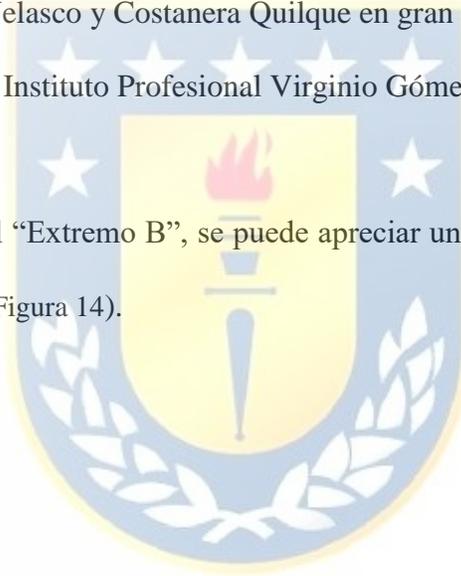
Figura 11: Zona de frecuencia 50 años, extremo B. Fuente: Elaboración propia.

- **Periodo de retorno 100 años**

Para crecidas asociadas a un periodo de 100 años se observa un desbordamiento casi en la totalidad del estero Quilque. En la “Zona Extremo A”, se puede observar un aumento cercano a la Costanera Quilque y Av. Las industrias (Figura 12).

También para la “Zona Urbana”, se visualiza un gran aumento respecto a la crecida anterior, comprometiendo además la Vega techada de Los Ángeles, Supermercado Santa Isabel, calle José Manso de Velasco y Costanera Quilque en gran magnitud; por otro lado, se afecta en menor medida al Instituto Profesional Virginio Gómez (Figura 13).

Finalmente, para el tramo del “Extremo B”, se puede apreciar un aumento en las mismas zonas de la crecida anterior (Figura 14).



Frecuencia de 100 años

Ciudad de Los Ángeles, extremo A

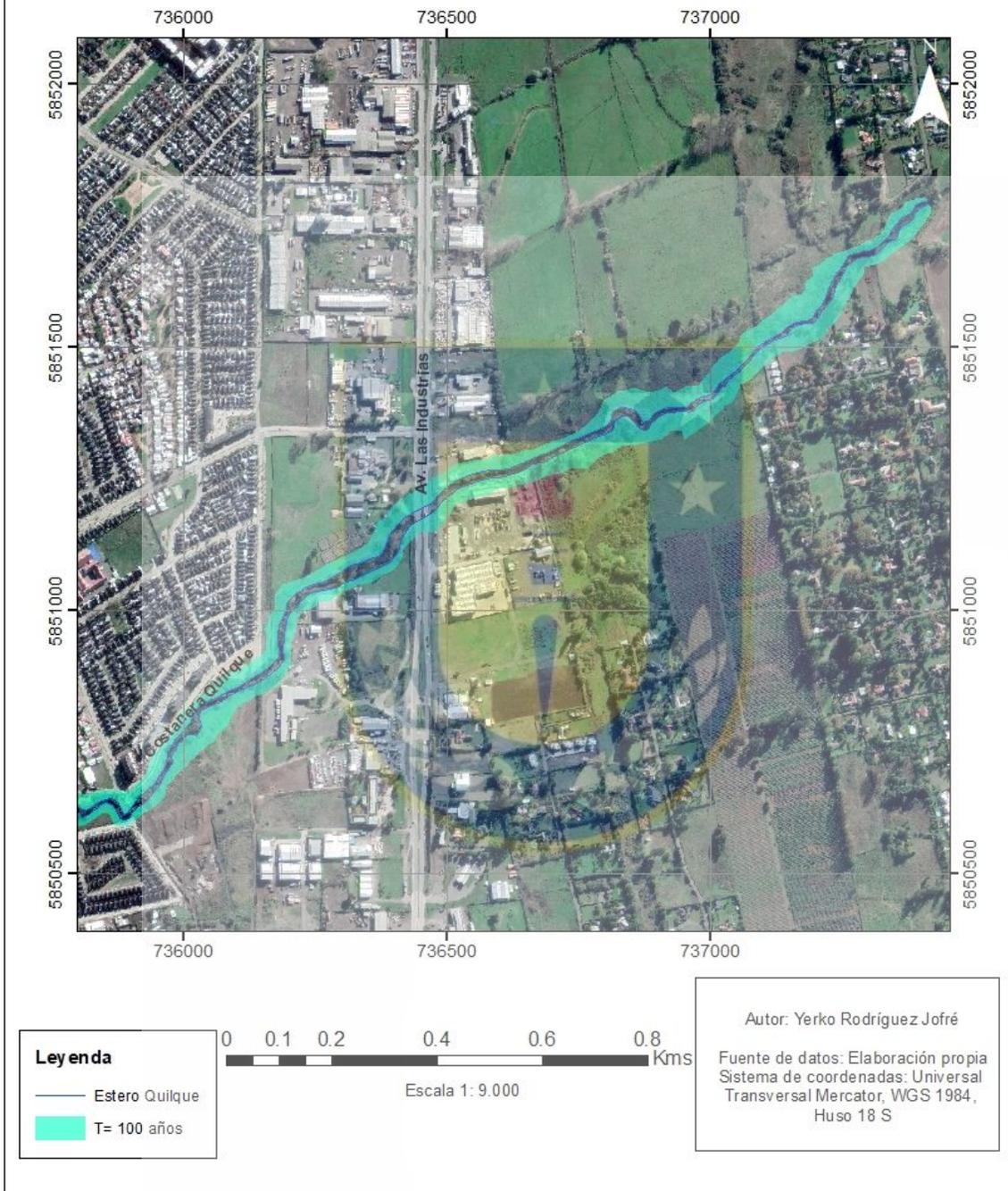
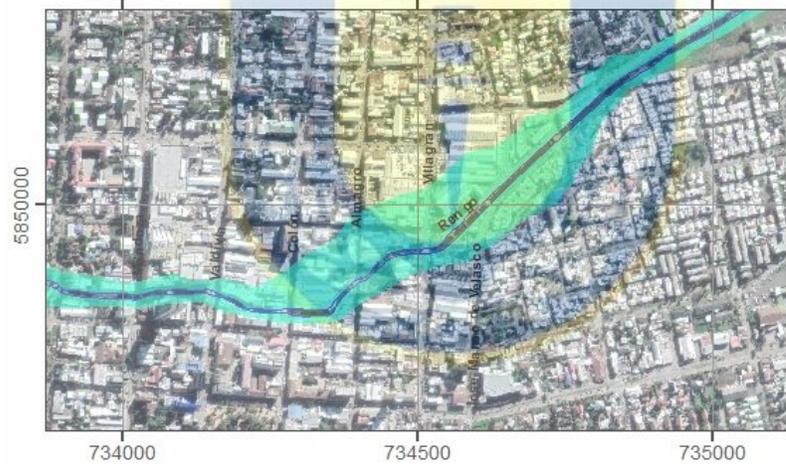


