



Gobierno
de Chile

**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN**

**ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE CAUDALES
RÍO LAS CHINAS — RÍO
SERRANO. REGIÓN DE MAGALLANES Y
ANTÁRTICA CHILENA**

RESUMEN EJECUTIVO

REALIZADO POR:

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CAMBIO GLOBAL UC

S.I.T. N° 386

Santiago, Junio 2016

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas
Carlos Estévez Valencia

Jefe División de Estudios y Planificación
Adrián Lillo Zenteno

Inspector Fiscal
Baudilio Madrid Sánchez

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CAMBIO GLOBAL UC

Jefe de Proyecto
Ingeniero Agrónomo Francisco Meza Dabacens

Profesionales

Ingeniero Civil Hidráulico, David Poblete L.
Ingeniero Civil Ambiental, Sebastián Vicuña D.
Ingeniero Agrónomo, Eduardo Bustos S.
Ingeniera Agrónoma, Stéphanie Orellana B.

Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, Damián Tosoni
Ingeniera Civil Hidráulica, María Luisa Cruzat

ÍNDICE

1	Introducción	6
1.1	Antecedentes del Estudio	6
1.2	Objetivos del Estudio	7
2	Descripción de la Zona de Estudio	8
2.1	Generalidades	8
2.2	Climatología	8
2.3	Características de la cuenca hidrográfica	9
3	Recopilación de Información Base	11
3.1	Levantamiento de información bibliográfica	11
3.2	Recopilación de información de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales	12
3.2.1	Información actual sobre derechos de aprovechamiento.....	12
3.2.2	Escenarios futuros para derechos de aprovechamiento.....	14
3.3	Recopilación información hidrometeorológica disponible en la zona estudio	16
3.3.1	Estaciones Meteorológicas.....	16
3.3.2	Estaciones Fluviométricas	20
3.3.3	Estaciones Nivel de Lagos	21
4	Instalación de estación Fluviométrica	23
4.1	Instalación de estación fluviométrica en río Paine	23
4.2	Comentarios y proceso de descarga de datos	25
5	Análisis de imágenes satelitales y Batimetría de los lagos del toro, porteño y maravilla	26
5.1	Introducción	26
5.2	Procesamiento de imágenes TH-1	26
5.2.1	Introducción	26
5.2.2	Obtención del DEM	27
5.2.3	Filtrado y depuración de errores.....	28
5.3	Levantamiento Batimétrico	30
5.3.1	Introducción	30
5.3.2	Resultados de los Sondeos Batimétricos	31
5.4	Curvas de volumen vs elevación	35
5.5	Cota de desagüe del río Serrano	37

