



UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN

SEDE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL DEL RÍO BÍO BÍO ANTE EVENTO DE
ROMPIMIENTO DE PRESA ANGOSTURA**

Memoria para Optar el Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: MSc. Patricio Ignacio Fuentes Aguilera

Alumno: Cristian Mauricio Yáñez Paredes

Concepción, Agosto, 2019

© Cristian Mauricio Yáñez Paredes.

**Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con
fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento
siempre y cuando se incluya cita bibliográfica del documento.**

CALIFICACIÓN DE LA MEMORIA.

En Concepción, el de de, los abajo firmantes dejan constancia que el alumno Cristian Mauricio Yáñez Paredes de la carrera Ingeniería Civil ha aprobado la memoria para optar al título de Ingeniero Civil con una nota de _____.

Profesor MSc. Patricio Fuentes Aguilera

Profesor MSc. Patricio Uarac Pinto

AGRADECIMIENTOS.

En vista de que la gratitud se gesta sobre la convicción de que los seres humanos somos incompletos y que nos necesitamos mutuamente; que también es un sentimiento tenue y sofisticado, casi un arte; y que este concepto no solo es la más grande de las virtudes, sino que engendra todas las demás; he pensado e intentado redactar esta página sin haber podido encontrar las palabras correctas para expresar mi profunda gratitud hacia Dios, mi familia, y cada una de las personas que colaboró en el desarrollo de este proyecto. Es más; descubrí que cuando esta gratitud es tan absoluta, las palabras sobran.

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN	14
1.1 INTRODUCCIÓN.....	14
1.2 MOTIVACIÓN.....	15
1.3 OBJETIVOS.	16
1.3.1 Objetivo general.....	16
1.3.2 Objetivos específicos.....	16
1.4 ALCANCES.	17
1.5 METODOLOGIA DE TRABAJO.....	17
1.6 ZONA DE ESTUDIO.....	18
CAPÍTULO 2 – MARCO TEÓRICO	28
2.1 HEC-RAS.	28
2.1.1 Procedimientos de cálculo del software.	29
2.1.2 Hidrodinámica del flujo no estacionario unidimensional.	32
2.1.3. Instalación y ruptura de presa.	37
2.2 CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	39
2.2.1 Centrales Hidroeléctricas de Embalse.....	40
CAPÍTULO 3 – RESULTADOS.....	43
3.1 MODELO UNIDIMENSIONAL DEL RÍO BIOBÍO.....	44
3.1.1 Determinación del Coeficiente de Rugosidad.....	46
3.1.2 Condiciones Iniciales Modelo Hidráulico.	47
3.1.3 Condiciones de Borde Modelo Hidráulico.....	49
3.1.4 Modelo de Rompimiento de Presa	59
3.1.5 Desborde del río Biobío.....	61

CAPÍTULO 4 – CONCLUSIONES	74
4.1 FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	78
CAPÍTULO 5 – REFERENCIAS.....	79

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1.1. Uso del suelo de la cuenca del río Biobío.....	26
Tabla 2.1. Potencial de Desarrollo Hidroeléctrico de Chile.....	42

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1.1. Cuenca Río Biobío con su red de drenaje.	19
Figura 1.2. Localidades y tributarios importantes del río Biobío.	20
Figura 1.3. Ubicación geográfica de la estación fluviométrica Río Lonquimay, antes junta río Biobío, dentro de la Cuenca del río Biobío.	22
Figura 1.4. Curva de variación estacional estación fluviométrica Río Lonquimay antes junta río Biobío.	22
Figura 1.5. Ubicación geográfica de la estación fluviométrica Río Biobío en Coihue, dentro de la cuenca del río Biobío.	23
Figura 1.6. Curva de variación estacional, estación fluviométrica Río Biobío en Coihue.	24
Figura 1.7. Ubicación geográfica de la estación fluviométrica Río Biobío en Desembocadura, dentro de la cuenca del río Biobío.	25
Figura 1.8. Curva variación estacional estación fluviométrica Río Biobío en Desembocadura.	25
Figura 2.1. Representación gráfica de los parámetros que formal la ecuación de energía.....	30
Figura 2.2. Volumen de control elemental para la derivación de las ecuaciones de continuidad y momentum.....	33
Figura 2.3. Diseño de la sección transversal para una simulación dinámica completo a través de un embalse.	38
Figura 2.4. Esquema de una central hidroeléctrica típica, con una presa utilizada para la creación de un embalse	40
Figura 2.5. Embalse de Central Hidroeléctrica Grand Inga Dam, en República Democrática del Congo, África.	41
Figura 3.1. Cuenca del río Biobío, obtenida mediante software Global Mapper.	43
Figura 3.2. Geometría y ubicación geográfica de los perfiles transversales para la modelación hidráulica del río Biobío.	45

Figura 3.3. Límites del río Biobío con sus riberas al lado izquierdo y derecho, señaladas en los puntos de color rojo para cada perfil transversal.....	46
Figura 3.4. Hidrograma de caudales estación Río Biobío antes junta Pangue.	48
Figura 3.6. Subcuenca de tributarios más relevantes del río Biobío	49
Figura 3.7. Cuenca del río Nicodahue y su relación de superficies con la cuenca hasta la estación Río Nicodahue en Pichún.	50
Figura 3.8. Hidrograma de Caudales, de río Nicodahue en la confluencia con el río Biobío	51
Figura 3.9. Cuenca del río Lirquén y su relación de superficies con la cuenca hasta la estación Río Lirquén en Cerro El Padre.	52
Figura 3.10. Hidrograma de Caudales, de río Lirquén en la confluencia con el río Biobío.....	52
Figura 3.11. Cuenca del río Duqueco y su relación de superficies con la cuenca hasta la estación Río Duqueco en Cerrillos.	53
Figura 3.12. Hidrograma de Caudales, de río Duqueco en la confluencia con el río Biobío.	54
Figura 3.13. Cuenca del río Laja y su relación de superficies con la cuenca hasta la estación Río Laja en Puente Perales.	55
Figura 3.14. Hidrograma de Caudales, de río Laja en la confluencia con el río Biobío.....	55
Figura 3.15. Cuenca del río Vergara y su relación de superficies con la cuenca hasta la estación Río Vergara en Tijeral.	56
Figura 3.16. Hidrograma de Caudales, de río Vergara en la confluencia con el río Biobío.....	57
Figura 3.17. Cuenca del río Bureo y su relación de superficies con la cuenca hasta la estación Río Bureo en Mulchén.	58
Figura 3.18. Hidrograma de Caudales, de río Bureo en la confluencia con el río Biobío.....	58
Figura 3.19. Hidrograma de Caudales y de Alturas en la parte baja del río Biobío, entregado por software bajo las condiciones de modelación.....	59

Figura 3.20. Comparación de hidrogramas de caudales de tormenta 2006 en escenario real, y bajo las condiciones de modelación.	60
Figura 3.21. Ubicación geográfica del embalse Angostura y tramo del cauce en estudio.	61
Figura 3.22. Parte baja del río Biobío, previo a la crecida generada por el rompimiento de la compuerta y las intensas lluvias.	62
Figura 3.23. Parte baja del río Biobío, posterior a la crecida generada por el rompimiento de la compuerta y las intensas lluvias.	63
Figura 3.24. Río Biobío en la comuna de Hualqui, antes de la llegada de la ola de crecida.	64
Figura 3.25. Río Biobío en la comuna de Hualqui, una vez llegada la ola de crecida, y zonas de desborde.	65
Figura 3.26. Río Biobío en la comuna de Chiguayante, antes de la llegada de la ola de crecida.	66
Figura 3.27. Río Biobío en la comuna de Chiguayante, una vez llegada la ola de crecida, y zonas de desborde.	67
Figura 3.28. Río Biobío en la comuna de Concepción, antes de la llegada de la ola de crecida.	68
Figura 3.29. Río Biobío en la comuna de Concepción, una vez llegada la ola de crecida.	68
Figura 3.30. Río Biobío en la comuna de Hualpén, antes de la llegada de la ola de crecida. e Hualpén, antes de la llegada de la ola de crecida.	69
Figura 3.31. Río Biobío en la comuna de Hualpén, una vez llegada la ola de crecida, y zonas de desborde.	70
Figura 3.32. Río Biobío en la comuna de San Pedro de la Paz, antes de la llegada de la ola de crecida.	71
Figura 3.33. Río Biobío en la comuna de San Pedro de la Paz, una vez llegada la ola de crecida, y zonas de desborde.	71
Figura 3.34. Fotografía aérea durante el evento de inundación del 2006, en las comunas de Concepción y San Pedro de la Paz.....	72

Figura 4.1. Superficie de la cuenca del río Biobío no considerada en las condiciones de borde.....	75
Figura 4.2. Hidrograma de caudales estación Río Biobío en Desembocadura, en el invierno de 1997.....	77

RESUMEN.

El río Biobío es uno de los sistemas fluviales más importantes de Chile, puesto que es de gran relevancia histórica y económica. Recorre desde la Cordillera de los Andes hasta el Océano Pacífico con una longitud de 380 km. Su cuenca es una de las más extensas del país con 24.029 km²; con un régimen mixto, presentando crecidas entre invierno y primavera.

Este curso fluvial presenta gran potencial de generación de energía hidroeléctrica. Prueba de esto son las centrales de Pangue, Ralco y Angostura que se ubican en su cauce. Debido a lo anterior, se hace necesario conocer los efectos que tiene la falla de estas grandes presas,⁷ en las localidades ubicadas aguas abajo del río Biobío.

Se realizó una modelación unidimensional en el software HEC-RAS para evaluar las zonas más vulnerables a desbordes dentro del curso fluvial a causa de este tipo de eventos, considerando específicamente una falla de la represa Angostura. Se utilizó la tormenta ocurrida en la zona en julio del año 2006 como base para las condiciones iniciales y de borde, y para comparar las consecuencias de los sectores inundados detectados en el modelo, los cuales se encuentran ubicados en los últimos 40 kilómetros del cauce. De esta forma se logró obtener que el tiempo de arribo de la ola de crecida desde la ubicación del embalse hasta la desembocadura del río Biobío es de 19 horas.

ABSTRACT.

The Biobío River is one of the most important fluvial systems in Chile, because it has a big economic and historic relevance. It goes from Cordillera de los Andes to Pacific Ocean, with a length of 380 km. The Biobío river watershed is one of the most extensive in the country. It has 24.029 km² with a mixed regimen, increasing between winter and spring.

This river presents great potential for hydroelectric power generation. A proof of that are the centrals of Pangue, Ralco and Angostura. All of them are located on the channel of the Biobío river. Therefore, it is a necessity to know the effects on the localities downstream the river produced by the dam failure.

An hydraulic unidimensional model was run using the HEC-RAS software to evaluate the zones that are more vulnerable in front of a inundation in the fluvial course because this kind of events, specifically considering a fail on Angostura dam. To execute the model, the July 2006 storm (last big flood in the area) was used as base for initials and boundary conditions, also to compare the consequences of the flooded sectors that has been detected in this model, which are located in the last 40 km of the -channel. Thereby, it was possible to get the arrival time of the flood wave between the dam and Biobio river mouth, which is 19 hours.

CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN.

1.1 INTRODUCCIÓN.

Dentro del mundo, Chile es un país privilegiado en materia de recursos hídricos, contando con aproximadamente 4,300 kilómetros de costa en toda su extensión; sumado al agua dulce que se agrupa en 101 cuencas hidrográficas, las que poseen 1,251 ríos y 12,784 cuerpos de agua (MOP, 2016). De éstas, se puede obtener gran variedad de beneficios, siendo los más significativos la elevada biodiversidad y la cantidad de hábitat que alberga para el desarrollo de toda la flora y fauna existente en la zona, además de potenciar las fuentes de recursos, de vida y económicas para los seres humanos (Sánchez, 2018). No obstante, la naturaleza también opta por comportamientos que pueden generar un daño a todo este entorno, ya sea instantáneo o a largo plazo.

A nivel local, la cuenca del río Biobío es una de las más grandes del país. Su superficie es de 24,029 km², y la longitud de su cauce principal es de 380 km. Éste recorre en gran parte la región del Biobío, desde su nacimiento en las Lagunas Galletué e Icalma, pertenecientes a la región de la Araucanía. Es uno de los principales cursos fluviales del país tanto por sus características geográficas, como por su importancia económica e histórica. Tiene un caudal medio de 899 m³/s y el mayor potencial eléctrico de todos los ríos del país, con un total estimado de 2,452 MW (Revista Energética de Chile, 2016), como lo demuestran las centrales hidroeléctricas instaladas en medio de su cauce: Ralco, Pangue y Angostura, con una generación de 690 MW, 467 MW y 323 MW, respectivamente. La construcción de cada una de estas megaestructuras, implica una intervención de gran impacto, pudiendo ser este muy positivo, por ejemplo a nivel económico, pero también negativo a nivel ambiental o social, más aún si se considera el colapso o falla de estas represas.

1.2 MOTIVACIÓN.

El agua es un recurso fundamental e indispensable para todos. Ésta puede entregar una enorme cantidad de beneficios para el sustento de la vida, pudiendo ser también materia prima para la obtención de otros medios necesarios que van enfocados a una mejora en las condiciones de vida. Sin embargo, para que esto ocurra, debe moderarse su uso, ya que también es un recurso que, en ciertas condiciones, ya sea de “sobreabundancia” o “escasez”, puede ser muy dañino e incluso fatal.

Un ejemplo que utiliza el agua como materia prima es la generación de energía eléctrica previo a un largo proceso de transformación a otros tipos de energía. A este lugar se le conoce como central hidroeléctrica, que consiste en una represa que se instala en medio del cauce de un río, y según el potencial y caudal de éste, se pueden construir centrales de paso, o de embalse.

La construcción de cada una de estas represas genera un importante impacto ambiental, tanto para las zonas cercanas, como las que se encuentran aguas abajo. Por ejemplo, para la construcción del embalse de la central Angostura, se inundaron 641 hectáreas a su cota de operación normal de 317 msnm, donde 180 hectáreas corresponden a los cauces actuales de los ríos Huequecura y Biobío, en las comunas de Santa Bárbara y Quilaco. La capacidad de este embalse es de 100 millones de metros cúbicos (Colbún, 2008), por lo que pensar en una falla de la compuerta que sostiene esta masa de agua, sería fatal para muchas de las localidades aledañas al río Biobío aguas abajo, hasta su desembocadura en el Océano Pacífico.

Considerando, además, que desde los años '40, el río Biobío ha sufrido cerca de ocho eventos que han generado el desborde; y que actualmente se tienen los efectos del cambio climático que producen intensas lluvias, deshielos, entre otros factores (DGA, 2017); la probabilidad de un nuevo desborde se vuelve inminente y resulta esencial conocer el comportamiento del cauce y posibles riesgos.

1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 Objetivo general.

Determinar zonas de inundación aguas abajo de la Presa Angostura mediante modelación hidráulica unidimensional

1.3.2 Objetivos específicos.

Calibrar modelo unidimensional del río Biobío, utilizando como base la estadística hidrológica de la tormenta ocurrida en la zona el año 2006.

Determinar, mediante modelación hidráulica unidimensional, zonas de inundación ante eventos de crecida y rompimiento de presa Angostura en el río Biobío.

Determinar, de manera preliminar y bajo las condiciones de modelación, los tiempos de arribo de la onda de crecida a las diferentes localidades aguas abajo de la central Angostura.

Evaluar el uso de imágenes ASTER de tamaño 30 x 30 m como complemento de datos batimétricos obtenidos en terreno, para escenarios de modelación hidráulica.

1.4 ALCANCES.

Modelación unidimensional del río Biobío, con datos de topografía y batimetría de este curso fluvial, desde ubicación del embalse de la represa Angostura hacia aguas abajo, hasta su desembocadura en Océano Pacífico. Datos batimétricos son obtenidos en campaña de terreno, mientras que los datos topográficos corresponden a imágenes satelitales ASTER, con una resolución espacial de $30 \times 30\text{ m}$.

Calibración de modelo con datos de tormenta ocurrida en año 2006 (cercana a los 100 años de periodo de retorno). Además, se utilizará Global Mapper para la generación de la cuenca e información respecto a su superficie

1.5 METODOLOGIA DE TRABAJO.

La metodología de trabajo se puede resumir en los siguientes puntos:

Recopilación de antecedentes: Se procede a buscar el estado del arte en relación al río Biobío y la generación de energía en el mismo. Además, se recopila información relativa a la cuenca en estudio (tales como clima, uso de suelo, estacionalidad del río Biobío, geología de la cuenca, etc).

Generación de cuenca de río Biobío por medio de Global Mapper, en complemento con la herramienta Google Earth, identificando su red de drenaje para el cauce principal.

Estudio básico de HEC-RAS, poniendo énfasis en sus funciones principales como la generación de diferentes geometrías, elaboración de áreas de almacenamiento, instalación de estructuras hidráulicas (como represas). Además, se interpretan los resultados obtenidos en cada uno de los casos.

Modelación unidimensional del río Biobío con datos topográficos de sus perfiles transversales, desde la ubicación del embalse de la Central Hidroeléctrica

Angostura hasta su desembocadura, incluyendo como caudal lateral los principales tributarios de este cauce. Posteriormente incluir la represa en el modelo y generar el caso hipotético de la rotura de la compuerta de esta, estudiando los resultados del comportamiento del río.

Analizar, aguas abajo de la represa, los posibles puntos de desborde de río y las zonas de inundación, detectando las más vulnerables tanto por su ubicación geográfica como por su asentamiento dentro de la cuenca.

1.6 ZONA DE ESTUDIO.

La cuenca del río Biobío forma parte de la zona centro-sur de Chile, comprendida geográficamente entre los paralelos 36°42' – 38°49' Latitud Sur y los meridianos 71°– 73°20' Longitud Oeste. Político-administrativamente cubre cerca del 72% el territorio de las provincias de Concepción, Biobío y parte de la región de Ñuble, mientras que el 28% restante corresponde a las provincias de Malleco y Cautín pertenecientes a la región de la Araucanía. (Figura 1.1).