Figura 12: Zona de frecuencia 100 años, extremo A. Fuente: Elaboración propia.

Frecuencia de 100 años

Ciudad de Los Ángeles, sector urbano



Leyenda

- Estero Quique
- T= 100 años



Autor: Yerko Rodríguez Jofré
Fuente de datos: Elaboración propia
Sistema de coordenadas: Universal Transversal Mercator, WGS 1984, Huso 18 S

Figura 13: Zona de frecuencia 100 años, sector urbano. Fuente: Elaboración propia.



Figura 14: Zona de frecuencia 100 años, extremo B. Fuente: Elaboración propia.

5.2. Superficies potencialmente afectadas por amenaza de inundación

Luego de haber aplicado la clasificación de amenaza (Tabla 8) a las superficies inundables obtenidas, es posible observar las áreas de mayor a menor peligrosidad en los 9200 m de longitud del estero Quilque, concentrándose en la zona urbana las zonas de mayor peligro por inundación. Se puede apreciar en la Tabla 10 las áreas amenazadas a lo largo del estero Quilque.

| Niveles de amenaza | Área inundada (Ha) |
|--------------------|--------------------|
| Alto | 7,875 |
| Medio | 17,857 |
| Bajo | 21,039 |

Tabla 10: Superficies amenazadas. Fuente: Elaboración propia. Se aprecian las superficies totales para cada nivel de amenaza del estero Quilque.

Se dividieron las zonas de amenaza del estero Quilque según los tramos designados en la Figura 5, y para un análisis más detallado se utilizó la Figura 2 más el PRC (2015) para cada área amenazada.

En el tramo llamado “Extremo A”, se puede observar en la Figura 15, que gran parte de Costanera Quilque hasta la Av. Las Industrias, presenta una amenaza media y baja, siendo esta zona de uso mixto. También se puede observar una amenaza alta que afecta principalmente a la zona norte-este, que según el PRC (2015), esta zona es de uso habitacional y de inundación por cauces naturales.