6	Modelo para el Balance Hídrico.....	38
6.1	Metodología de generación de series sintéticas de caudales.....	39
6.2	Principales componentes del Balance Hídrico del Lago del Toro....	40
6.3	Escenarios	41
6.4	Desarrollo del modelo WEAP	42
6.5	Resultados.....	43
6.5.1	Balance hídrico lago del Toro	43
6.5.2	Balance hídrico río de Las Chinas	51
6.5.3	Proyecciones futuras.....	54
7	Conclusiones	60
7.1	Información base y relleno de datos.....	61
7.2	Derechos de aprovechamiento.....	63
7.3	Balance Hídrico	64
8	Referencias.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Porcentaje de derechos con coordenadas geográficas para las subcuencas del río Serrano.	13
Tabla 3.2. Derechos de agua concedidos según uso y subcuenca del río Serrano.	14
Tabla 3.3. Estaciones con mediciones de precipitación en el área de estudio.	17
Tabla 3.4. Estaciones con medición de temperatura en área de estudio.	19
Tabla 3.5. Estaciones con medición de caudal en área de estudio.	20
Tabla 3.6. Estaciones con medición de altura de agua en lagos	21
Tabla 5.1. Resultados de los sondeos para los tres lagos. A) Lago del Toro, B) Lago Porteño y C) Lago Maravilla	31
Tabla 5.2. Datos para la construcción de curvas volumen vs elevación de lagos (Hm ³).	36
Tabla 5.3. Rango de los modelos batimétricos obtenidos.	38
Tabla 6.1. Proporción de caudal aportado por cada cuenca de entrada al lago a nivel mensual.	45
Tabla 6.2. Proporción de caudal aportado por cada cuenca de entrada al lago a nivel mensual.	47
Tabla 6.3. Caudal anual en las cuencas de entrada y salida del lago del Toro (m ³ /s), con y sin considerar derechos de agua.	48
Tabla 6.4. Porcentaje de caudal aportado por cada subcuenca del río de Las Chinas a nivel mensual.	52
Tabla 6.5. Porcentaje de caudal aportado por cada subcuenca del río de Las Chinas a nivel mensual.	53
Tabla 6.6. Porcentaje de entrada aportado por cada cuenca al Lago del Toro a nivel anual.	56
Tabla 6.7. Porcentaje aportado por cada subcuenca del río de Las Chinas a nivel anual (m ³ /s)	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Isoyetas e Isotermas en zona de estudio.	9
Figura 2.2. Principales ríos y lagos en zona de estudio.	10
Figura 3.1. Estaciones con mediciones de precipitación en zona de estudio.	18
Figura 3.2. Estaciones con mediciones de temperatura en zona de estudio.	19
Figura 3.3. Estaciones con mediciones de caudal en zona de estudio.	21
Figura 3.4. Estaciones con medición de nivel de altura de agua en lagos.	22
Figura 4.1. Imagen satelital, Puente Weber en Torres del Paine.	23

Figura 4.2. Izquierda: Caja Nema, estructura que otorga sostén y protección a los instrumentos. Derecha: foto que muestra la posición a la que fue instalada la caja Nema sobre la estructura metálica.	24
Figura 4.3. Radar RLS, anclado a la estructura metálica del puente.....	25
Figura 4.4. Opciones desplegadas en el menú del programa "OTT Data Logger Operating Program".	25
Figura 5.1. Representación de la zona adquirida a través de imágenes satelitales.	27
Figura 5.2. Modelos de Elevación Digital obtenido, aún sin procesar (en metros sobre el nivel del mar).....	28
Figura 5.3. Modelo de Elevaciones preliminar.	29
Figura 5.4. Modelo de Elevaciones final.	30
Figura 5.5. Imagen del área de interés del proyecto.	31
Figura 5.6. Modelo Batimétrico del Lago Maravilla.	33
Figura 5.7. Modelo Batimétrico hasta Cota 0 del Lago Porteño.....	34
Figura 5.8. Modelo Batimétrico hasta Cota 20 del Lago Toro.	35
Figura 5.9. Batimetría en la zona de desagüe del Lago El Toro en el río Serrano.	37
Figura 6.1. Esquema conceptual del comportamiento hidrológico asociado a un lago. Q1, Q2, Q3: Caudales de entrada al lago. Qs: Caudal de desagüe del lago. Ex: Extracciones de agua. PP: Precipitación en el lago. Ev: Evaporación del lago.	38
Figura 6.2. Diagrama del balance hídrico de la cuenca del río Serrano hasta su desembocadura al mar.	39
Figura 6.3. Esquema inicial del modelo WEAP.	43
Figura 6.4. Porcentaje aportado por cada cuenca de entrada al lago al nivel anual (%), sin considerar extracción de derechos de agua.	44
Figura 6.5. Porcentaje aportado por cada cuenca de entrada al lago al nivel anual (%), considerando extracción de derechos de agua.	46
Figura 6.6. Elevación observada y modelada en el lago del Toro. (a) Serie mensual. (b) Serie media mensual.....	49
Figura 6.7. Entradas y salida del lago del Toro.....	50
Figura 6.8. Porcentaje aportado por cada subcuenca del río de Las Chinas sin la extracción de derechos de agua.	51
Figura 6.9. Porcentaje aportado por cada subcuenca del río de Las Chinas considerando extracción de derechos de agua.	52
Figura 6.10. Porcentaje aportado por cada cuenca de entrada al Lago del Toro a nivel anual. (a) Escenario actual (Figura 6.4), período 2001-2015. (b) Escenario de mayor cambio en la cuenca del río Serrano (Intensivo-Optimista), período 2036-2050.	56