Dentro de su curso, el Biobío se tributa de aguas de importantes ríos, y otros de menor magnitud. Cerca de su nacimiento, confluyen ríos de pequeño caudal, siendo el más relevante de estos el río Lonquimay. Mucho más al norte, tributa el río Huequecura, confluencia en la que se encuentra el embalse de la hidroeléctrica Angostura, en la comuna de Santa Bárbara. Próximo a la localidad de Nacimiento, en su curso medio, el Biobío recibe al río Vergara, su tributario meridional más importante.

CAPITULO 1- INTRODUCCIÓN

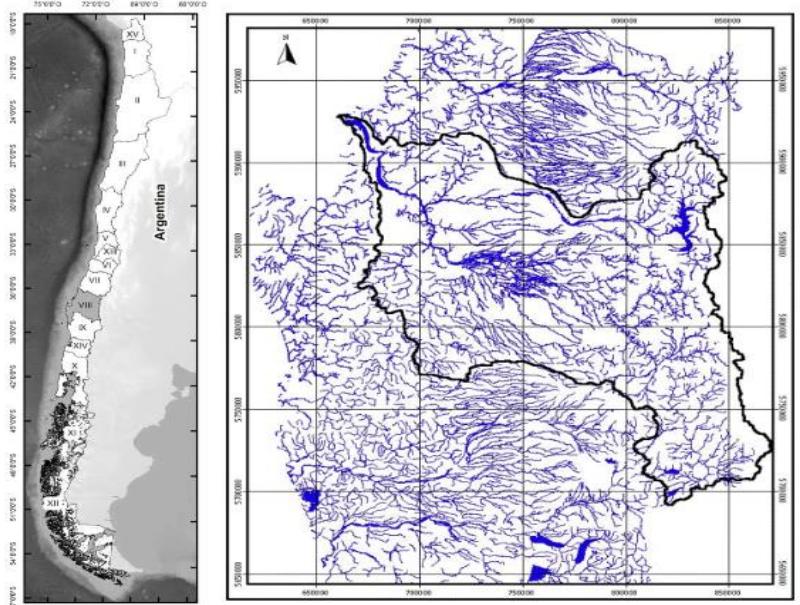


Figura 1.1. Cuenca Río Biobío con su red de drenaje (Fuente: EULA Chile, 2018).

El afluente septentrional más importante del Biobío es el río Laja, que nace en el lago del mismo nombre, en la localidad de Antuco. Una vez ocurre su confluencia, el río Biobío sigue su cauce hasta su desembocadura en el Océano Pacífico, en la provincia de Concepción, entre las comunas de Hualpén y San Pedro de la Paz, al norte del Golfo de Arauco donde se encuentran los mayores asentamientos y sectores antrópicos de la cuenca. Esto se muestra en la Figura 1.2, donde los puntos violetas representan sus principales asentamientos, en azul el río Biobío, y en verde sus más importantes tributarios



Figura 1.2. Localidades y tributarios importantes del río Biobío. Fuente: Valdovinos & Parra, 2006).

La geología de la cuenca hidrográfica comprende en la parte superior de los ríos Biobío y Laja, influencias de tipo volcánica y sedimentaria, que se extiende hasta la cordillera de la costa. El suelo existente en este lugar, se generó debido a numerosos procesos de meteorización de la gran cantidad de rocas graníticas presentes (DGA, 2004).

La parte baja se encuentra levemente influenciada por rocas sulfuradas, las que no presentan incidencia en la calidad del agua, debido a características tales como cubierta vegetal, tipo de suelo, entre otros (DGA, 2004).

La cuenca posee un régimen hidrológico mixto o pluvio-nival, presentando sectores del río con precipitaciones en forma de aguas lluvias; y otros sectores con presencia de nieve en las temporadas invernales. Esto se debe a su extensa longitud de 380 kilómetros lo que conlleva al paso por una diversidad de geografías en el transcurso de su cauce principal. En efecto, el comportamiento

del caudal en la parte baja del río Biobío, cercano a su desembocadura, es muy diferente al que presenta en la parte media y en la parte más alta, considerando un año hidrológico.

Prueba de esto, son las curvas de variación estacional creadas con información de recursos hídricos obtenida de la Dirección Nacional de Aguas, entidad perteneciente al Ministerio de Obras Públicas de Chile. Desde su base de datos, se obtuvieron registros de caudales medios mensuales medidos en diferentes estaciones fluviométricas instaladas en la cuenca del río Biobío; estudiando la probabilidad de ocurrencia de ciertos eventos de crecidas, para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Se utilizó la distribución de probabilidad que mejor se ajuste en el cálculo de cada mes, entre las que se encuentran las distribuciones Normal, Log Normal, Gumbel, Pearson y Log Pearson; comparándolas en base a una prueba de bondad de ajuste..

La estación *Río Lonquimay, antes junta río Biobío* es la estación fluviométrica instalada más aguas arriba de este cauce, cercano a su nacimiento en las lagunas Icalma y Galletué, en la región de la Araucanía. Al ser un sector montañoso, ubicado en plena Cordillera de los Andes, presenta una importante cantidad de nieve en época invernal.

La Figura 1.3 representa la ubicación geográfica de la estación y la Figura 1.4 representa su curva de variación estacional.

En la Figura 1.4 se observa que existe una mayor crecida de caudal en los meses de invierno como son junio, julio y agosto debido a las intensas precipitaciones. Sin embargo, en los meses posteriores, ya siendo época más primaveral, no se presenta una disminución continua del flujo una vez que culminan las lluvias. Esto ocurre debido a que acrecienta la temperatura del ambiente y comienza a generarse el derretimiento de la nieve acumulada en la cuenca durante todo el periodo invernal, que termina finalmente alimentando el caudal del río. A este comportamiento se le conoce como régimen pluvio-nival.

CAPITULO 1– INTRODUCCIÓN

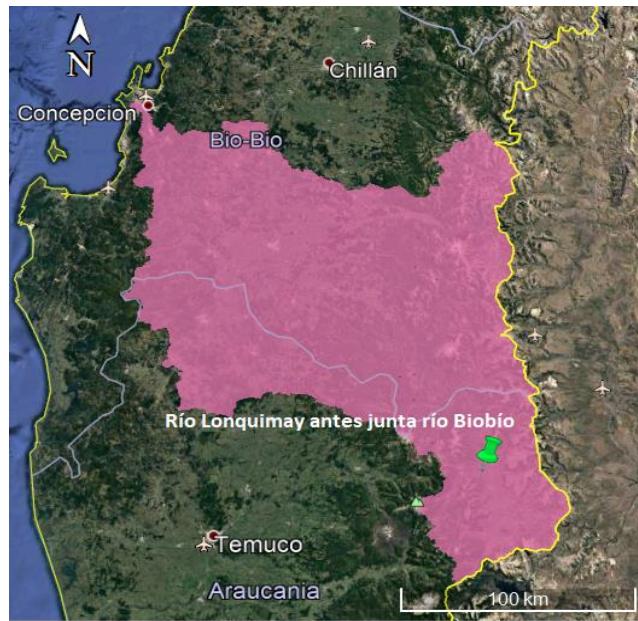


Figura 1.3. Ubicación geográfica de la estación fluviométrica *Río Lonquimay, antes junta río Biobío*, dentro de la Cuenca del río Biobío (Fuente: Elaboración Propia)

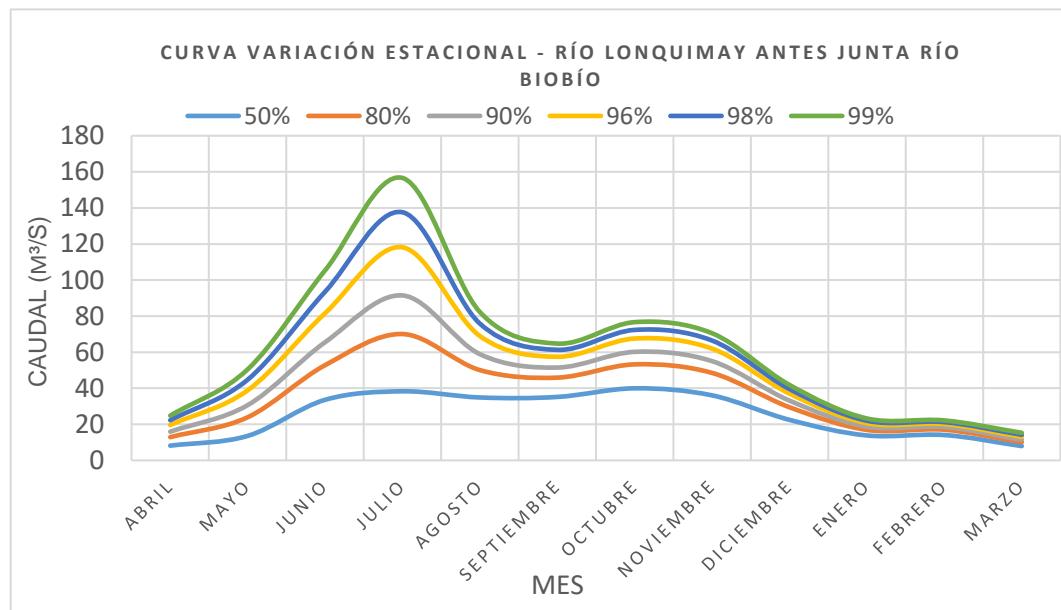


Figura 1.4. Curva de variación estacional estación fluviométrica *Río Lonquimay antes junta río Biobío*. (Fuente: Elaboración Propia)

CAPITULO 1– INTRODUCCIÓN

La localidad de Coihue está ubicada en la comuna de Negrete, a 23 kilómetros al suroeste de la ciudad de Los Ángeles, en pleno valle central de la cuenca del río Biobío. En este sector ya comienza a transformarse la imponente agricultura y vegetación de los sectores aguas arriba del cauce, a la actividad antrópica e industrial.

La Figura 1.5 representa la ubicación geográfica de la estación *Río Biobío en Coihue* y la Figura 1.6 representa su curva de variación estacional. En ella, se observan crecidas en la temporada invernal producto de las precipitaciones características de la zona, y en la época primaveral se observa también una crecida en menor magnitud. Esta ocurre producto de los deshielos en la zona cordillerana de la cuenca. A este escenario se le conoce también como régimen mixto o pluvio-nival.



Figura 1.5 Ubicación geográfica de la estación fluviométrica *Río Biobío en Coihue*, dentro de la cuenca del río Biobío. (Fuente: Elaboración Propia)

CAPITULO 1– INTRODUCCIÓN

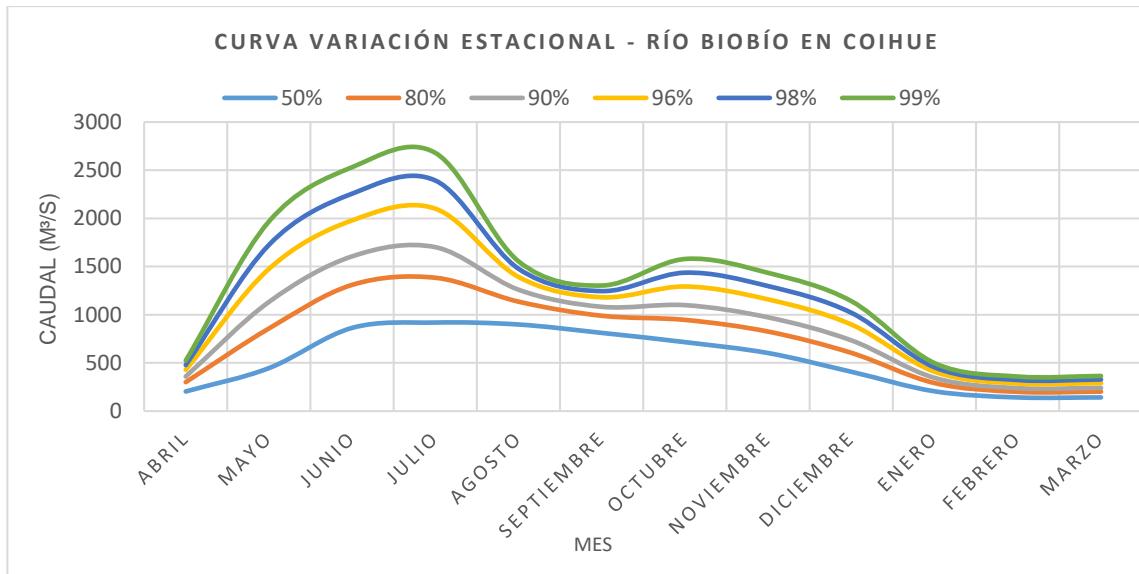


Figura 1.6 Curva de variación estacional, estación fluviométrica *Río Biobío en Coihue*.
(Fuente: Elaboración Propia)

La estación ubicada más aguas abajo en el río Biobío, metros antes de su desembocadura en el Océano Pacífico, es la estación *Río Biobío en Desembocadura*, localizada entre las comunas de Hualpén y San Pedro de la Paz. Esta zona costera presenta gran actividad antrópica al estar en la capital de la región del Biobío, lo que implica que el río tiene una importante intervención a nivel sanitario, de extracción de sedimentos y de contaminación.

La Figura 1.7 representa la ubicación geográfica de la estación y la Figura 1.8 representa su curva de variación estacional.

Se observa en la Figura 1.8, que la curva de variación estacional representa crecidas entre los meses de abril a agosto, correspondientes a la época de otoño e invierno de un año. A diferencia de las estaciones anteriores, aquí no se presentan crecidas en la temporada primaveral; ya que el derretimiento de la nieve acumulada en la zona alta y media de la cuenca, no genera impacto a este nivel del cauce. Esto representa un régimen pluvial.

CAPITULO 1– INTRODUCCIÓN

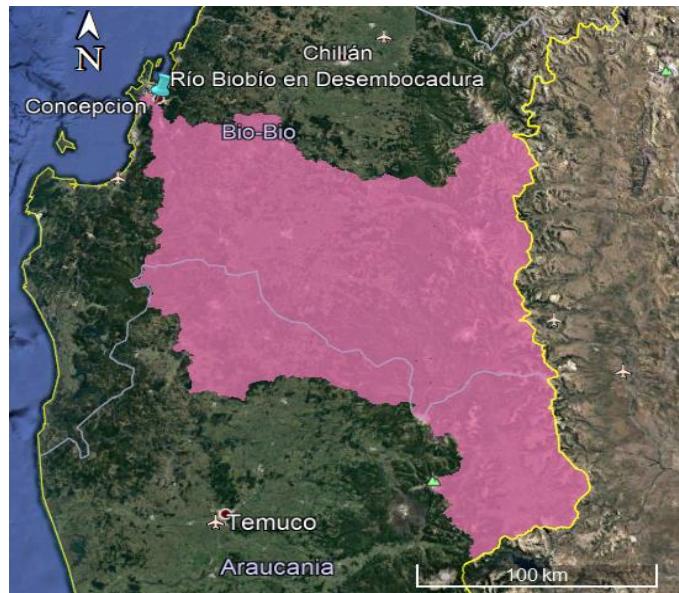


Figura 1.7. Ubicación geográfica de la estación fluviométrica *Río Biobío en Desembocadura*, dentro de la cuenca del río Biobío. (Fuente: Elaboración Propia)

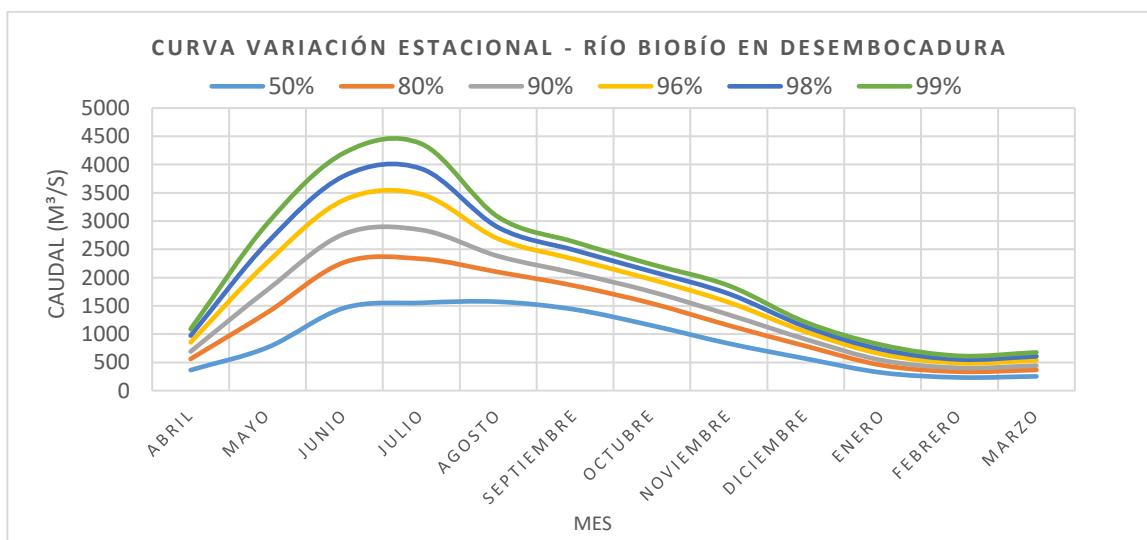


Figura 1.8. Curva variación estacional estación fluviométrica *Río Biobío en Desembocadura*. (Fuente: Elaboración Propia)

CAPITULO 1– INTRODUCCIÓN

El clima templado es característico de la cuenca del río Biobío, lo que permite que parte de su extensión sea utilizado para riego en las zonas rurales aledañas al cauce, además de ser utilizada para satisfacer las demandas de agua potable de la gran concentración de habitantes que posee en toda su superficie, y el desarrollo industrial tanto en las partes altas con las centrales hidroeléctricas de embalses como las ya mencionadas, o de paso como la central Peuchén que genera energía con las aguas del río Duqueco, central Quilleco que lo hace con las del río Laja; o la parte baja como son las plantas de fabricación de celulosa que utilizan los afluentes del río Biobío para su proceso productivo, por ejemplo CMPC Planta Santa Fe, Nacimiento, utiliza las aguas del río Vergara.