Zonas de riesgo amenazadas por inundación

Ciudad de Los Ángeles, extremo A



Leyenda

- Estero Quique
- Amenaza alta
- Amenaza media
- Amenaza baja

0 0.075 0.15 0.3 0.45 0.6 Kms

Escala 1: 9.000

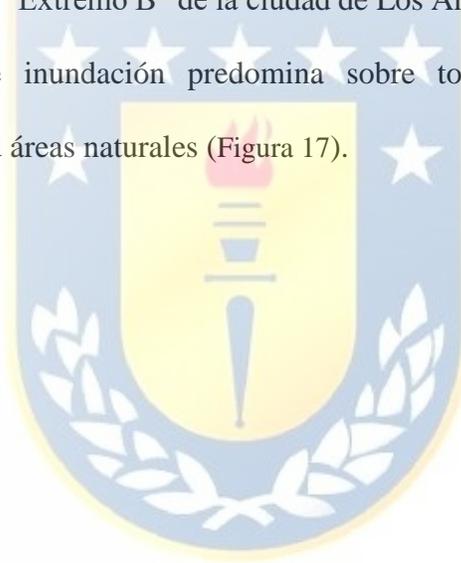
Autor: Yerko Rodríguez Jofré

Fuente de datos: Elaboración propia
Sistema de coordenadas: Universal
Transversal Mercator, WGS 1984,
Huso 18 S

Figura 15: Zonas de riegos amenazadas por inundación, extremo A. Fuente: Elaboración propia.

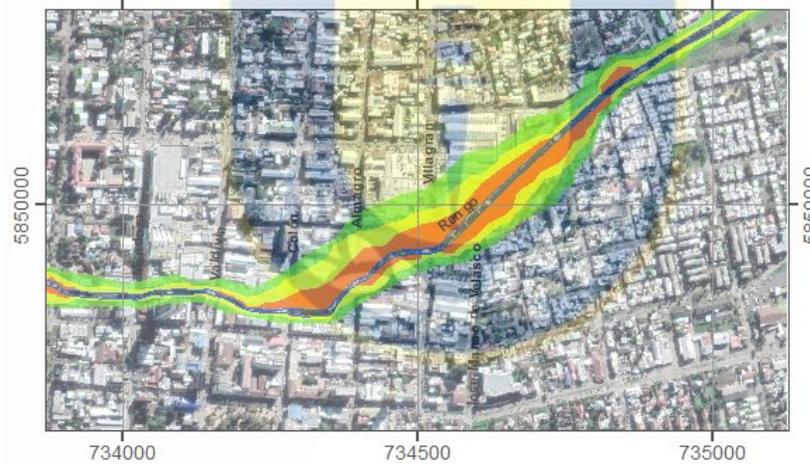
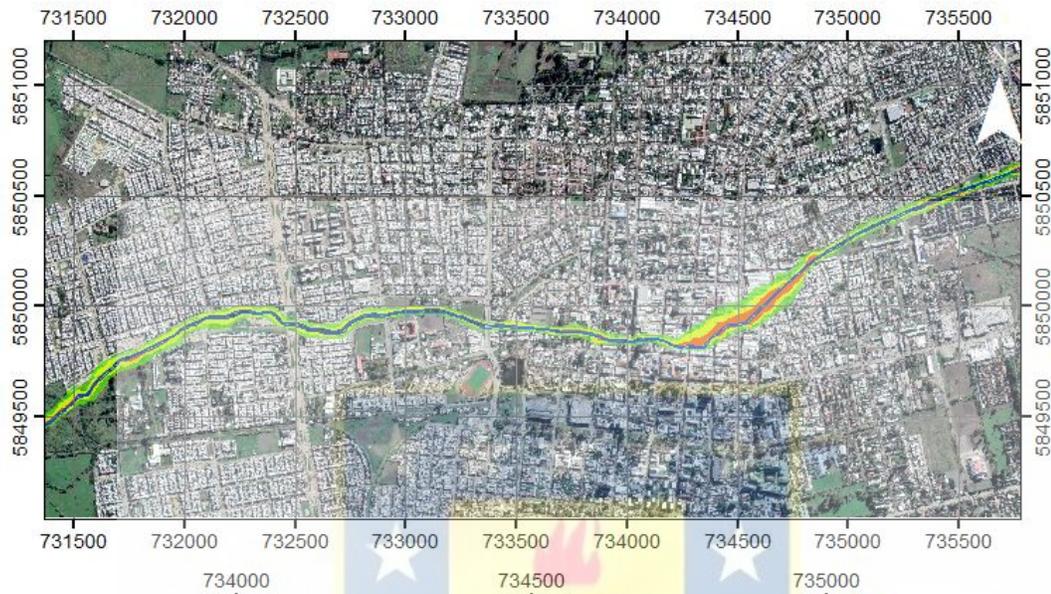
Para el tramo del “Sector Urbano”, la zona de amenaza alta se ubica principalmente en el centro de la ciudad, desde calle Colón hasta Costanera Quilque, siendo afectada una amplia zona mixta de comercio, y en menor cantidad la zona oeste del tramo, comprometiendo zonas de espacio público cercanas al Parque Urbano estero Quilque. Para el resto del estero predomina zonas de amenaza media y baja afectando zonas habitacionales consolidadas, de espacio público y mixtas (Figura 16).