Figura 6.11. Porcentaje aportado por cada subcuenca del río de Las Chinas a nivel anual (m^3/s). (a) Escenario actual (Figura 6.9), período 2001-2015. (b) Escenario de mayor cambio en la subcuenca completa (Intensivo-Optimista), período 2036-2050.	58
Figura 6.12. Evaporación Neta del Lago del Toro para el escenario de Referencia y para los dos escenarios de Cambio Climático.	59
Figura 6.13. Caudal medio mensual en el río Serrano en desagüe lago del Toro para el escenario de Referencia y para los dos escenarios futuro.	60

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 6.1. Ecuación del Balance Hídrico del Lago del Toro	41
--	----

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes del Estudio

Una de las principales hoyas hidrográficas de la provincia de Última Esperanza, es la cuenca del río Serrano, cuya cuenca tiene casi una tercera parte del total regional y desagua todo el sistema hídrico del Parque Nacional Torres del Paine, recibiendo entre otros aportes el del río de Las Chinas. Por otra parte, el río Serrano está inserto al interior de un Parque Nacional, por Decreto del Ministerio de Agricultura N° 315, de 1979, el cual establece los límites del Parque Nacional Torres del Paine, en la comuna de Torres del Paine, provincia de Última Esperanza. Debido a las condiciones naturales del área, existen varias especies de fauna que se encuentran en alguna categoría de conservación, como por ejemplo el huemul, ñandú, puma, puye, peladilla y especies de flora tales como el Ciprés de las Guaitecas¹.

Dada la importancia de esta cuenca en la mantención de la biodiversidad y el equilibrio ecológico, es que la Dirección General de Agua buscó realizar estudios técnicos necesarios para poder determinar los reales efectos e implicancias que tendría una variación del caudal que aporta la cuenca del río de Las Chinas al río Serrano al Lago del Toro y sus implicancias para la existencia del Parque Nacional Torres del Paine de manera de establecer en cuánto afecta una variación en el caudal (dado por mayor explotación, por diferencias de usos, cambios climáticos, etc.) del río de Las Chinas al río Serrano. Para ello, fue necesario poder considerar el efecto regulador que ejercen los lagos del Toro, Porteño y Maravilla.

Por lo tanto, la información técnica obtenida de este trabajo resulta de importancia, puesto que sentará las bases y sustento técnicos para el futuro análisis hidrológico y modelos numéricos, generando así una visión a largo plazo que se convierta en una carta de navegación y sustente el desarrollo productivo y humano de la zona de estudio bajo un concepto de sostenibilidad, armonizando las actividades productivas con la protección y conservación de los ecosistemas únicos que se encuentran en el Parque.

¹ <http://www.sinia.cl/1292/w3-article-47769.html>

1.2 Objetivos del Estudio

El objetivo principal de la presente consultoría fue el de realizar los estudios necesarios para obtener las caracterizaciones técnicas topográficas y batimétricas de los Lagos del Toro, Porteño y Maravilla, considerando la cuenca del río de Las Chinas, información que servirá de base para realizar el análisis de variabilidad de caudales entre río de Las Chinas y río Serrano y del volumen almacenado en los Lagos del Toro, Porteño y Maravilla.

Para alcanzar el objetivo general del estudio, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Definición del estado del arte en cuanto a estudios y antecedentes que constituyan un aporte al objetivo del estudio (geomorfología, topografía, pluviometría, fluvimetría, estudios de inundación, usos y demanda de agua, etc.).
- Caracterización de la red hídrica del área de estudio, considerando cuencas con y sin información fluviométrica.
- Caracterización hidrológica y morfológica del sistema lacustre del Toro/Porteño/Maravilla.
- Balance hídrico histórico con volumen de control dado por el sistema lacustre del Toro / Porteño / Maravilla.
- Generación de un proyecto SIG (Sistema de Información Geográfica) con toda la información recopilada y generada en el estudio.