El suelo de la cuenca, en sus más de dos millones de hectáreas, se le ha dado uso como lo muestra la Tabla 1.1

Tabla 1.1. Uso del suelo de la cuenca del río Biobío. (Fuente: DGA, 2004).

Usos del Suelo	Superficie (ha)	Superficie de la cuenca destinada para cada uso (%)
Praderas	162,872	7
Terrenos agrícolas y agricultura de riego	70,469	3
Plantaciones forestales	474,648	20
Áreas urbanas e industriales	10,132	0.4
Minería industrial	229	0.01
Bosque nativo y bosque mixto	738,310	30
Otros usos	920,477	38
Áreas sin vegetación	49,237	2

Estudios anteriores han concluido que la calidad del agua de este río, en su parte alta, es de muy buena condición, lo que permite que sea apropiada para diversos usos y el mantenimiento de una comunidad acuática con alta exigencia ecológica. Sin embargo, en las zonas medias y bajas se encuentran una cantidad importante

CAPITULO 1– INTRODUCCIÓN

de sólidos en suspensión y presencia de fósforo y nitrógeno. Además, se ha detectado también la presencia de bacterias fecales que aumenta a medida que desciende el río, presentando en zonas con mayor actividad antrópica parámetros elevados a los permitidos por la norma chilena de aguas recreacionales y de regadío (correspondiente a los 1,000 coliformes fecales por cada 100 ml de agua) (DS90, 2000). En consecuencia, la utilización de las aguas en estos tramos del cauce, sin tratamiento previo, corresponde a un riesgo para la salud de la población (Valdovinos & Parra, 2006).

CAPÍTULO 2 – MARCO TEÓRICO

El presente capítulo detallará las bases teóricas utilizadas en la investigación; detallando inicialmente el *software* a utilizar para la modelación hidráulica unidimensional del río Biobío, y su respectivo método de cálculo para obtener los resultados a los que se enfocan los objetivos. En ellos, se destacan principalmente ecuaciones del ámbito hidráulico, donde se requieren los datos obtenidos en terreno, además de la instalación de una represa en medio del cauce y la simulación de su rompimiento.

Finalmente, se esclarece el concepto de hidroeléctrica, clasificándolas según su capacidad de generación y su forma de intervenir un cauce; detallando ejemplos a nivel mundial y local.

2.1 HEC-RAS.

El Sistema de Análisis de Ríos del Centro de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (HEC-RAS, por sus siglas en inglés), es un *software* que permite realizar una diversidad de análisis en flujos o cuerpos de agua, siendo parte de estas la modelación de un sistema hidráulico unidimensional, además de tener la capacidad de realizar modelos hidráulicos bidimensionales; modelos de transporte de sedimentos; análisis de temperatura de agua y modelación generalizada de la calidad de agua en cuanto a sus nutrientes (*Hydrologic Engineering Center*, 2016).

Este *software* se ha utilizado en investigaciones en todo el mundo para estudios hidrológicos e hidráulicos, buscando detectar el comportamiento de las crecidas, zonas de inundación, diseño de estructuras hidráulicas, simulación de procesos de precipitación-escorrentía en un sistema hidrológico, entre otros. Ejemplo de esto, es el estudio realizado en el río Saxiola, Costa Rica, con el fin de diseñar un puente para la Quebrada del Padre José (IMNSA, 2013). Con la modelación

de 30 secciones transversales, se alcanzaron caudales máximos instantáneos para 100 años periodo de retorno, y se logró obtener condiciones óptimas para la construcción de un puente sobre el cauce.

Por otro lado, el software se utilizó para estudiar el Puente LlacoLén, que cruza el río Biobío entre las comunas de Concepción y San Pedro de la Paz. Se analizó si éste cumple con las exigencias hidráulicas establecidas, modelando con los caudales de la situación más desfavorable que ha sufrido esa zona, ocurrida en julio del año 2006. En este estudio se concluyó que el puente no se ajusta a la normativa vigente en cuanto a la revancha mínima exigida de un metro, considerándola como una estructura no segura desde el punto de vista hidráulico (Soberón, 2015).

2.1.1 Procedimientos de cálculo del software.

Para el cálculo de perfiles de superficie de agua de flujo estacionario en una dimensión, siendo estos de régimen subcrítico, supercrítico o de flujo mixto; HEC-RAS utiliza la ecuación de energía con un procedimiento iterativo denominado método de paso estándar entre un perfil y otro. La ecuación de energía se describe en (2.1), donde Z_1, Z_2 corresponde a la elevación del canal principal (*Channel Bottom*); Y_1, Y_2 representa la profundidad del agua de las secciones transversales (*Water Surface*); V_1, V_2 corresponden a las velocidades promedio (descarga total / área de flujo total); a_1, a_2 son coeficientes de ponderación de velocidad; g es el parámetro que representa la aceleración gravitacional, y finalmente h_e como la perdida de carga de energía, representados gráficamente en la Figura 2.1

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 * V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 * V_1^2}{2g} + h_e \quad (2.1)$$

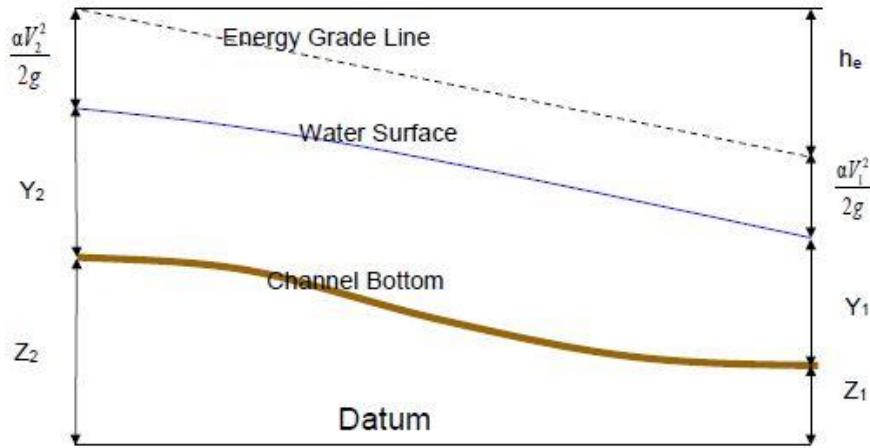


Figura 2.1. Representación gráfica de los parámetros que formal la ecuación de energía 2.1 (Fuente: *Hydrologic Engineering Center*, 2016).

La pérdida de carga de energía (h_e) entre dos secciones transversales se compone de pérdidas por fricción y pérdidas de contracción o expansión. La ecuación para la pérdida de carga de energía es la ecuación (2.2); donde L es la distancia ponderada entre secciones, \bar{S}_f es la pendiente de fricción representativa entre dos secciones, y C representa el coeficiente de pérdida de expansión o contracción.

$$h_e = L \cdot \bar{S}_f + C \cdot \left| \frac{a_2 * V_2^2}{2g} - \frac{a_1 * V_1^2}{2g} \right| \quad (2.2)$$

La distancia ponderada entre secciones, L se calcula según la expresión (2.3).

$$L = \frac{L_{lob} \bar{Q}_{lob} + L_{ch} \bar{Q}_{ch} + L_{rob} \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (2.3)$$

En la ecuación (2.3), las variables L_{lob} , L_{ch} , L_{rob} representan la sección transversal que alcanza las longitudes especificadas para el flujo en la ribera izquierda, el canal principal, y la ribera derecha, respectivamente. Además, \bar{Q}_{lob} , \bar{Q}_{ch} , \bar{Q}_{rob} representan el promedio aritmético de los flujos entre las secciones para la ribera izquierda, el canal principal y la ribera derecha, respectivamente.

Para el cálculo de la perdida de fricción, HEC-RAS la evalúa como el producto entre L y \bar{S}_f , como se observa en la ecuación (2.2), y donde \bar{S}_f representa la pendiente de fricción representativa, y L está definido en la ecuación (2.3).

Para obtener la pendiente de fricción o pendiente de energía en cada sección transversal, el *software* la calcula a partir de la ecuación de Manning según la ecuación (2.4), teniendo también expresiones alternativas siendo la ecuación (2.5) la usada por defecto, siempre y cuando, el usuario no seleccione una opción contraria.

$$S_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \quad (2.4)$$

$$S_f = \left(\frac{Q_1+Q_2}{K_1+K_2}\right)^2 \quad (2.5)$$

2.1.2 Hidrodinámica del flujo no estacionario unidimensional.

Las leyes físicas que gobiernan el flujo son:

- Principio de conservación de masa (continuidad).
- Principio de conservación de *momentum* (impulso).

Estas leyes se expresan matemáticamente en forma de ecuaciones diferenciales parciales.

Principio de conservación de masa (continuidad):

La Figura 2.2 muestra un tramo de un río, con un flujo de entrada (*Inflow*) y posteriormente un flujo de salida (*Outflow*), considerando el volumen de control elemental. La distancia x se mide a lo largo del canal; en el punto medio del volumen de control, el flujo está representado por $Q(x,t)$, y el área de flujo total se indica como A_T . El área de flujo total es la suma del área activa A y del área de almacenamiento fuera del canal S .

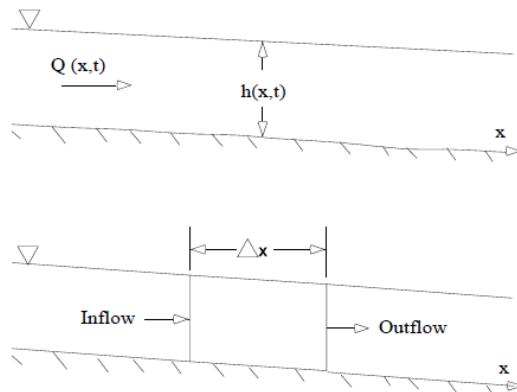


Figura 2.2. Volumen de control elemental para la derivación de las ecuaciones de continuidad y *momentum*. (Fuente: *Hydrologic Engineering Center*, 2016).

La conservación de masa para un volumen de control indica que la tasa neta de flujo hacia el volumen será igual a la tasa de cambio de almacenamiento dentro del volumen. La tasa de entrada al volumen de control se puede escribir según la ecuación (2.6).

$$Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (2.6)$$

La tasa de flujo de salida se puede escribir según la ecuación (2.7).

$$Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (2.7)$$

La tasa de cambio en el almacenamiento, se define según la ecuación (2.8).

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} \Delta x \quad (2.8)$$

Suponiendo que Δx es pequeño, el cambio en la masa en el volumen de control es igual a la ecuación (2.9).

$$\rho \frac{\partial A_T}{\partial t} \Delta x = \rho \left[\left(Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) + Q_i \right] \quad (2.9)$$

Donde Q_i es el flujo lateral que ingresa al volumen de control y ρ es la densidad del fluido

Luego de simplificar y dividir a través de $\rho \Delta x$ arroja la forma final de la ecuación de continuidad (2.10), en el que q_l es la entrada lateral por unidad de longitud.

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (2.10)$$

Principio de conservación de *momentum* (impulso):

La conservación de *momentum* se expresa en la segunda ley de Newton, como la ecuación (2.11).

$$\sum F_x = \frac{dM}{dt} \quad (2.11)$$

La conservación del *momentum* para un volumen de control indica que la velocidad neta del momento que ingresa al volumen (flujo del *momentum*), más la suma de todas las fuerzas externas que actúan sobre el volumen es igual a la velocidad de acumulación del *momentum*. Esta es una ecuación vectorial aplicada en la dirección x. El flujo de *momentum* (MV) es la masa del fluido, multiplicada por el vector de velocidad en la dirección del flujo. Se consideran tres fuerzas: presión, gravedad y arrastre de límites o fuerza de fricción.

La fuerza de presión neta, se puede escribir como la ecuación (2.12).

$$F_{Pn} = -\rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x \quad (2.12)$$

La fuerza debido a la gravedad sobre el fluido en el volumen de control en la dirección x, está representada en la ecuación (2.13).

$$F_g = \rho g A \sin\theta \Delta x \quad (2.13)$$

Donde θ representa el ángulo que el canal invierte con la horizontal. En ríos naturales θ es pequeño, y $\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{\partial Z_0}{\partial x}$, donde Z_0 es la elevación. Ante esto, la fuerza gravitacional también se puede escribir como la ecuación (2.14).

$$F_g = -\rho g A \frac{\partial Z_0}{\partial x} \Delta x \quad (2.14)$$

La fuerza de fricción entre el canal y el fluido, se detalla en la ecuación (2.15).

$$F_f = -\rho g A S_f \Delta x \quad (2.15)$$

Donde S_f representa la pendiente de fricción, que es positiva para el flujo en la dirección x positiva, y debe estar relacionada con el flujo y la etapa. HEC-RAS utiliza la ecuación (2.16) de Manning para la obtención de este parámetro, donde R corresponde al radio hidráulico y n es el coeficiente de fricción de Manning.

$$S_f = \frac{Q|Q|n^2}{2.208 R^{4/3} A^2} \quad (2.16)$$

Con los tres términos de fuerza definido, solo queda el flujo de impulso. La tasa de acumulación de impulso puede escribirse según la ecuación (2.17).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Q \Delta x) = \rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (2.17)$$

La tasa neta del *momentum* (flujo de *momentum*) que ingresa al volumen, más la suma de todas las fuerzas externas que actúan en él [(2.12) + (2.14) + (2.15)] es igual a la tasa de acumulación del *momentum* (2.17). Por lo tanto, la ecuación (2.18) muestra la relación entre todas las fuerzas.

$$\rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} = -\rho \frac{\partial QV}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial z_0}{\partial x} \Delta x - \rho g A S_f \Delta x \quad (2.18)$$

Finalmente, operando con el álgebra, la ecuación de *momentum* está definida por la ecuación (2.19).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (2.19)$$

2.1.3. Instalación y ruptura de presa.

El software HEC-RAS también permite generar un hidrograma que represente la inundación o crecida de flujo a través de un embalse mediante la modelación de flujo no estacionario unidimensional. Para esto se utilizan las ecuaciones completas de Saint Venant mencionadas en 2.1.2, como la ecuación de *momentum* (en sus versiones reducidas, para una dimensión). Este método monitorea el cambio en la superficie del agua del embalse a medida que llega el hidrograma de entrada, así como el cambio de la superficie del agua que se produce durante una ruptura de presa. La técnica de modelado más precisa para capturar elevaciones de embalses es la simulación de onda dinámica completa (flujo no estacionario), considerando un embalse de geometría larga y estrecha.

Para modelar el embalse utilizando este método en HEC-RAS, se deben agrupar las secciones transversales de todo el embalse, como se haría para un tramo

normal del río. La represa se modela con la opción de “Estructura en Línea (*Inline Structure*)” como muestra la Figura 2.3 en un diagrama de ejemplo del modelado.

Los hidrogramas de entrada se pueden ingresar como condiciones de borde en la sección transversal más aguas arriba, y en cualquiera de las secciones transversales dentro del embalse (i.e. caudal lateral, tributarios).

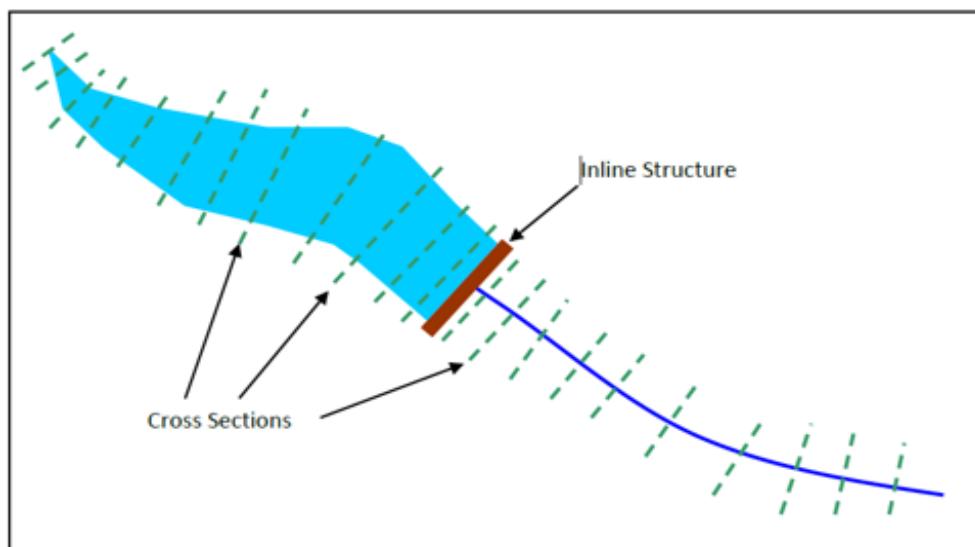


Figura 2.3. Diseño de la sección transversal para una simulación dinámica completa a través de un embalse. (Fuente: *Hydrologic Engineering Center*, 2016).

Cuando se modela una ruptura de presa, la descarga se calculará utilizando las mismas ecuaciones que el método de onda dinámica completa. La única diferencia es que al agua suministrada a la presa provendrá del área del volumen almacenado, y la elevación de esta se reducirá a medida que el agua fluye por la ruptura. Cuando esta ruptura se forma rápidamente, la superficie aguas arriba de la presa a menudo tendrá una pendiente significativa. Se considera que el agua dentro del reservorio siempre tendrá una superficie horizontal.

Al realizar un análisis de rompimiento de presa, primero se deben estimar las características de la ruptura, y luego el software calcula el hidrograma de salida de la ola de crecida desde el embalse, y realiza la simulación hacia aguas abajo. Las dimensiones y el tiempo de desarrollo deben estimarse para cada escenario de falla (i.e. casos favorables en términos de clima o eventos de crecida)

2.2 CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

La energía hidroeléctrica es un recurso vital de energía renovable y para muchos países es la única que tiene el potencial de expandir el acceso de electricidad a grandes poblaciones. Ésta totaliza el 71% de energías renovables en el mundo durante el 2016, con una capacidad en ese entonces de 1,064 GW, correspondiente a un 16.4% del total de la electricidad en el mundo. (*The Institution of Engineering and Technology, 2016*).