Finalmente, para el tramo del “Extremo B” de la ciudad de Los Ángeles, se puede apreciar que la amenaza media de inundación predomina sobre todo el estero Quilque, predominando en su totalidad áreas naturales (Figura 17).



Zonas de riesgo amenazadas por inundación

Ciudad de Los Ángeles, sector urbano



Leyenda

- Estero Quique
- Amenaza alta
- Amenaza media
- Amenaza baja



Escala 1: 24.000

Autor: Yerko Rodríguez Jofré

Fuente de datos: Elaboración propia
Sistema de coordenadas: Universal
Transversal Mercator, WGS 1984,
Huso 18 S

Figura 16: Zonas de riesgos amenazadas por inundación, sector urbano. Fuente: Elaboración propia.

Zonas de riesgo amenazadas por inundación

Ciudad de Los Ángeles, extremo B



Leyenda

- Estero Quique
- Amenaza alta
- Amenaza media
- Amenaza baja

0 0.125 0.25 0.5 0.75 1 Kms

Escala 1: 13.000

Autor: Yerko Rodríguez Jofré

Fuente de datos: Elaboración propia
Sistema de coordenadas: Universal
Transversal Mercator, WGS 1984,
Huso 18 S

Figura 17: Zonas de riesgos amenazadas por inundación, extremo B. Fuente: Elaboración propia.

6. Conclusiones

De los resultados conseguidos con el modelamiento hidráulico en el software HEC-RAS, estos logran estimar las inundaciones en tramos específicos del estero Quilque, es decir, sirven como base para la obtención de mapas de amenazas por inundación. No obstante, esta simulación debe complementarse con un modelo topográfico al detalle de este estero, además de una mayor captura de información topográfica en la llanura de inundación correspondiente y con información recopilada desde la ciudadanía para diversos puntos del estero Quilque respecto a la altura de inundación.

Las encuestas realizadas a los locatarios afectados para el evento del año 2018, concuerda en su mayoría con el modelo obtenido del software HEC-RAS, es decir, estas resultaron fundamentales para la validación del modelo.

La superficie inundable total, desde amenaza baja a una alta, es de aproximadamente 46,771 Ha. De esta superficie el 70% corresponde a un uso urbano por lo que da una idea del impacto social del problema de estudio. Además, se puede inferir de la superficie inundable total, que el 16,84% es de amenaza alta, el 38,18% de amenaza media y el 44,98% de amenaza baja.

Las precipitaciones consultadas para los días previos a la inundación, no demostraron una similitud coherente con respecto a las crecidas de los caudales. Esto pudo haberse dado, debido a que el agua del estero es usada para usos industriales, urbanos y para receptáculo de residuos sólidos (PRCLA, 2005), teniendo diversas desviaciones a lo largo de su extensión. Por esta razón, la variable caudal fue usada en este proyecto para el cálculo de frecuencia y no las precipitaciones.

Con los resultados obtenidos y luego de haber utilizado tres niveles de amenaza, con combinación de tres frecuencias, fue posible hacer la determinación de zonas amenazadas por inundación mediante un mapa. Se determinaron zonas con amenaza baja a lo largo del estero, principalmente en los sectores extremos no urbanos de la ciudad de Los Ángeles, como el sector oriente y zonas aledañas a Av. El Aromo y Av. Ferrocarril. Si bien estas zonas son de uso público y de uso habitacional, la población debe ser sensibilizada ante la existencia de amenazas bajas, de manera que adopten un comportamiento adecuado ante este tipo de amenazas.

Las zonas que exponen una amenaza media priman sobre el estero en la zona urbana, principalmente en zonas habitacionales y mixtas, como el parque urbano estero Quilque y el Mercado Central de Los Ángeles. Estas zonas, debiesen ser estudiadas en profundidad, y analizar diversas posibilidades para mejorar la capacidad de transporte de agua.