Se realizó además un balance hídrico completo de la cuenca del río Serrano, desde las altas cumbres y delimitación de la cuenca hasta el desagüe del Lago del Toro por el río Serrano. Esto incluye el análisis de las entradas y salidas de agua desde el Lago del Toro, su capacidad de almacenamiento y su rol de regulación de caudales del río Serrano.

2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 Generalidades

La cuenca del río Serrano, ubicada en la Región de Magallanes y Antártica Chilena, es de tipo trasandino con una extensión de 6.673 km², formando parte de ella una serie de grandes y pequeños lagos concatenados y otros situados en paralelo (DGA, 2004).

Desde el punto de vista político - administrativo, la cuenca del río Serrano forma parte de la Región de Magallanes y Antártica Chilena, abarcando la provincia de Última Esperanza y las comunas de Natales y Torres del Paine. La cuenca posee una superficie de 667.300 Ha equivalentes al 0,5% de la Región. El único asentamiento humano de importancia emplazado en el sector sur -oriental de la cuenca corresponde al poblado de Cerro Castillo.

La principal actividad económica de la cuenca es el turismo ya que posee sitios naturales de gran valor paisajístico. Entre estos atractivos naturales se encuentran los sitios declarados como áreas bajo la protección oficial del Estado, las Áreas Silvestres Protegidas, los que corresponden a los Parques Nacionales Torres del Paine y Bernardo O'Higgins, así como numerosos cuerpos lacustres, glaciares y ventisqueros.

El poblado de Cerro Castillo se dedica a la crianza de ganado ovino y apoyo al turismo. Este poblado otorga el aprovisionamiento de abarrotes a las estancias vecinas, e información turística a los visitantes que acceden por el paso fronterizo Don Guillermo, provenientes de Calafate, República Argentina. La ganadería ovina y bobina también constituye una de las principales actividades económicas de la cuenca (DGA, 2004).

2.2 Climatología

La cuenca del río Serrano, presenta un clima Frío Estepárico en los sectores bajos y de Tundra, en los sectores de mayores alturas (cumbres). Este clima durante el verano es muy variable por lo que en un mismo día puede estar soleado, nublado, con lluvia e incluso nevar. La temperatura máxima puede oscilar entre los 25°C y los 10°C, en tanto, que la mínima puede alcanzar valores bajo los 0°C. En invierno las condiciones son más extremas. Precipita y nieva a

lo largo de todos los meses con valores que no sobrepasan los 60 mm mensuales (DGA, 2004).

Existe un fuerte gradiente de precipitaciones, por un lado con precipitaciones que rondan los 8.000 mm por año en el sector occidental de la cuenca, sobre los brazos de Campos de Hielo Sur y sus glaciares asociados y por otro, el sector oriental de la cuenca, con precipitaciones medias de sólo 200 mm. Esto produce distintos tipos de climas, ecosistemas y vegetación en una cuenca de tamaño pequeño.

La siguiente figura muestra las isoyetas e isotermas provenientes del Balance Hídrico Nacional (DGA, 1987) las cuales fueron calculadas y mapeadas solamente para el lado chileno de la cuenca del río Serrano.