Se basa en el principio de conservación de la energía. Básicamente, consiste en aprovechar la energía potencial de agua cuando se encuentra a una altura superior respecto de un punto de descarga. La energía del agua que fluye es aprovechada por las turbinas, que se instalan en la trayectoria del flujo, las que por medio del giro que les genera, activa un generador que produce electricidad. (Figura 2.4)

Cuando este desnivel de agua se encuentra de forma natural, por ejemplo, cuando un arroyo corre por una ladera empinada, o cuando un cambio brusco en la elevación crea una cascada en un río, se puede instalar una hidroeléctrica de paso generando el recurso eléctrico con la energía potencial del agua generada por esa diferencia de cotas. No obstante, cuando este desnivel no es de gran magnitud, se crea un embalse aumentando la cota natural del río a tal punto de generar una energía potencial considerable para la generación de energía eléctrica. Cuando esto se realiza, estamos en presencia de una hidroeléctrica de embalse.

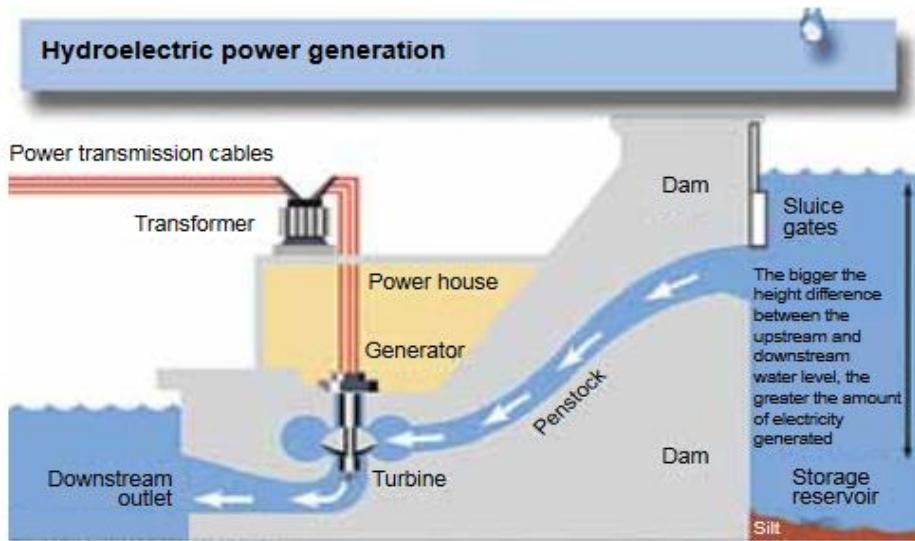


Figura 2.4. Esquema de una central hidroeléctrica típica, con una presa utilizada para la creación de un embalse (Fuente: *The Institution of Engineering and Technology*, 2016).

2.2.1 Centrales Hidroeléctricas de Embalse

La energía hidroeléctrica puede generarse donde quiera que un flujo de agua desciende de un nivel superior a un nivel inferior (*The Institution of Engineering and Technology*, 2016). Sin embargo, cuando esta diferencia de cotas no es de gran magnitud, puede crearse artificialmente a través de la construcción de un dique o represa (Figura 2.5). Esta consta de una barrera para el flujo, lo que genera que el nivel de río aguas arriba se vaya elevando hasta generar una cota deseada. Como resultado, se almacena en el agua una importante energía potencial gravitatoria capaz de generar hidroelectricidad. A estas últimas represas se les conoce como hidroeléctricas de embalse.



Figura 2.5. Embalse de Central Hidroeléctrica Grand Inga Dam, en República Democrática del Congo, África.

A diferencia de las centrales de paso, las hidroeléctricas de embalse pueden llegar a tener mucha más capacidad de generación de energía eléctrica. Un buen ejemplo de esto es la presa de las Tres Gargantas, ubicada en el río Yangtze, China. Inundó 630 km² de territorio chino, y dejó bajo el nivel de agua a unas 19 ciudades y 322 pueblos, con una capacidad de generación de 22,500 MW. Es una de las represas más grandes del mundo, junto con la presa Rogun en Tayikistán con una altura de 300 metros, o la llamada Owen Fall en Cataratas de Owen, que tiene 204.8 billones de metros cúbicos de agua en su embalse. (Vidaud, 2013).

En Chile, a diciembre 2017, existen 6,643 MW de capacidad instalada hidroeléctrica, alcanzando cerca de un 29% de la capacidad total instalada de electricidad. De acuerdo al estudio de cuencas del Ministerio de Energía, existe en el país un potencial hidroeléctrico de 15,938 MW, distribuido como se muestra en la tabla 2.1, siendo la cuenca del río Biobío la de mayor potencial con un 18%.

Tabla 2.1. Potencial de Desarrollo Hidroeléctrico de Chile (Fuente: Ministerio de Energía, 2016)

Cuenca	Potencial Hidroeléctrico (MW)	Proporción (%)
Biobío	2,902	18
Baker	1,918	12
Palena	1,797	11
Pascua	1,694	11
Yelcho	1,403	9
Maule	1,368	9
Toltén	1,123	7
Valdivia	906	6
Aysén	848	5
Bueno	807	5
Cisnes	619	4
Puelo	552	3
TOTAL	15,937	100

Dentro de la cuenca del río Biobío, se encuentra la central hidroeléctrica Ralco, la más grande del país, perteneciente a la empresa Enel Generación Chile. Tiene una potencia de 690 MW y un embalse de 1,222 millones de metros cúbicos. En poco más de 60 kilómetros aguas abajo, en las confluencias de los ríos Huequecura y Biobío se encuentra la central hidroeléctrica Angostura, última presa que interviene el cauce principal de la cuenca. Comenzó a operar el 2014 y actualmente tiene una potencia de 323.8 MW. Para la generación de su embalse, que tiene una capacidad de 100 millones de metros cúbicos, debieron inundarse 641 hectáreas a una cota de operación normal de 317 msnm, El proyecto está diseñado para un caudal de 700 m³/s, con una altura neta de caída de 50 metros y una generación media anual de 1,542 GWh (Colbún, 2008).

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS

En este capítulo se presenta el proceso de modelación unidimensional del río Biobío, aplicando los datos correspondientes de batimetría adquiridos en otras investigaciones realizadas al mismo afluente. Aquí, se busca obtener el comportamiento del flujo de agua bajo ciertas condiciones iniciales y condiciones de borde según la información de recursos hídricos existente dentro de su cuenca (Figura 3.1), considerando una situación desfavorable ocurrida en los últimos años de los cuales se tenga registro.



Figura 3.1. Cuenca del río Biobío, obtenida mediante *software Global Mapper*. (Fuente: Elaboración Propia)

Finalmente se aplica al modelo del río la instalación de la central hidroeléctrica Angostura con sus respectivas propiedades, y posteriormente, la simulación del rompimiento de su compuerta. Una vez ocurrido esto, se estudian los resultados de la crecida producto del fluido del embalse que toma recorrido aguas abajo, buscando detectar sectores vulnerables al desborde del río, y el tiempo en que se generaría este desastre en las localidades, desde que ocurre el rompimiento de la estructura en la represa.

3.1 MODELO UNIDIMENSIONAL DEL RÍO BIOBÍO

En base a mediciones en terreno realizadas en 46 secciones del río Biobío, desde las cercanías de la localidad de Santa Bárbara hasta su desembocadura en el Océano Pacífico. Se obtuvieron datos de batimetría y topografía en cada perfil transversal para ingresar al *software* y realizar el modelo unidimensional.

La batimetría utilizada para el estudio corresponde a un conjunto de datos obtenidos en terreno, mezclados con imágenes satelitales ASTER con una resolución espacial de 30 x 30 m. Cabe mencionar, que estas imágenes son gratuitas y entregan la mejor calidad en relación al recurso computacional utilizado.

La geometría del río Biobío, en su zona en estudio se observa en la Figura 3.2

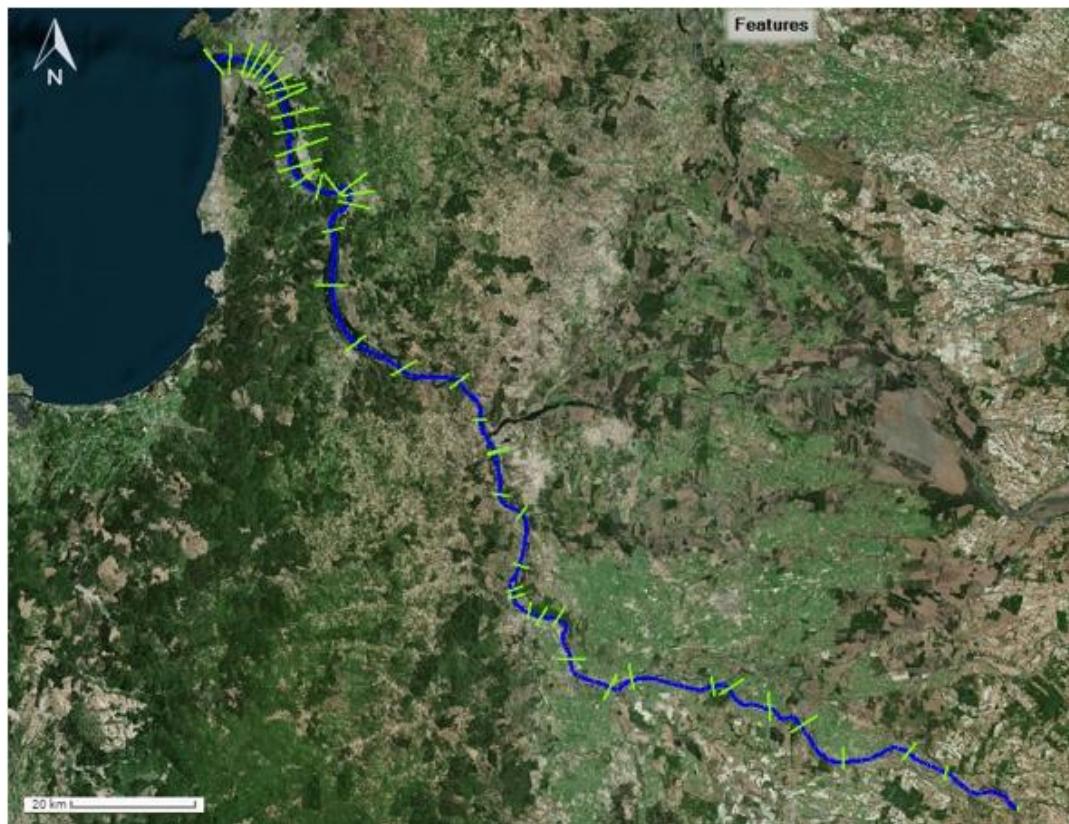


Figura 3.2. Geometría y ubicación geográfica de los perfiles transversales para la modelación hidráulica del río Biobío. (Fuente: Elaboración Propia)

Dentro de la modelación, se debe además ingresar los límites del río con sus riberas en ambos costados. Esto, en conjunto con las imágenes ASTER, permite tener datos de las características de cada ribera y sus sectores cercanos, para analizar el comportamiento de la corriente de agua ante un desborde. Además, se verifican los puntos pertenecientes al canal principal, como se muestra en la Figura 3.3



Figura 3.3. Límites del río Biobío con sus riberas al lado izquierdo y derecho, señaladas en los puntos de color rojo para cada perfil transversal. (Fuente: Elaboración Propia)

3.1.1 Determinación del Coeficiente de Rugosidad.

Un importante parámetro dentro de la modelación hidráulica es el coeficiente de rugosidad de Manning. Éste determina un importante factor en el comportamiento del río, tanto en su cauce normal, como en una crecida y un posible evento de desborde, o una eventual sequía. Por otra parte, debido a la vulnerabilidad de exactitud que tienen los datos obtenidos en terrenos para estudios hidrológicos, los resultados del modelo deben calibrarse posteriormente al cálculo para buscar la mayor exactitud e igualdad con los datos reales. Debido a que la mayoría de los datos obtenidos en el levantamiento en terreno son fidedignos, el único que permite ser modificado y ajustado para buscar la calibración es el coeficiente de Manning. Sin embargo, también se debe tener un valor inicial según el material del fondo del canal y de sus riberas en cada uno de los perfiles transversales

ingresados al modelo. Para lo anterior, se utiliza el texto “*Roughness Characteristics of Natural Channels*” (Barnes, 1967), comparando de manera visual las características de las imágenes del libro y las condiciones de entorno de cada sección transversal para asignar un valor de rugosidad n.

Producto de que la hidrodinámica del río Biobío conforma un sustrato móvil de arenas gruesas y arenas muy gruesas (Bertrán et al, 2001), el coeficiente de Manning aplicado al modelo en todo el recorrido del cauce es de 0.031 para esas características (Chow, 1994).

3.1.2 Condiciones Iniciales Modelo Hidráulico.

En julio del año 2006, el río Biobío experimentó una inundación cercana a los 100 años, que dejó cinco ciudades ubicadas dentro de los 25 kilómetros más bajos del cauce cubiertas de agua (Van Heemst et al, 2013). Según los datos entregados por la Dirección General de Aguas, medidos en su estación fluviométrica ubicada a 11 km aguas arriba de la Desembocadura, se alcanzaron caudales de 15,700 m³/s, como se observa en la Figura 3.4. Esta gran cantidad de agua causó graves daños, dejando 95,862 personas afectadas directamente, 682 viviendas con daños mayores, 75 casas destruidas, 2 personas desaparecidas y 19 personas fallecidas (ONEMI, 2006).

HEC-RAS requiere, para la ejecución del modelo en flujo no estacionario, el ingreso de un hidrograma de caudales o hidrograma de alturas desde el perfil transversal más aguas arriba del cauce en estudio, que represente según las estadísticas hidrológicas un evento importante en el comportamiento del río. Estos son representados por los caudales medidos en la estación *Río Biobío antes junta Pangue*, que cuenta con datos de la tormenta recién mencionada, es la más cercana al Embalse Angostura, y por ende al perfil transversal más aguas arriba. Esta se representa en la Figura 3.5.

CAPITULO 3 – RESULTADOS

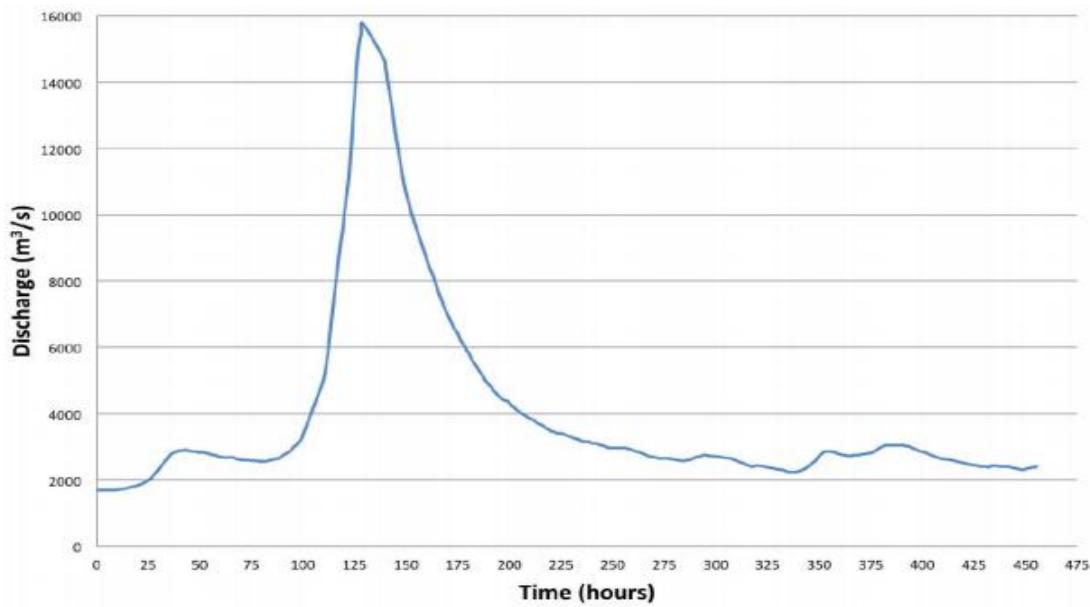


Figura 3.4. Hidrograma de la inundación del 2006 en la parte baja del río Biobío. La inundación comenzó el 10 de julio, aproximadamente a las 4 am. (Fuente: Van Heemst et al, 2013).

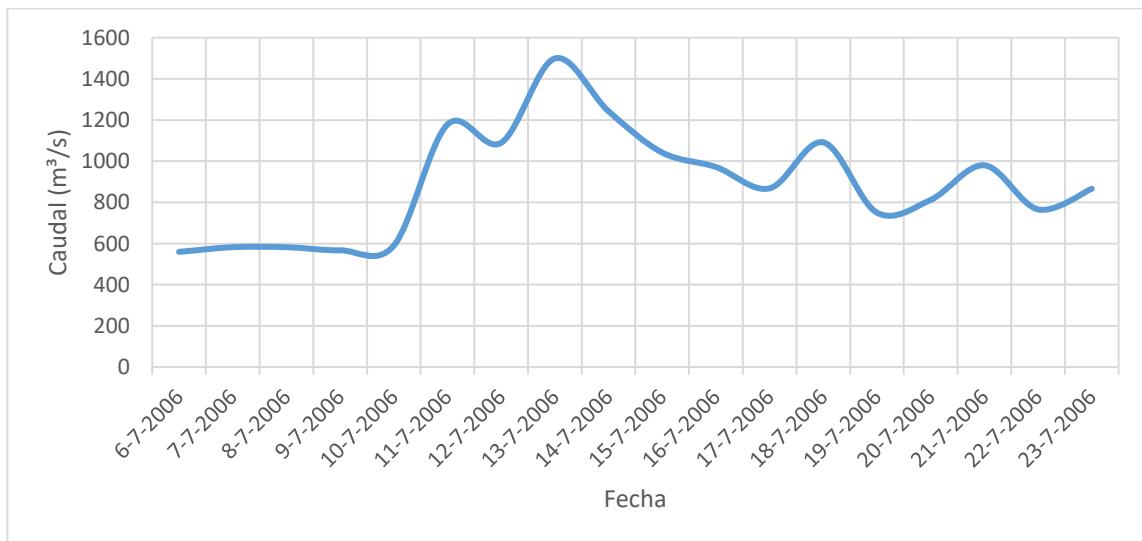


Figura 3.5. Hidrograma de caudales estación Río Biobío antes junta Pangue (Fuente: Elaboración Propia).