Finalmente, las zonas que se exponen a una amenaza alta, no debiesen ser aptas para nuevas instalaciones, expansión o densificación de asentamientos humanos, no obstante, resultaría muy costoso la expropiación de viviendas para estas zonas, ya que afectaría la economía local del centro de la ciudad de Los Ángeles, por lo que se deberían tomar todas las precauciones para las edificaciones existentes, en cuanto a una alerta temprana, mejoramiento de infraestructura del estero (revestimiento completo, aumento de altura de las paredes del estero, etc.) y mantención constante de los desechos y residuos que transporta el estero Quilque. Las zonas principalmente amenazadas corresponden al centro urbano de la ciudad, específicamente entre calle Almagro y Rengo, y la villa Domingo Contreras Gómez.

Al tener como referencia el caudal máximo para diversos periodos de retorno, es posible obtener el periodo de frecuencia para el evento hidrometeorológico del año 2018. Este evento registra un periodo de retorno de 7 años aproximadamente, es decir, que la probabilidad de que ocurra un evento con las mismas características del año 2018 es de un 14,3%.

No se conoce un caudal mínimo que desborde al estero Quilque, a no ser que se realice un análisis exhaustivo en la variación de caudales durante el día del evento hidrometeorológico. No obstante, es factible decir que sobre un caudal de $9,37 \text{ m}^3/\text{s}$ el estero sufre desbordamientos.

Debido a la morfología del estero Quilque, se determinó que al aumentar el caudal del río para 10, 50 y 100 años de frecuencia, se repetían los mismos tramos desbordados, pero con mayor intensidad, estos tramos principalmente se encontraban en zonas de pronunciadas curvas, en secciones angostas del estero y en zonas con pendiente pronunciada.

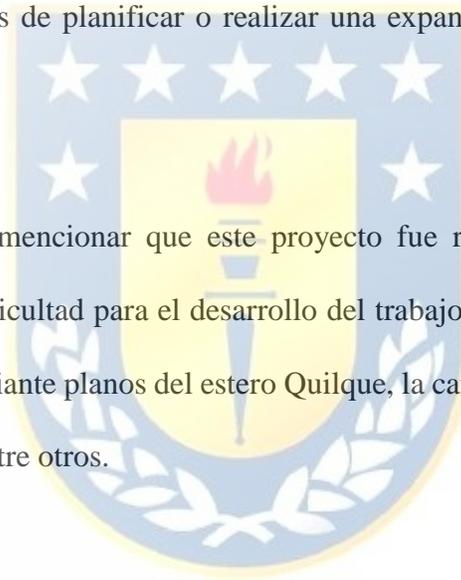
Las inundaciones pueden afectar desde daños materiales hasta incluso causar daños a las personas, siendo necesario tomar resguardos preventivos. Una buena forma de prevenir es informar y dar conocimiento a la ciudadanía de los sectores ribereños que se encuentren amenazados por inundaciones; ya que a medida que pasa el tiempo siguen edificando sus viviendas en lugares que tienen amenaza latente y peligrosa.

El desarrollo de la cartografía cumple un rol importante para este trabajo, ya que ayuda a tratar y ordenar los resultados obtenidos de la simulación, abriendo más posibilidades de analizar y determinar las áreas afectadas por este fenómeno, mediante una clasificación de amenaza legible y clara. Además, los mapas de amenaza por inundación resultan de gran

apoyo para el ordenamiento territorial de una comuna, región, país, etc., siendo una herramienta valiosa para informar y educar a la ciudadanía con un lenguaje gráfico más simple y accesible para todo tipo de personas sobre la amenaza.

Además, aunque no existan asentamientos humanos o edificaciones en una zona determinada, la amenaza siempre existirá, por lo que es importante anticiparse e informar sobre la amenaza en sectores que, si bien hoy no son relevantes, es posible tomar las precauciones necesarias antes de planificar o realizar una expansión urbana o cualquier otra actividad.

Y finalmente, es necesario mencionar que este proyecto fue realizado en periodo de pandemia, aumentando la dificultad para el desarrollo del trabajo. Esta situación justifica la obtención topográfica mediante planos del estero Quilque, la cantidad de entrevistas, las limitadas visitas a terreno, entre otros.



7. Sugerencias y recomendaciones

Es necesario indicar que el modelo topográfico que se ocupó presenta un gran detalle en los 9200 m de longitud del estero Quilque, no obstante, carece de información en las llanuras de inundación, por lo que se recomienda realizar un trabajo en terreno con una amplia cobertura de detalle, abarcando zonas más extensas de manera transversal al estero.

Los modelos hidráulicos siempre estarán sujeto a errores, y complementarlo con las alturas de las entrevistas logran aproximar el proyecto más a la realidad. Por lo tanto, se recomienda y se sugiere tener una cantidad considerable de encuestas realizadas a los locatarios afectados, primando la buena distribución espacial de estas a lo largo de la zona de estudio.