Se considera para ingresar al *software* el tramo donde ocurre la mayor tormenta y por ende la mayor crecida, siendo este entre el 6 de julio de 2006, hasta el 23 de julio del mismo año. Estos días son la base para el ingreso de información de estadística hidrológica al modelo unidimensional del río Biobío.

3.1.3 Condiciones de Borde Modelo Hidráulico.

Además del caudal transportado por el mismo cauce del río Biobío, y la contribución de las lluvias; una importante cantidad de agua es aportada por los tributarios que desembocan en este curso fluvial, o las subcuencas existentes (Figura 3.6). Por lo tanto, para la modelación hidráulica, debe considerarse un hidrograma de caudales del mismo periodo ingresado en las condiciones iniciales para cada afluente, o en su defecto, los principales o los permitidos según la disponibilidad de datos.

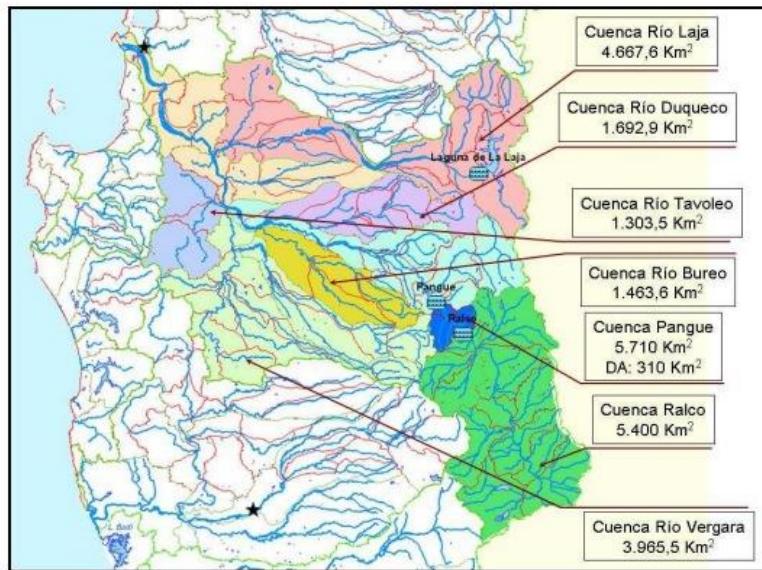


Figura 3.6. Subcuencas de tributarios más relevantes del río Biobío (Fuente: DGA, 2010).

Río Nicodahue:

Su confluencia con el río Biobío se encuentra en la zona media del cauce principal, aguas abajo de la confluencia del río Vergara, cercano a la localidad de Nacimiento, como se muestra en la Figura 3.7. Sus aguas son provenientes de las tributadas por el río Maitenrehue, en la región de la Araucanía.

La estación fluviométrica de la cual se obtuvieron los datos de caudal para generar el hidrograma es *Río Nicodahue en Pichún*, que abarca el 59% de la cuenca del río Tavoleo, que corresponde a este curso fluvial. Por lo tanto, se extrapolan los resultados para obtener los caudales en la confluencia del río Nicodahue con el río Biobío, obteniendo el hidrograma de la Figura 3.8.

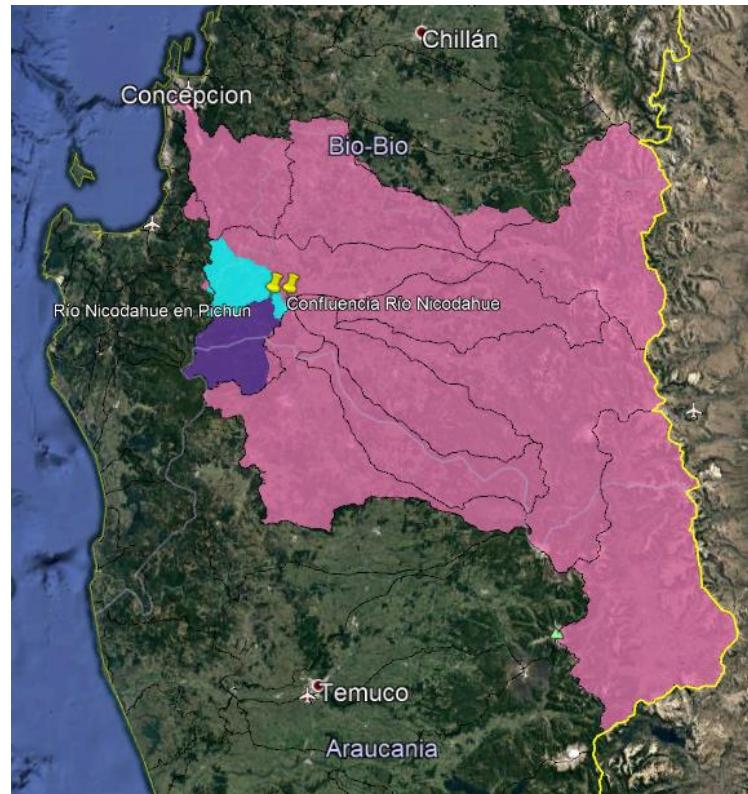


Figura 3.7. Cuenca del río Nicodahue y su relación de superficies con la cuenca hasta la estación *Río Duqueco en Pichún*. (Fuente: Elaboración Propia).

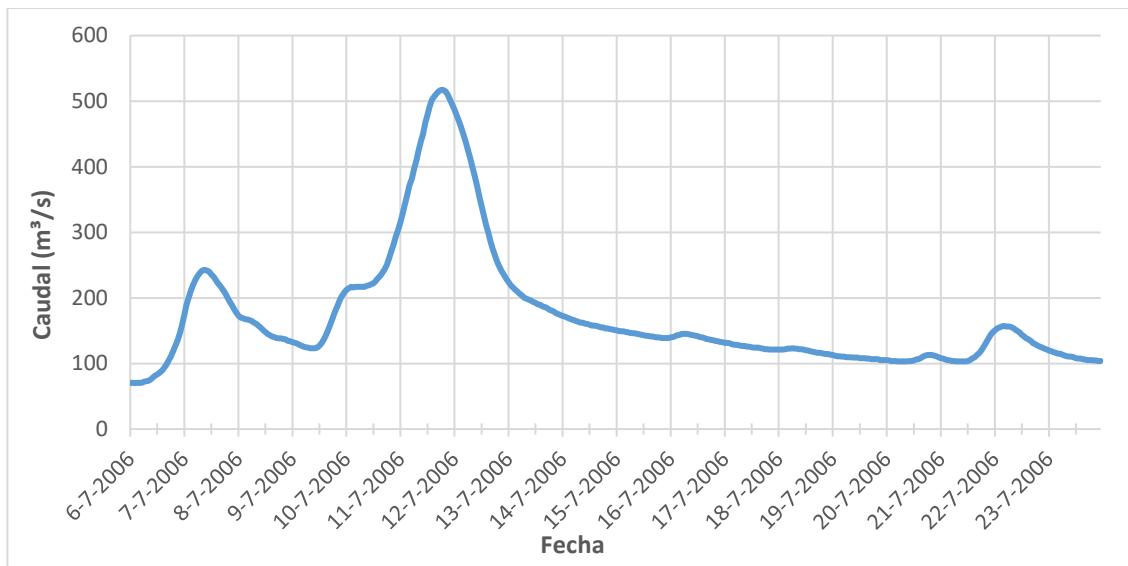


Figura 3.8. Hidrograma de Caudales, de río Nicodahue en la confluencia con el río Biobío (Fuente: Elaboración Propia).

Río Lirquén:

Este afluente converge al río Biobío pocos kilómetros aguas abajo del embalse Angostura, cercano a la localidad de Quilaco (Figura 3.9). Sus aguas provienen de aportes de precipitaciones, comenzando en las cercanías de la localidad de Alto Biobío.

Los datos de caudal fueron obtenidos en la estación fluviométrica *Río Lirquén en Cerro el Padre* que representa, hasta este punto, un 76 % de la subcuenca, por lo que el hidrograma de caudales en el punto donde ocurre la confluencia del río Lirquén con el río Biobío, se muestra en la Figura 3.10.

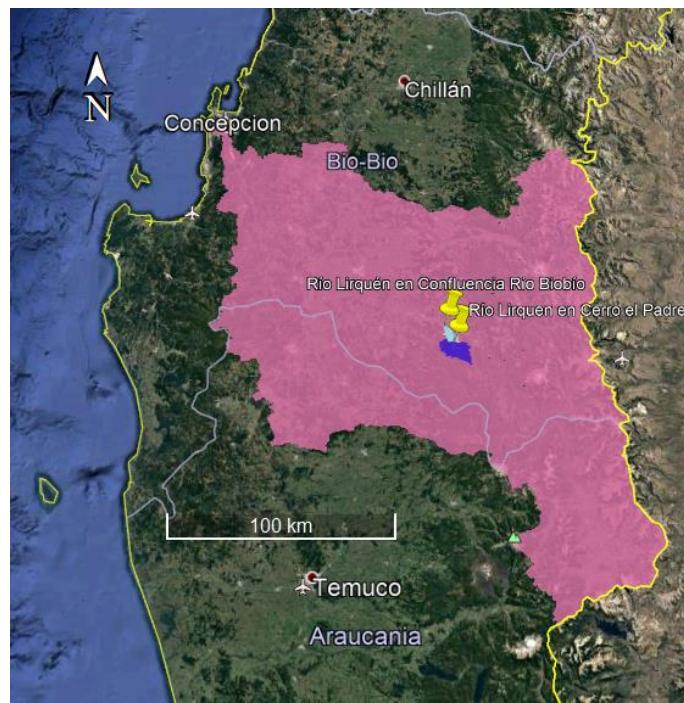


Figura 3.9. Cuenca del río Lirquén y su relación de superficies con la cuenca hasta la estación *Río Lirquén en Cerro El Padre*. (Fuente: Elaboración Propia).

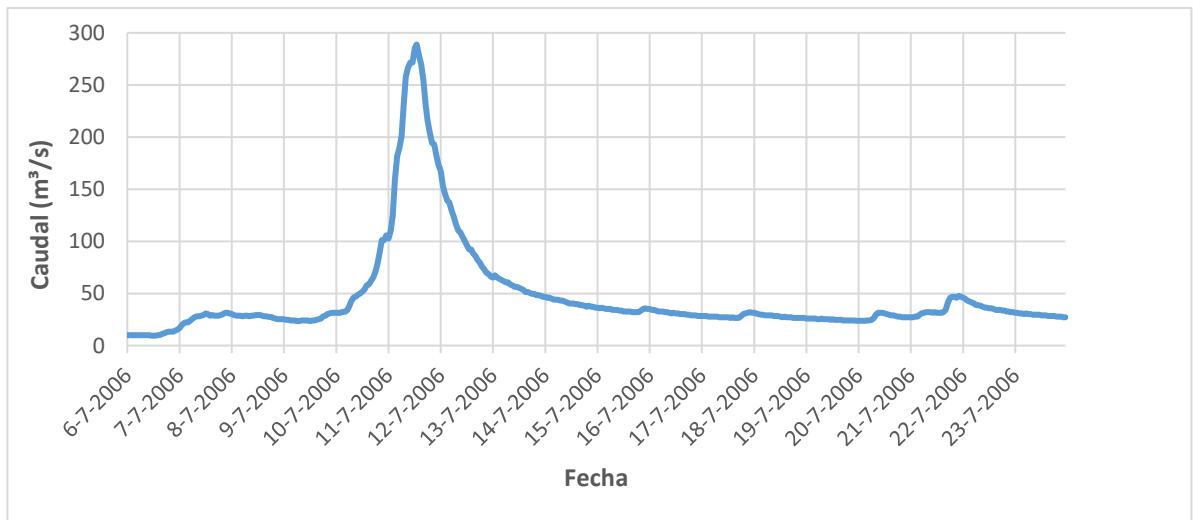


Figura 3.10. Hidrograma de Caudales, de río Lirquén en la confluencia con el río Biobío. (Fuente: Elaboración Propia).

Río Duqueco:

Este curso fluvial tributa en el río Biobío en la localidad de Negrete. Sus aguas provienen desde las alturas de la Sierra Velluda, al suroeste del volcán Antuco, como lo muestra la Figura 3.11.

El hidrograma de caudales representado en la Figura 3.12 se genera con los registrados en la estación fluviométrica *Río Duqueco en Cerrillos*, que recibe las aguas del 77 % de la cuenca del río Duqueco; extrapolando hasta la confluencia en el río Biobío.

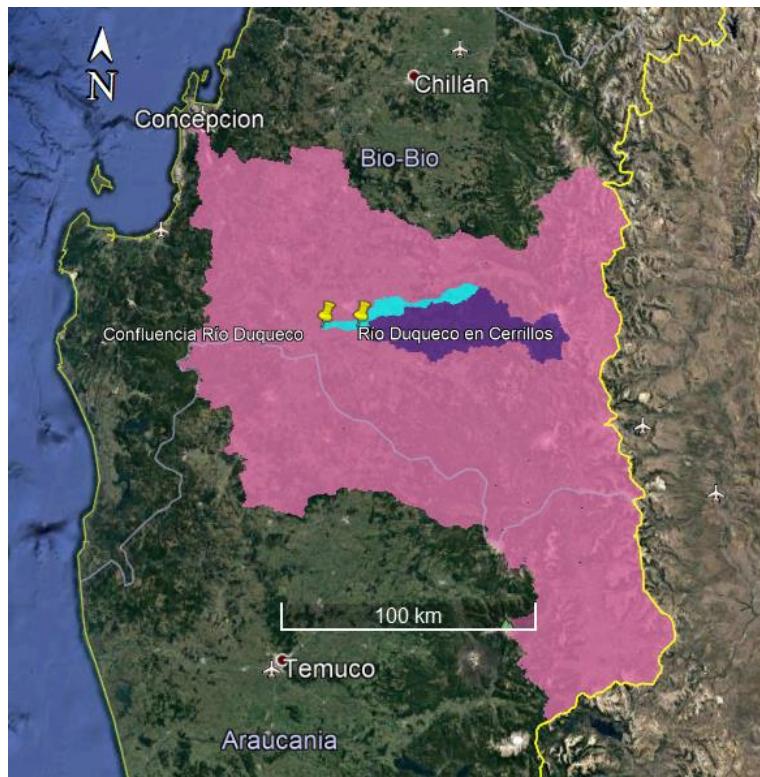


Figura 3.11. Cuenca del río Duqueco y su relación de superficies con la cuenca hasta la estación *Río Duqueco en Cerrillos*. (Fuente: Elaboración Propia).

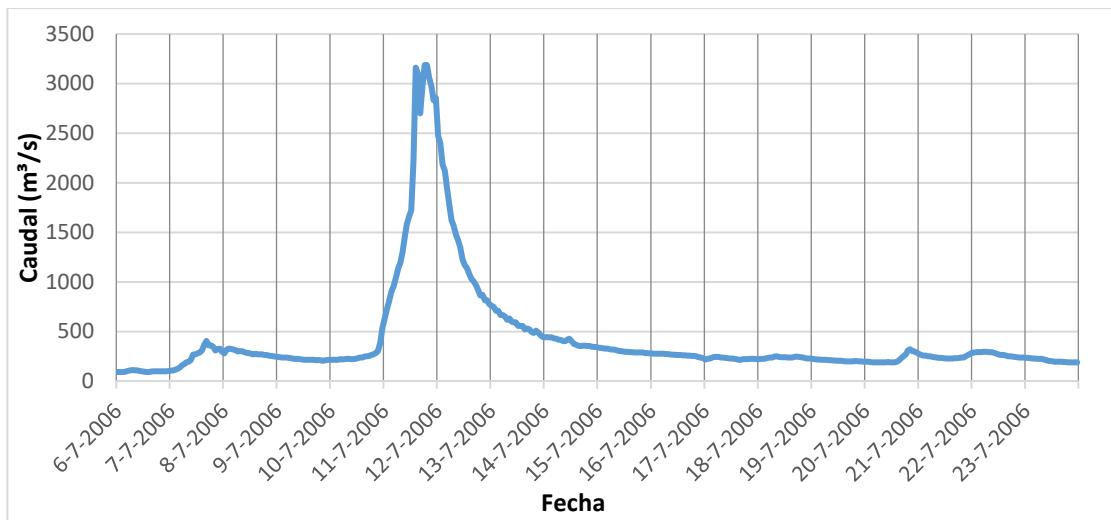


Figura 3.12. Hidrograma de Caudales, de río Duqueco en la confluencia con el río Biobío. (Fuente: Elaboración Propia).

Río Laja:

Es el principal afluente del río Biobío, y el más septentrional dentro de su cauce. Sus aguas provienen del Parque Nacional Laguna del Laja, en la comuna de Antuco, recorriendo 140 km hasta la confluencia. La superficie de su cuenca es de 4,667 km², y se muestra en la Figura 3.13.

La estación fluviométrica más cercana al cruce con el curso fluvial Biobío es *Río Laja en Puente Perales*. En esta se obtuvieron los caudales correspondientes al periodo en estudio, los que representan los alcanzados en el 74 % de la cuenca del río Laja, como se observa en la Figura 3.13. Extrapolando los caudales de esta estación hasta su confluencia con el río Biobío, se obtiene el hidrograma de caudales mostrado en la Figura 3.14.