La metodología empleada permitió obtener los resultados esperados, pero aún pueden ser mejorados si los trabajos en terreno, tanto topográficos como hidrológicos, son mejorados en precisión y detalle.

En términos de seguridad, hay que tener presente que, aunque exista una mínima inundación del estero, las edificaciones aledañas que posean subterráneos, podrían verse involucradas en un riesgo mayor, debido la presencia de cableado eléctrico, ascensores, estacionamientos, entre otros, por ejemplo, el caso específico del Mall plaza Los Ángeles, ubicado a pocos metros del estero Quilque. Por este motivo, se sugiere implementar un sistema de alerta temprana para estas zonas, a modo de adelantarse y minimizar el impacto.

8. Referencias

- Adhikari, P., Hong, Y., Douglas, K.R., Kirschbaum, D.B., Gourley, J., Adler, R. & Brakenridge, G. (2010). A digitized global flood inventory (1998-2008): compilation and preliminary results. *Natural Hazards*.
- Aguilera, M. (2007). Estimación de funciones de distribución de probabilidad, para caudales máximos, en la región del Maule (Tesis de pre-grado). Universidad de Talca, Chile.
- Ambrosino, S; Barbeito. O; Bertoni, JC; Daniele, A; Maza, JA; Paoli, CU; Serra, JJ. 2004. Inundaciones urbanas en Argentina. Córdoba, Argentina, Global Water Pathernship / Universidad Nacional de Córdoba / Comisión Permanente de Congresos del Agua / Arg Cap Net. 256 p.
- Aparicio, F. 1997. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Balderas, México: Limusa. 303 p.
- Baeriswyl, S. (2014). Resiliencia urbana; aprender a habitar con las amenazas de la naturaleza. La experiencia del terremoto y tsunami de 2010 en las costas del Bío-Bío. *Revista Márgenes* (15), 11, 7-16.
- BiobiChile (2018). “Primera lluvia, primeras inundaciones: decretan alerta roja en Los Ángeles por crecida del estero Quilque”. Recuperado el 28 de diciembre de: <https://www.publimetro.cl/cl/noticias/2018/05/28/primera-lluvia-primeras-inundaciones-decretan-alerta-roja-los-angeles-crecida-estero-quilque.html>
- Bloch, R. (2012). “*Ciudades e Inundaciones*”, Global Facility for Disaster Reduction and Recovery. Acceido el 27 de diciembre desde: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/950451468148161242/ciudades-e-inundaciones-gu-237-a-para-la-gesti-243-n-integrada-del-riesgo-de-inundaciones-en-ciudades-en-el-siglo-21>
- CENAPRED. (2009). Inundaciones. Sistema nacional de protección civil. Recuperado el 01 de diciembre del 2020 de: http://pcivil.michoacan.gob.mx/wp-content/uploads/2018/02/Folleto_de_Inundaciones.pdf

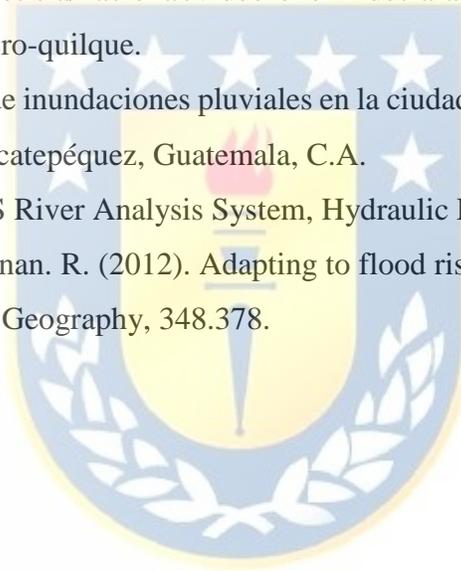
- Chereque, W. (1993). *Mecánica de Fluidos 2*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- Chilito, E. (2018). *Definición de zonas de inundación mediante el uso del modelo de simulación HEC-RAS en un tramo de Caño grande, Barrio el Rubi-Villavicencio* (Tesis de grado). Universidad Santo Tomás, Villavicencio.
- Chow, V.; Maidment, D.; Mays, L. 1994. *Hidrología aplicada*. Colombia. Editorial McGraw-Hill. Interamericana S.A. 584 p.
- CNNChile (2018). “Aumento de caudal del estero Quilque inundo las calles en Los Ángeles”. Recuperado el 28 de diciembre de: https://www.cnnchile.com/pais/aumento-de-caudal-del-estero-quilque-inundo-las-calles-en-los-angeles-2_20180528/
- COSUDE. (2005). *Inundaciones Fluviales y Mapas de Amenazas*. Accedido el 15 de septiembre, 2020, desde <https://docplayer.es/31122329-Inundaciones-fluviales-mapas-de-amenazas-recomendaciones-tecnicas-para-su-elaboracion.html>
- Cooperativa (2018). “Onemi declara Alerta Roja en Los Ángeles por intensas lluvias y desborde de estero”. <https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/desastres-naturales/inundaciones/onemi-declara-alerta-roja-en-los-angeles-por-intensas-lluvias-y-desborde/2018-05-28/105626.html>
- Center for Climate and Resilience Research (2021). *Visualizador Meteorológico*. Accedido el 26 de enero del 2021 de: <http://vismet.cr2.cl/>
- Del rio, L., Serrano, E. (2014). *Paisajes en vías de extinción: Los glaciares en Pico de Europa y Pirineos*. Recuperado el 01 de diciembre del 2020 de: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4856777.pdf>
- Departamento de Urbanismo. (2009). *Revista de Urbanismo N°25*. Recuperado el 2 de enero de: <http://revistaurbanismo.uchile.cl>
- Di Castri, F., Hajek, E. *Bioclimatología de Chile*. Santiago de Chile: Universidad Católica de Chile, 1976.
- Dirección General de Aguas. (2020). *Datos Hidrológicos*. Recuperado el 09 de septiembre desde 2020, de Dirección General de Aguas: <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>

- Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (UNISDR). 2009. Terminología sobre reducción del riesgo de desastres. Ginebra, Suiza. 43 p.
- Elízaga, E.; Garay, P. y Gutiérrez, P. (1983): *El mapa de Riesgos Geológicos como documentación preventiva ante la dinámica fluvial de la cuenca baja del río Júcar*, en 2ª Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio, 7-23.
- FAO. (2020). Tipo de peligros y de emergencias. Inundaciones. Accedido el 29 de diciembre, 2020 desde <http://www.fao.org/emergencias/tipos-de-peligros-y-de-emergencias/inundaciones/es/>
- Fernández de Córdova C. J., León A., Rodríguez Y., Martínez P., Meneses D. (2018). “Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales”. Ing. Hidráulica y Ambiental. Vol. 39, No. 1, p 17–31. ISSN 1680-0
- Fernandez de Cordova, C., Rodríguez, Y., León, A. (2020). Influencia del coeficiente de rugosidad de Manning en las áreas de inundacion del rio Yunancay en Cuenca. ResearchGate.
- González, J. (2014). La Gestión del riesgo de desastre en las inundaciones de Colombia: Una mirada crítica.
- González, L., Baeriswyl, S., Zazo, A. y Alvarado S. (2019). Modelo de evaluación de resiliencia urbana frente a inundaciones fluviales. Papel potencial de los planes reguladores comunales en Chile.
- HERAS, R. (1983). Recursos Hidráulicos. Síntesis, metodología y normas. Cooperativa e Publicaciones del Colegio e Ingenieros e Caminos, Canales y Puertos. España, 361 p.
- Huancas, C. (2019). Modelamiento hidráulico con Hec-ras para la prevención de inundaciones desde el km 44+100 al km 49+100 en el Rio Reque (Tesis de pregrado). Universidad César Vallejo, Perú.
- Iraira, D. (2016). Análisis de inundaciones en el centro urbano de Los Ángeles, por desborde del Estero Quilque (Tesis de pregrado). Universidad del Biobío, Concepción, Chile.

- Joy, J., Kumar, S., Kanga, S. (2019). Kerala Flood 2018: Flood Mapping by Participatory GIS approach, Meloor Panchayat. *International Journal on Emerging Technologies* 10(1): 197-205(2019).
- León A. y Martínez Y. (2013). “Hidráulica de las Conducciones Libres”, Editorial Poligráfica Félix Varela, ISBN 978-959-07-1867-0, La Habana, Cuba.
- Linsley, R.; Kohler, M.; Paulus, J. 1988. *Hidrología para ingenieros*. 2 ed. México. Editorial McGraw-Hill Interamericana S.A. 386 p. Llamas, J. 1993. *Hidrología general*. Servicio editorial del País Vasco. España. 635 p.
- López, L. (2017). Procedimiento para la simulación hidráulica a partir del software ArcGIS y HEC-RAS para eventos extremos máximos (Tesis de diplomado). Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba.
- Mamani, R., Ramirez, D. (2020). Definición de zonas de inundación mediante el modelo de simulación Hec-Ras en la Cuenca baja del río Coata- Puno.
- MappingGIS. (2014). SAS Planet: descarga imágenes de Google, Bing, etc. Recuperado el 29 de diciembre de <https://mappinggis.com/2014/09/como-descargar-imagenes-de-google-bing-etc/>
- Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública (ONEMI), (2018). Plan de Reducción de Riesgo de Desastre. Región del Biobío. Recuperado de http://repositoriodigitalonemi.cl/web/bitstream/handle/2012/1873/P-PRRD-PO-ARD-04_VIII_21.11.2018.pdf?sequence=5
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2016). Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2015. OMM N°1167. Disponible en https://library.wmo.int/?lvl=notice_display&id=19136#.X-oCZVVKjccc. Acceso diciembre 2020.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2021). Inundaciones. Disponible en <https://www.who.int/hac/techguidance/ems/floods/es/>
- Ormeling, B. (2014). Mapas Topográficos. F. Ormeling, B. Rystedt & ICA (Eds). *El mundo de los mapas* (pp. 33-38). Suecia: ICA.
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance, Climate Change Adaptation Special