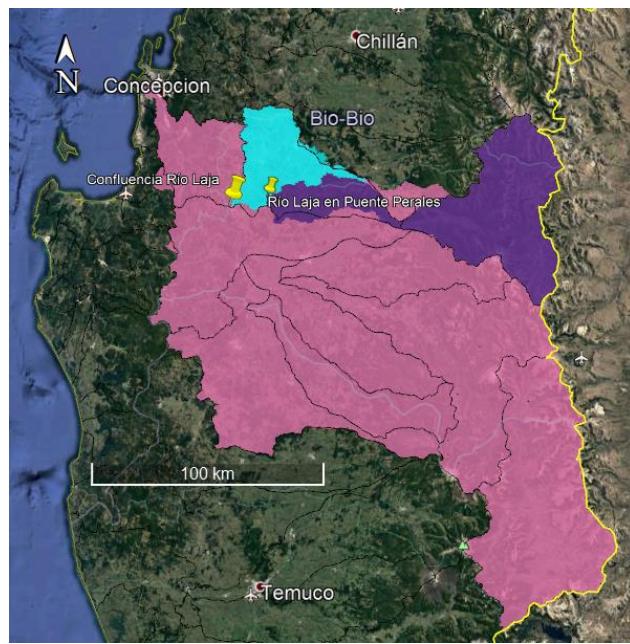


Figura 3.13. Cuenca del río Laja y su relación de superficies con la cuenca hasta la estación *Río Laja en Puente Perales*. (Fuente: Elaboración Propia).



Figura 3.14. Hidrograma de Caudales, de río Laja en la confluencia con el río Biobío. (Fuente: Elaboración Propia).

Río Vergara:

Es uno de los tributarios más importante, aportando una importante cantidad de caudal al río Biobío. La confluencia entre estos cauces ocurre en la localidad de Nacimiento, como lo muestra la Figura 3.15.

El hidrograma de caudales de la Figura 3.16, se genera con los registrados en la estación *Río Vergara en Tijeral*, ubicada en la región de la Araucanía, que recibe las aguas del 64 % de la cuenca del río Vergara (Figura 3.15), extrapolando hasta la confluencia en el río Biobío.

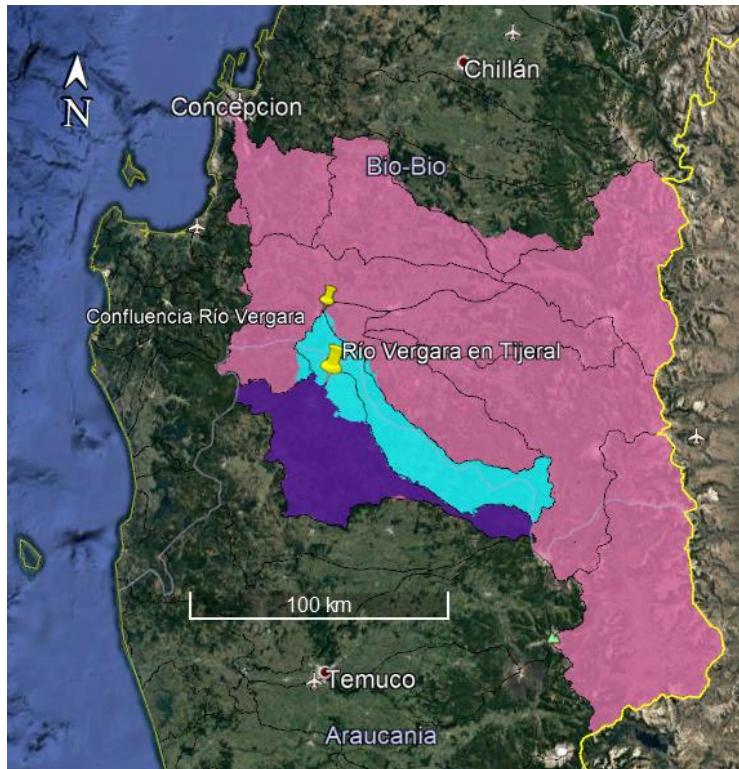


Figura 3.15. Cuenca del río Vergara y su relación de superficies con la cuenca hasta la estación *Río Vergara en Tijeral*. (Fuente: Elaboración Propia).

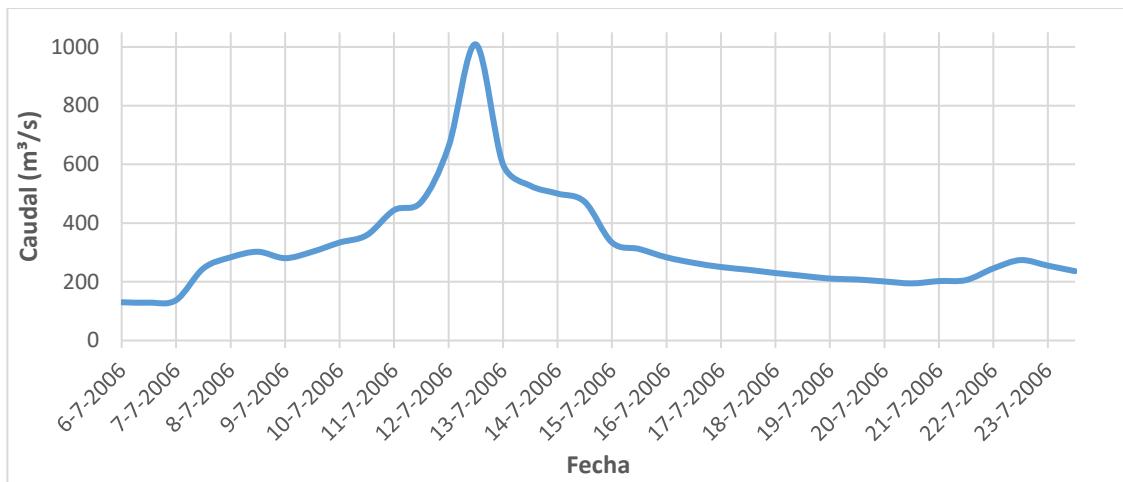


Figura 3.16. Hidrograma de Caudales, de río Vergara en la confluencia con el río Biobío.

(Fuente: Elaboración Propia).

Río Bureo:

Este curso fluvial tributa en el río Biobío próximo a la localidad de Negrete. Sus aguas provienen desde las cercanías de la localidad de Ralco (Figura 3.17).

El hidrograma de caudales de la Figura 3.18 se genera con los registrados en la estación *Río Bureo en Mulchén*, que recibe las aguas del 32 % de la cuenca del río Bureo, como lo muestra la Figura 3.17, extrapolando hasta la confluencia en el río Biobío.

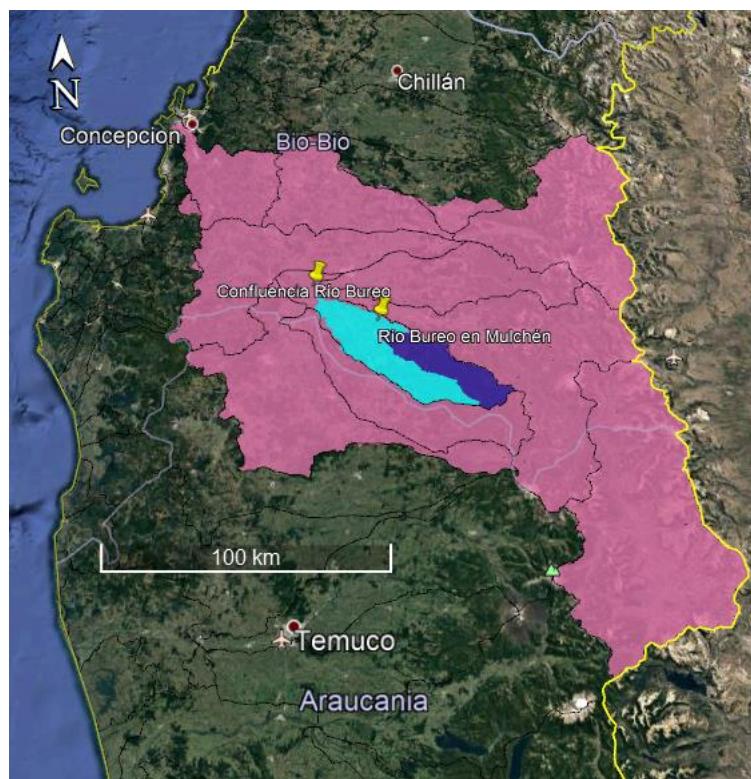


Figura 3.17. Cuenca del río Bureo y su relación de superficies con la cuenca hasta la estación *Río Bureo en Mulchén*. (Fuente: Elaboración Propia).

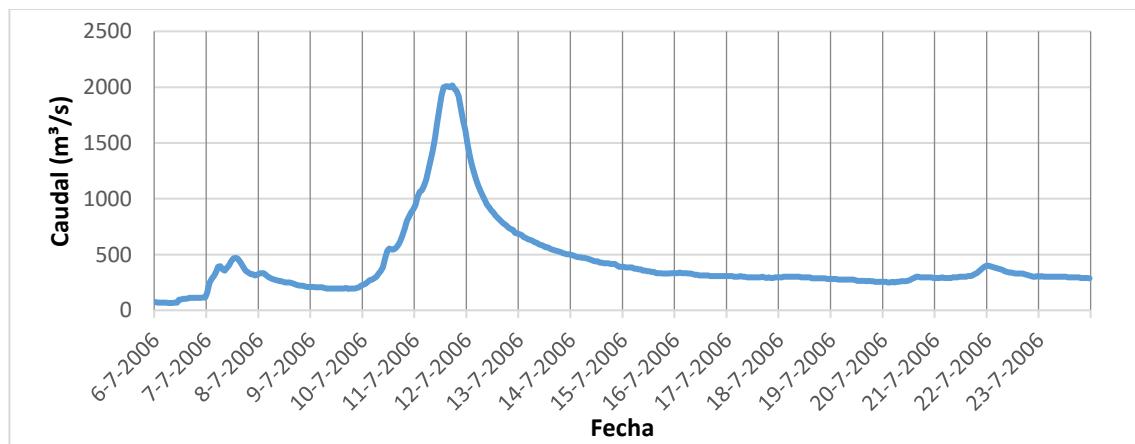


Figura 3.18. Hidrograma de Caudales, de río Bureo en la confluencia con el río Biobío. (Fuente: Elaboración Propia).

3.1.4 Modelo de Rompimiento de Presa

Se añade la represa Angostura al modelo, considerando la capacidad y geometría de su embalse, bajo el método de enrutamiento de grupo de nivel. En el Capítulo 2.2, se menciona que este tiene una capacidad de 100 millones de metros cúbicos, los que se encuentran en una extensión de cinco kilómetros de largo por el río Huequecura, y 16 kilómetros de largo por el río Biobío. Este escenario, se suma dentro de la tormenta que se está utilizando para evaluar el evento, asignando un tiempo inicial en el cual la compuerta se rompe producto de infiltración; para posteriormente analizar los efectos de la ola de crecida generada por las condiciones tanto iniciales como de borde.

Una vez ejecutado el modelo con todas las consideraciones anteriormente mencionadas, el hidrograma de caudales en la estación más aguas abajo del cauce, es decir, cercano a la desembocadura del río Biobío se muestra en la Figura 3.19. Se muestra además en esa Figura, el hidrograma de alturas, presentando un máximo de caudal del orden de 14,000 m³/s, y una altura máxima superior a 4 metros en el instante de mayor crecida.

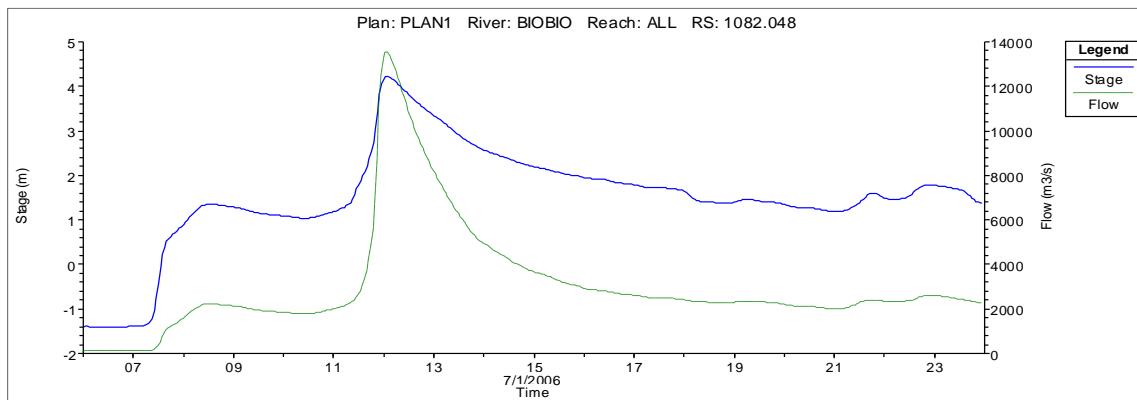


Figura 3.19. Hidrograma de Caudales y de Alturas en la parte baja del río Biobío, entregado por *software* bajo las condiciones de modelación. (Fuente: Elaboración Propia).

Para la calibración del modelo, se han disminuido los coeficientes de rugosidad de Manning en un 10% en todo el transcurso de su cauce y de sus riberas, no presentando diferencias en los resultados entregados en el modelo una vez ejecutado con esta modificación. En consecuencia, se asume que el modelo no es posible de calibrar mediante la modificación de las rugosidades de Manning.

Si se observa la Figura 3.19, en comparación con la Figura 3.5, la geometría del hidrograma de caudales es muy similar, lo que implica un correcto funcionamiento en el comportamiento del río a nivel de software, presentando la crecida en el mismo periodo de tiempo. Sin embargo, se observa que la magnitud alcanzada por la crecida en los resultados del modelo, en la Figura 3.19, es inferior a la otra que representa los datos reales de la tormenta que generó la inundación del año 2006, contando con aproximadamente una diferencia del orden de los 2,000 m³/s en su punto máximo, como lo muestra la Figura 3.20

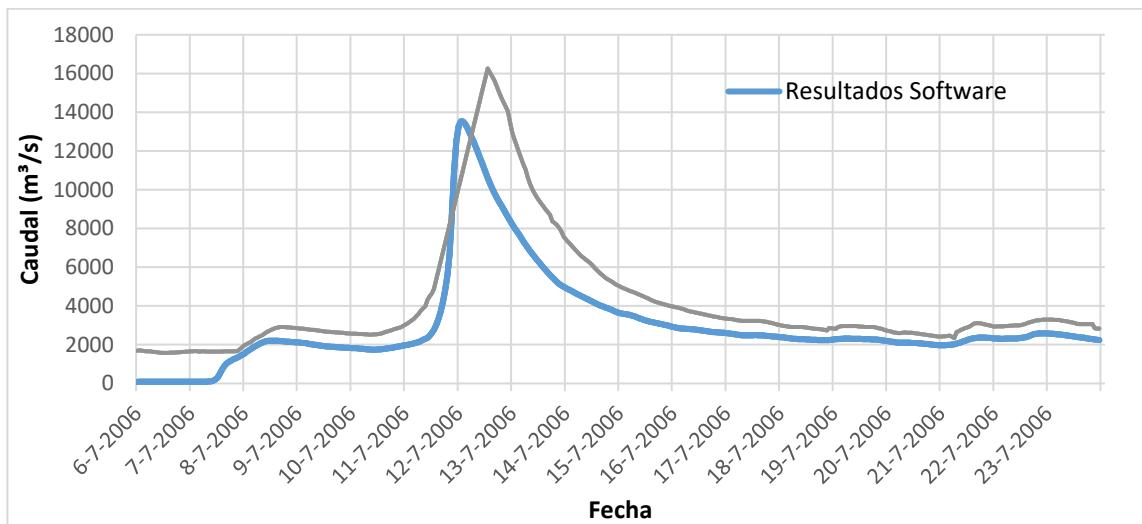


Figura 3.20. Comparación de hidrogramas de caudales de tormenta 2006 en escenario real, y bajo las condiciones de modelación. (Fuente: Elaboración Propia).

3.1.5 Desborde del río Biobío

Considerando los datos hidrológicos registrados en la tormenta que generó el desborde del río Biobío en julio del año 2006, sumado a la ruptura de la compuerta de la represa como escenario de estudio desfavorable, se analiza la ola de crecida que genera este evento, desde la ubicación geográfica del embalse Angostura hacia aguas abajo, en todo el recorrido del cauce, como se muestra en la Figura 3.21.

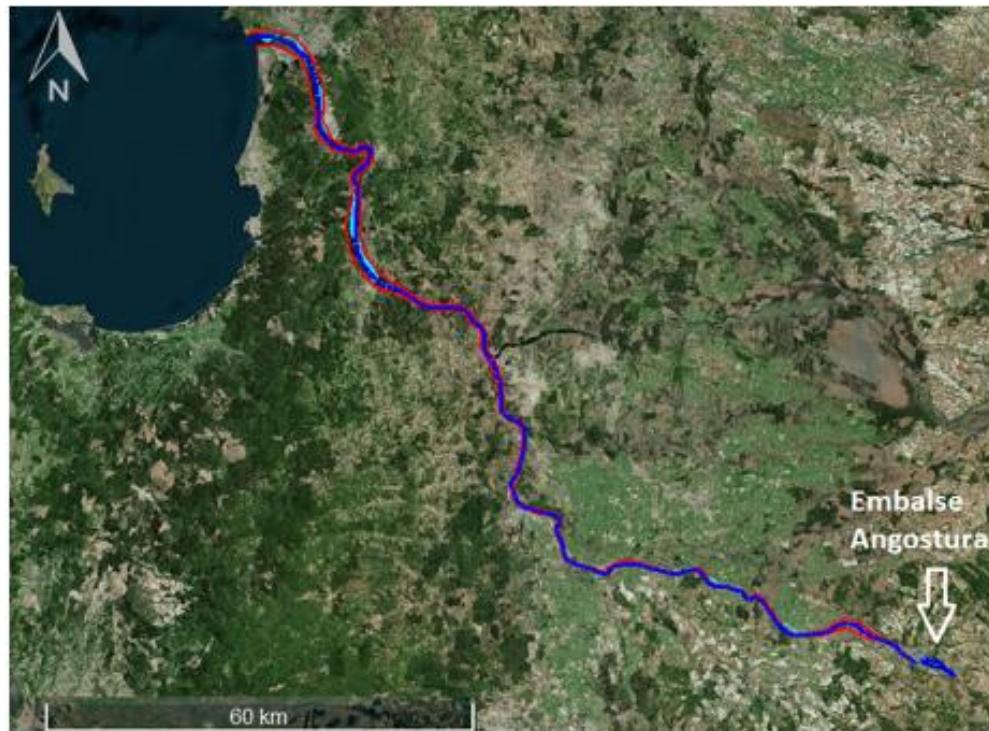


Figura 3.21. Ubicación geográfica del embalse Angostura y tramo del cauce en estudio.
(Fuente: Elaboración Propia).