- Report of the IPCC. Cambridge: Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- Pérez, I., Andaur, C. (2005). Ciudad Imaginada, ciudad planificada. Planificación urbana de Los Ángeles (Chile) en el siglo XX. ResearchGate.
- Peña-Guzmán, C., Alvarino, N., Mora, C., Mesa, D. (2016). Determinación de Áreas de Inundación en el municipio de Chia- Colombia mediante Hec-Ras en la cuenca baja del Rio Frio. European Scientific Journal.
- Piñero, Á. (2014). Recomendaciones para Análisis y Diseño Hidráulico Unidimensional o Bidimensional y Capacidades de los Programas Hidráulicos Aprobados por el NFIP. ResearchGate.
- Pizarro, R.; Novoa, P. 1986. Elementos técnicos de Hidrología I. Instructivos técnicos. La Serena, Chile. Corporación Nacional Forestal, Ministerio de Agricultura. 57 p.
- Plan Regulador Comunal de Los Ángeles (PRCLA). (2005). Memoria Explicativa. Municipalidad de Los Ángeles.
- Plan Regulador Comunal de Los Ángeles (PRCLA). (2015). Ordenanza Local. Recuperado de <https://www.losangeles.cl/PRCLA2009/Index.htm>
- Ribera, M. L. (2004). Los mapas de riesgo de inundaciones: representación de la vulnerabilidad y aportación de las innovaciones tecnológicas. *Doc. Anal. Geogr.* 43, 153-171.
- Rodríguez, W., Valcarce, R. 2005. Aplicación SIG para evaluar el peligro de inundaciones. Conferencia: Geociencias: Geociencia, La Habana, Cuba.
- Rojas, N. (2011). Curvas de intensidad Duración Frecuencia de algunas estaciones meteorológicas automáticas. Departamento de climatología e investigaciones Aplicadas.
- 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>
- Rystedt, B. (2014). Cartografía. F. Ormeling, B. Rystedt & ICA (Eds). *El mundo de los mapas (7-13)*. Suecia: ICA.

- Saltos, M., Cadena, C., Villalta, C. (2018). Comparacion de tipos de flujos, para diferentes secciones de canales.
- Sciortino, J. (2019). Elementos de Hidrología. Apuntes Cátedra Hidráulica Aplicada, Facultad de ingeniería, UNSa.
- Sepúlveda, F. (2014). Zonas amenazadas por inundación del rio Biobio entre San Rosendo y la desembocadura (Tesis de pregrado). Universidad del Bio-Bio, Concepción, Chile.
- T13 (2018). “[VIDEO] Onemi declara Alerta Roja en Los Ángeles por intensas lluvias y desborde de estero”. Recuperado el 28 de diciembre del 2020 de: <https://www.t13.cl/noticia/nacional/video-onemi-declara-alerta-roja-angeles-aumento-caudal-estero-quilque>.
- Turcios, H. (2009). Análisis de inundaciones pluviales en la ciudad de Antigua Guatemala, Departamento de Sacatepéquez, Guatemala, C.A.
- USACE. (2016). HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual 5.0.
- Wilby, R., L. & Keenan. R. (2012). Adapting to flood risk under climate change. *Progress in Physical Geography*, 348.378.



- Registro fotográfico de la inundación del 28 de mayo del 2018.



Figura 19: Captura calle Villagrán con calle Rengo. Fuente: Radio Bio-bío.



Figura 20: Captura de inundación. Fuente: Radio Bio-bío.



Figura 21: Estero Quilque. Fuente: Radio Bio-bío.



Figura 22: Inundación sector urbano. Fuente: Radio Cooperativa.