Dentro del periodo de tiempo en estudio, se programa en la modelación la ruptura de la compuerta y el comienzo de la infiltración de agua el día 11 de julio a las 06:00 am.

Considerando la parte baja del río Biobío como el sector más vulnerable a un posible desborde, según los registros de la tormenta del año 2006 planteadas en la sección anterior; la Figura 3.22 y la Figura 3.23 muestran los resultados del modelo previo y posterior a ocurrido el evento, pudiendo dimensionarse visualmente la magnitud de la ola de crecida.

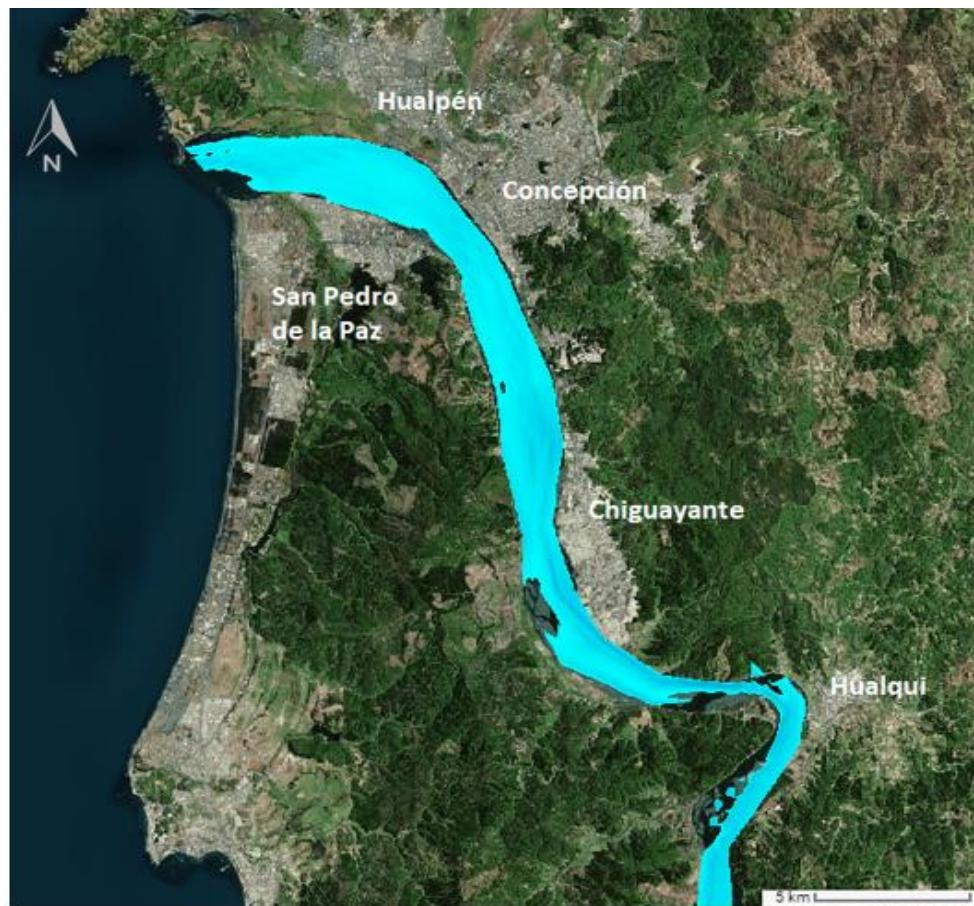


Figura 3.22. Parte baja del río Biobío, previo a la crecida generada por el rompimiento de la compuerta y las intensas lluvias. (Fuente: Elaboración Propia).

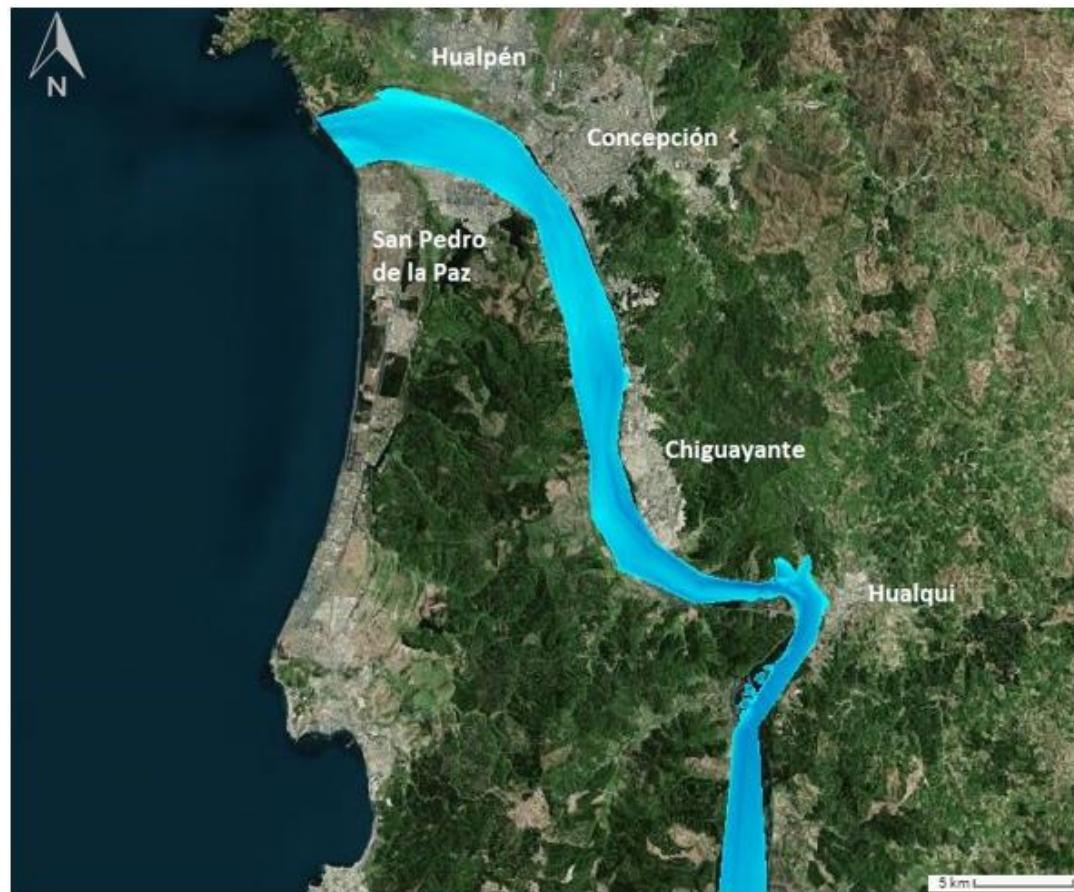


Figura 3.23. Parte baja del río Biobío, posterior a la crecida generada por el rompimiento de la compuerta y las intensas lluvias. (Fuente: Elaboración Propia).

Se observa en las Figuras 3.22 y Figura 3.23 que las comunas más vulnerables a sufrir el desborde del río son Hualqui, Chiguayante, Concepción, Hualpén y San Pedro de la Paz, en los sectores cercanos a las riberas del cauce.

En la comuna de Hualqui se observa un desborde considerable del río, producto del meandro que forma el cauce a un costado de esa localidad, siendo Periquillo el sector más afectado según los resultados del modelo, como se observa en la Figura 3.24 y Figura 3.25.



Figura 3.24. Río Biobío en la comuna de Hualqui, antes de la llegada de la ola de crecida. (Fuente: Elaboración Propia).

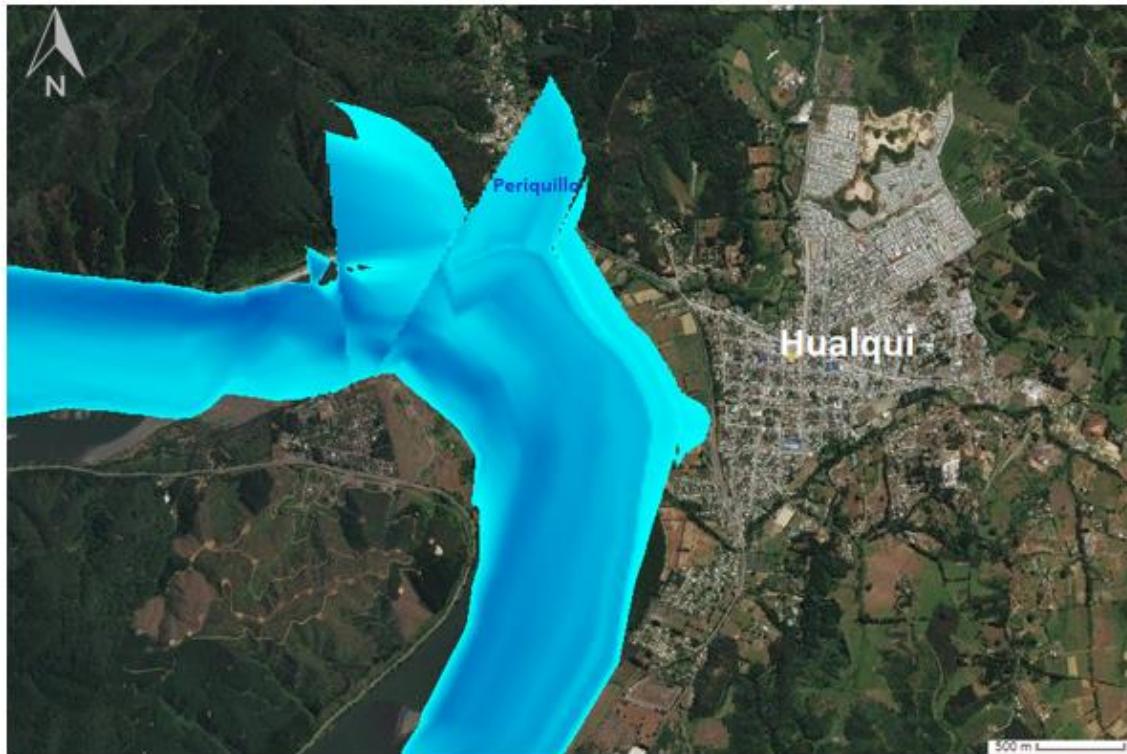


Figura 3.25. Río Biobío en la comuna de Hualqui, una vez llegada la ola de crecida, y zonas de desborde. (Fuente: Elaboración Propia).

Más al norte, se encuentra la comuna de Chiguayante que se caracteriza por estar en su totalidad ubicada en la ribera del río Biobío, teniendo sectores residenciales a solo metros del cauce. La Figura 3.26 y la Figura 3.27 muestran que los sectores más vulnerables a un desborde son La Leonera, en el extremo sur de la comuna; el sector Manquimavida y las residencias cercanas a la Avenida 8 Oriente en su extremo norte.

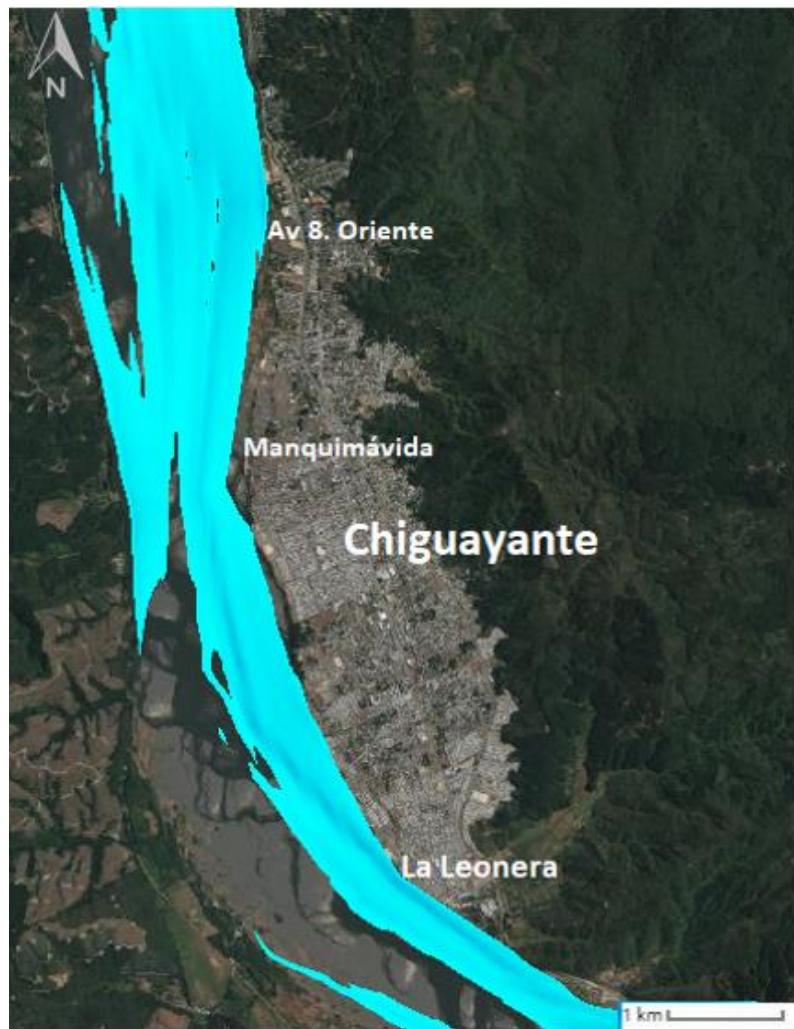


Figura 3.26. Río Biobío en la comuna de Chiguayante, antes de la llegada de la ola de crecida. (Fuente: Elaboración Propia).



Figura 3.27. Río Biobío en la comuna de Chiguayante, una vez llegada la ola de crecida, y zonas de desborde. (Fuente: Elaboración Propia).

En la comuna de Concepción, capital de la región del Biobío, lugar donde se presenta la mayor población y actividad antrópica; no se observa un gran desborde según las imágenes entregadas en los resultados del modelo. Pese a la crecida considerable de caudal, el cauce no excede en gran medida los límites con sus riberas, como se muestra en la Figura 3.28 y Figura 3.29. Cabe destacar también, que en el software en esta modelación no fueron ingresados los puentes como estructuras ubicadas en su cauce; por lo que, en las Figuras mencionadas, no implica que el nivel de la superficie del río sobrepase la altura de los puentes Juan Pablo II y Llacolén, ubicados de norte a sur respectivamente.



Figura 3.28. Río Biobío en la comuna de Concepción, antes de la llegada de la ola de crecida. (Fuente: Elaboración Propia).



Figura 3.29. Río Biobío en la comuna de Concepción, una vez llegada la ola de crecida. (Fuente: Elaboración Propia).

En los últimos kilómetros del cauce, hasta la desembocadura del río Biobío se encuentra la comuna de Hualpén. Aquí si se observan desbordes tanto en la Avenida Costanera, como en sectores más despoblados al oeste de la comuna. La Figura 3.30 y la Figura 3.31 muestran los alcances del desborde producto de la ola de crecida.

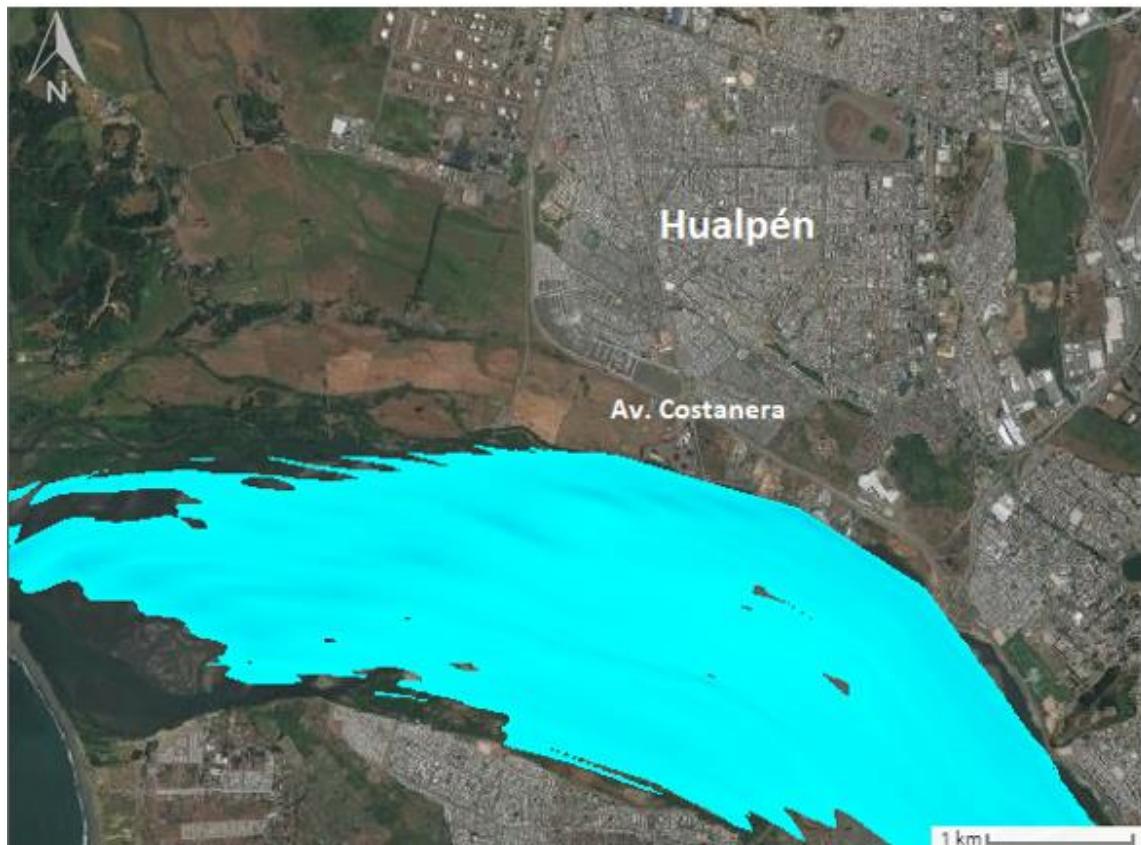


Figura 3.30. Río Biobío en la comuna de Hualpén, antes de la llegada de la ola de crecida. (Fuente: Elaboración Propia).



Figura 3.31. Río Biobío en la comuna de Hualpén, una vez llegada la ola de crecida, y zonas de desborde. (Fuente: Elaboración Propia).

Como última comuna estudiada se encuentra San Pedro de la Paz, ubicada en el lado sur del cauce del río Biobío. Esta comuna también tiene sectores residenciales instalados a solo metros de la corriente de agua, por lo que son muy vulnerables a ser víctimas de un desborde. Así dan cuenta la Figura 3.32 y 3.33 con los sectores Villa Icalma y localidades vecinas, junto al sector Candelaria.



Figura 3.32. Río Biobío en la comuna de San Pedro de la Paz, antes de la llegada de la ola de crecida. (Fuente: Elaboración Propia).



Figura 3.33. Río Biobío en la comuna de San Pedro de la Paz, una vez llegada la ola de crecida, y zonas de desborde. (Fuente: Elaboración Propia).

Al comparar los resultados entregados por el *software*, con las consecuencias reales de lo ocurrido en la tormenta el año 2006 representada por imágenes aéreas, y los sectores por donde el río generó desborde, coinciden en gran parte con los resultados del modelo hidráulico. La Figura 3.34 muestra las zonas inundadas en las cercanías del Puente Juan Pablo II, entre las comunas de Concepción y Hualpén. En ella se observa el desborde del río en casi toda su extensión en ambas comunas, sobre pasando la Avenida Costanera, dejando cubiertas de agua las calles ubicadas entre las viviendas.



Figura 3.34. Fotografía aérea durante el evento de inundación del 2006, en las comunas de Concepción y San Pedro de la Paz (Fuente: Van Heemst et al, 2013)

La Figura 3.31 y Figura 3.22 muestran efectivamente que en los sectores recientemente mencionados se generan desbordes en las mismas riberas que muestra la Figura 3.4. Esto representa la veracidad de los datos de batimetría del canal principal del modelo, y la exactitud de los resultados. Sin embargo, en las

imágenes entregadas en el *software*, el agua no logra ingresar a la urbe al nivel que llegó en la tormenta, quedando detenida solo a metros del cauce principal.

Otra información importante entregada en los resultados del modelo hidráulico, es la hora de llegada de la ola de crecida a la desembocadura del río Biobío, luego del rompimiento programado de la compuerta. Este caudal máximo ocurre el día 12 de julio, a las 01:00 aproximadamente; por lo que la ola de crecida tardaría en llegar, desde el embalse hasta la desembocadura, cerca de 19 horas. Esta información permitiría generar, en un futuro estudio, un protocolo de seguridad de estas comunas afectadas, pudiendo organizar evacuaciones en las localidades evitando posibles tragedias ante un evento como este.

CAPÍTULO 4 – CONCLUSIONES

Las ciudades más susceptibles a sufrir una inundación producto de la crecida del río Biobío generada por el rompimiento de la compuerta de la represa Angostura están ubicadas en los últimos 40 kilómetros del cauce, tal cual ocurrió en la tormenta del 2006. En estas se encuentra Hualqui, Chiguayante, Concepción, Hualpén y San Pedro de la Paz. Además, lo que agrava la situación, es la cantidad de habitantes que asienta estos sectores de la cuenca, habiendo cientos de viviendas a metros del cauce, que podrían quedar en un gran porcentaje, cubiertas de agua.

Comparando la magnitud de la ola de crecida generada en los resultados del modelo (Figura 3.19), con los datos reales medidos en la estación *Río Biobío en Desembocadura* del periodo en estudio (Figura 3.11); la geometría de ambos hidrogramas es idéntica; sin embargo, existe una diferencia en la magnitud del caudal máximo alcanzado. Esto ocurre, debido a la falta de información que existe en algunas corrientes de agua que tributan el río Biobío, como son el estero Hualqui, estero Maipo y estero Coyanco entre otros treinta esteros; además del, río Gomero, río Rele y río Guaqui. La superficie de la cuenca no considerada en las condiciones de borde, está representada en la Figura 4.1, en toda la superficie de color rosado, aguas abajo del Embalse Angostura. Esto podría representar los cerca de 2,000 m³/s de caudal de diferencia entre ambos escenarios.

Dado la longitud del tramo del río en estudio, y la distancia existente entre los perfiles transversales ingresados, la calibración del modelo se logró ajustar sólo en un 90% de los valores iniciales en sus coeficientes de rugosidad de Manning, no presentando variación en los resultados. Al ajustar aún más estos coeficientes, el software no logra estabilizar las condiciones del modelo en sus procesos de cálculo y, por ende, no es capaz de entregar resultados.

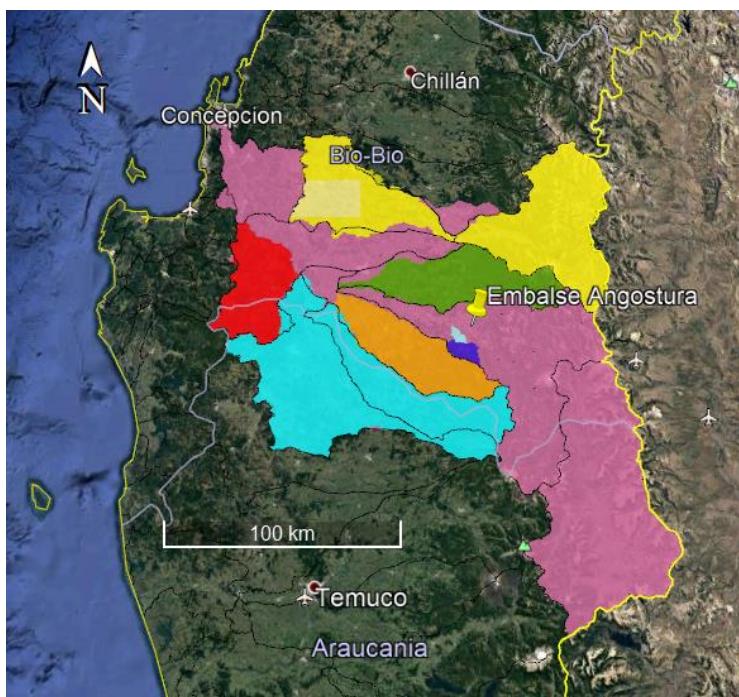


Figura 4.1. Superficie de la cuenca del río Biobío no considerada en las condiciones de borde. (Fuente: Elaboración Propia).

El tiempo de llegada de la ola de crecida desde la ubicación de la compuerta del embalse Angostura hasta la desembocadura del río Biobío, como se menciona en el Capítulo 3, es de 19 horas. Lo que implica, en una relación de distancia-tiempo que, en Hualqui, la primera localidad de las susceptibles a inundación, tardaría en llegar cerca de 15 horas; a Chiguayante cerca de 16 horas; Concepción cercano a las 17 horas, y ya finalmente Hualpén y San Pedro de la Paz entre 18 a 19 horas. Este importante lapso de tiempo, y las consecuencias que podría generar tomando en cuenta lo ocurrido el año 2006, permitieron que se implementara un sistema de alerta temprana de crecidas del río Biobío a partir del año 2018, que beneficie a quince comunas riverenas del cauce; otorgando información de carácter permanente y en tiempo real sobre crecidas que pueda tener el río, buscando que las autoridades comunales actúen de manera oportuna y tomen las medidas preventivas que correspondan (DGA, 2017)

Para la asignación inicial de coeficientes de rugosidad de Manning en cada uno de los perfiles transversales, se ingresó un valor extremadamente alto ($n=1$) en las riveras que estaban urbanizadas, en comparación al orden de los valores típicos en que fluctúa este parámetro y que le fue asignado al cauce principal ($n=0.031$). Esto puede ser una de las consecuencias de que el desborde no haya alcanzado los sectores poblados, y no pudiendo igualar el alcance que se observa en la Figura 3.25.

Las imágenes ASTER de 30×30 m no son completamente capaces de representar la inundación y los alcances del desborde. Esto debido a que las imágenes satelitales, si bien visualmente representan una altimetría irregular que se asocia a la realidad y la geografía del terreno; el satélite promedia las alturas existentes en cada superficie unitaria, dejándola de una altura constante en toda su extensión, hasta el límite con la superficie unitaria vecina. Así pues, a nivel de resultados, no permite el avance del agua hacia los sectores poblados por tener esta una profundidad inferior a la ponderación de altura de la imagen satelital, incluso variando esta altura de agua entre los 50 cm y los 150 cm en algunos sectores; que, en la realidad, si podría avanzar por los sectores planos dentro de esta superficie de 30×30 m.

Si bien existen imágenes satelitales con mayor exactitud, como las de 12×12 m, fueron utilizadas las de 30×30 m por ser un recurso gratuito y de acceso público. Además, debido a la gran superficie de la cuenca y de la zona en estudio específicamente, la cantidad de información que contendrían estas imágenes de 12×12 m generaría la limitante del recurso computacional que demanda este nivel de exactitud, y el tiempo en procesar la información y generar resultados

Otro de los impactos que pudiese generar la crecida significativa que tendría el río Biobío es la posible suspensión del servicio de agua potable. El abastecimiento a la comuna de Concepción, Talcahuano, Hualpén y parte de Chiguayante se genera por la planta La Mochita. Esta potabiliza las aguas del río Biobío, abasteciendo a 595,820 habitantes, aproximadamente (ESSBÍO, 2014). Esta planta puede funcionar hasta con valores de 600 NTU (Unidad

Nefelométrica de Turbidez, por sus siglas en inglés) de turbidez en la captación; niveles registrados en el invierno de 1997 (Muñoz & Urrutia, 2000). Según los registros de caudales instantáneos de la estación *Río Biobío en Desembocadura* del mes de junio del 1997 en que se presentó el caudal máximo (Figura 4.2), el río tuvo una crecida cercana a los 5,600 m³/s con un aumento en su profundidad de 1.44 metros en un periodo de 67 horas, aproximadamente. Este escenario se ve ampliamente superado en los resultados del modelo expresados en la Figura 3.19 y Figura 3.20; donde se tiene una crecida de 9,000 m³/s, con un aumento en su profundidad de 2.20 metros en un periodo aproximado de 24 horas. La comparación de estos parámetros permite concluir que la turbiedad del río en ese periodo podría superar los 600 NTU ocurridos el año 1997, generando la suspensión del servicio de agua potable.

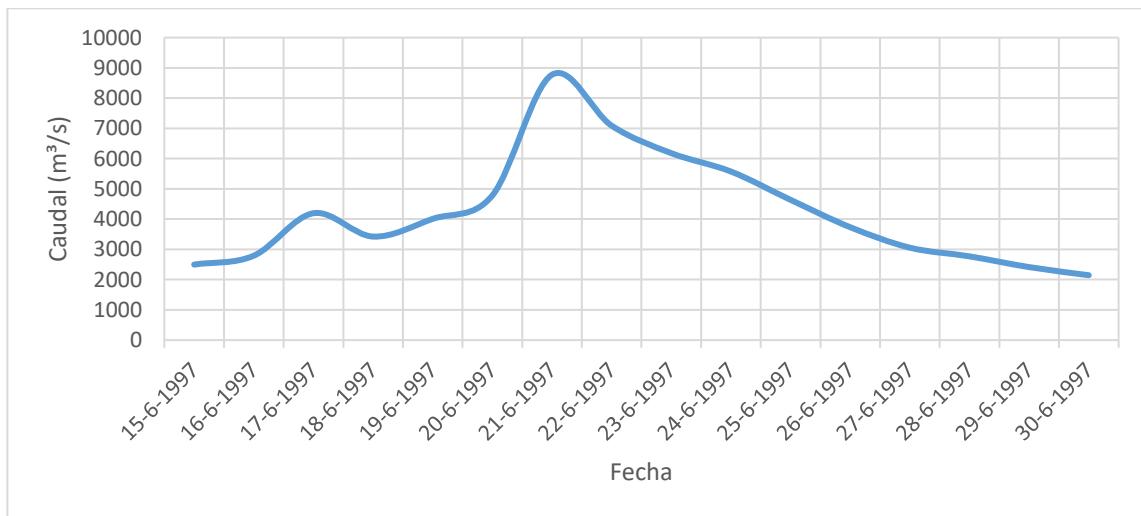


Figura 4.2. Hidrograma de caudales estación *Río Biobío en Desembocadura*, en el invierno de 1997. (Fuente: Elaboración Propia).

4.1 FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Generar un sistema de medición o de estimación de caudales de todos los ríos que tributan el Biobío que no están instrumentados o no tienen información de estadística hidrológica; logrando tener la información del 100% de la cuenca.

Contar con modelos hidrológicos de predicción de caudales ante diferentes escenarios climáticos, como adición a los modelos hidráulicos existentes. Lo anterior con el fin de suponer de mejor forma los valores de crecida y su influencia en el curso fluvial.

Una vez detectados los sectores más susceptibles a una inundación producto del desborde del río en una eventual crecida; generar un proyecto hidráulico para prevenir la salida del cauce y el ingreso a los sectores poblados, evitando así posibles tragedias.

CAPÍTULO 5 – REFERENCIAS

Barnes, H. (1967). *Roughness Characteristics of Natural Channel*. US Government Printing Office.

Bertrán, C., Arenas, J., Parra, O. (2001). *Macrofauna del curso inferior y estuario del río Biobío (Chile): cambios asociados a variabilidad estacional del caudal hídrico*. Revista chilena de historia natural, 74(2), 331-340.

Chow Ven Te (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. California Spanish Books.

Colbún (2008). *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Central Hidroeléctrica Angostura*. Estudio de impacto ambiental.

Dirección General de Aguas (DGA-MOP) (2004). *Determinación de la Disponibilidad de Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas en la Cuenca del Río Maipo Hasta la Confluencia con el Estero Puangue*. Departamento de administración de recursos hídricos.

Dirección General de Aguas (DGA-MOP) (2004). *Determinación de la Disponibilidad de Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas en la Quebrada de los Choros, IV región*. Departamento de administración de recursos hídricos.

Dirección General de Aguas (DGA-MOP) (2004). *Diagnóstico y Clasificación de los Cuerpos de Agua Según Objetivos de Calidad. Cuenca del Río Biobío*. Cade-Idepe, Consultores en Ingeniería.

Dirección General de Aguas (DGA-MOP) (2010). *Ley 20,304. “Sobre operación de embalses sobre alertas y Emergencias de crecidas y otras medidas que indica”. Definición de embalse Ralco como embalse de control*. Ministerio de Obras Públicas.

Dirección General de Aguas (DGA-MOP) (2016). *Atlas del Agua*. Ministerio de Obras Públicas.

Dirección General de Aguas (DGA-MOP) (2017). *Sendas del Agua*. Ministerio de Obras Públicas.

Muñoz, M. & Urrutia, R. (2000). *Ambiente y Territorio en el Proyecto Costanera del río Biobío. Urbano 3(3), 23-31.* Recuperado a partir de: <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RU/article/view/663>

Essbio (2014). Planta La Mochita. Gerencia de Operaciones.

EULA-CHILE, Centro de Ciencias Ambientales (2018). Seminario Universidad de Concepción “*El Sistema Ambiental de la Cuenca del Río Biobío (1990-2018)*”. Universidad de Concepción

Hydrologic Engineering Center (2016). River Analysis System. *Hydraulic Reference Manual. Version 5.0.*

IMNSA Ingenieros Consultores S.A (2013). *Estudio Hidrológico – Hidráulico Para El Diseño del Puente Sobre La Quebrada Padre José.*

Ministerio de Energía de Chile (2016). *Estudio de Cuencas. Análisis de las Condiciones para el Desarrollo Hidroeléctrico en las Cuencas del Maule, Biobío, Toltén, Valdivia, Bueno, Puelo, Yelcho, Palena, Cisnes, Aysén, Baker y Pascua.*

Ministerio Secretaría General de la República de Chile (2000). *Decreto Supremo 90. Establece normas de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.* Gobierno de Chile.

Oficina Nacional de Emergencias del Ministerio del Interior (ONEMI) (2006). *Informe Sistema Frontal 10 al 13 de Julio 2006.*

Revista Energética de Chile (2016). *Cuenca del río Biobío es la que tiene mayor potencial hidroeléctrico del país.* Recuperado de: <http://www.revistaei.cl/2016/01/18/cuenca-del-rio-biobio-es-la-que-tiene-el-mayor-potencial-hidroelectrico-del-pais/#>

Sánchez, J. (2018). *Por qué son importantes los ríos y lagos.* Recuperado de <https://www.ecologiaverde.com/por-que-son-importantes-los-rios-y-lagos-1329.html>

Soberón, A. (2015). Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile. *Rastreo de la Crecida Máxima Registrada en el Río Biobío Aplicado a la Verificación Hidráulica del Puente Llacolén, Región del Biobío, Chile.*

Superintendencia del Medio Ambiente del Gobierno de Chile, (2013). *Informe de Fiscalización Ambiental. Inspección Ambiental. Proyecto Central Hidroeléctrica Angostura.*

The Institution of Engineering and Technology, (2016). *Hydroelectric Power. A Guide for Developers and Investors.* International Finance Corporation.

Valdobinos & Parra (2006), Publicaciones Centro EULA. *La Cuenca del Río Biobío. Historia Natural de un Ecosistema de Uso Múltiple.* Universidad de Concepción.

Van Heemst, C., Willems, J., Weller A., Van Verseveld, H., Caamaño, D. and Aráguiz R. (2013). *Flood defense alternatives for the lower Biobío River, Chile.* Obras y Proyectos 14. 22-23.

Vidaud I. y E. (2013). *La Monumental Represa China.* Construcción y Tecnología en Concreto.