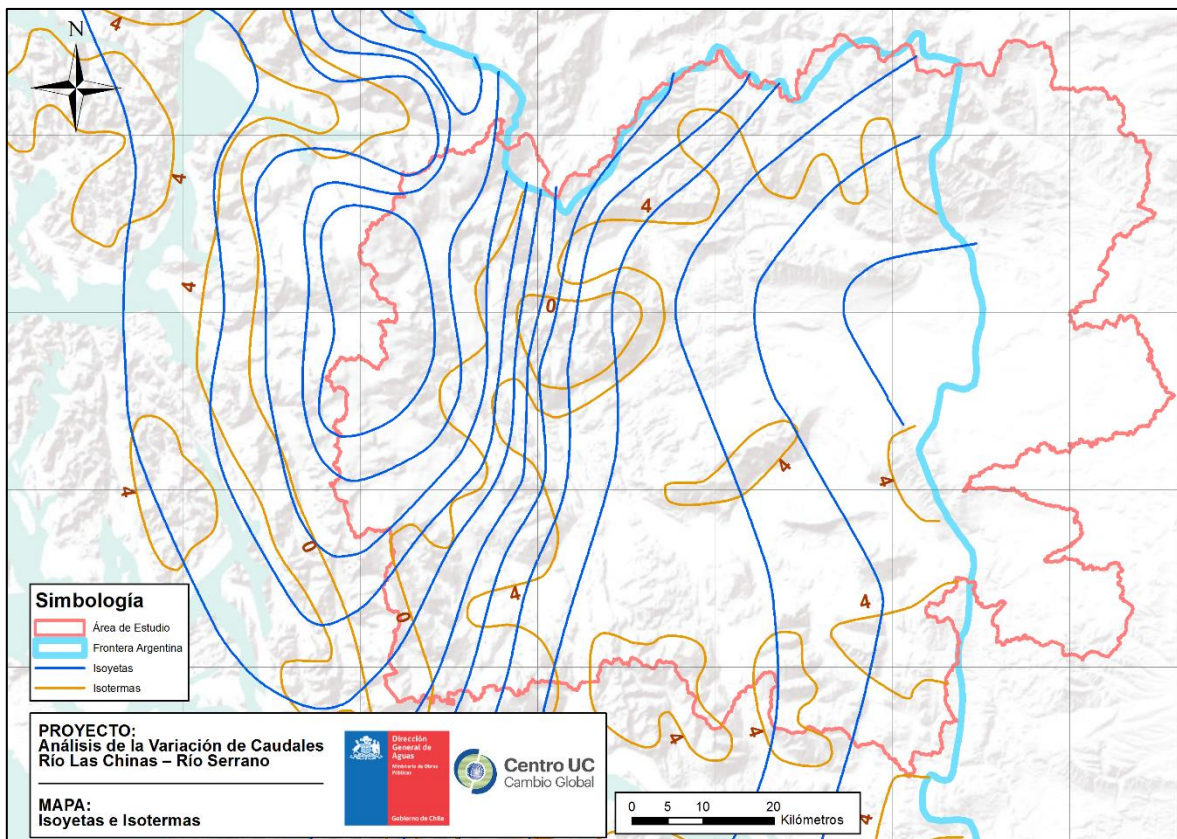


Figura 2.1. Isoyetas e Isotermas en zona de estudio.
Fuente: *Elaboración propia en base a información DGA*

2.3 Características de la cuenca hidrográfica

El río Serrano, de 38 km de recorrido, se genera como desagüe del lago Toro en el extremo más occidental de este gran cuerpo de agua. Recorre serpenteando

una extensa llanura aluvial cubierta en parte por mallines y turberas. En el área Norte de la cuenca del río Serrano, se pueden distinguir dos sistemas hidrográficos principales:

- La hoya del río Paine, la cual presenta un marcado régimen glaciar y drena el área nor-oeste de la cuenca
- La hoya del río las Chinas, la cual presenta un régimen hidrológico de alimentación mixta, o nivo-pluvial.

Ambas hoyas hidrográficas desaguan en el lago del Toro, en cuyo extremo más occidental nace el río Serrano de 38 km de recorrido, que finaliza su recorrido en el Seno de Última Esperanza (DGA, 2010).

El Lago del Toro, como otros lagos de la zona, es producto del retroceso de glaciares durante el último período glaciar. Según Solari et. Al (2012), los grandes lagos de la zona, como el Lago del Toro, Pehoé, Sarmiento y Nordenskjöld, fueron alguna vez un gran lago, llamado el Gran Lago Tehuelche.

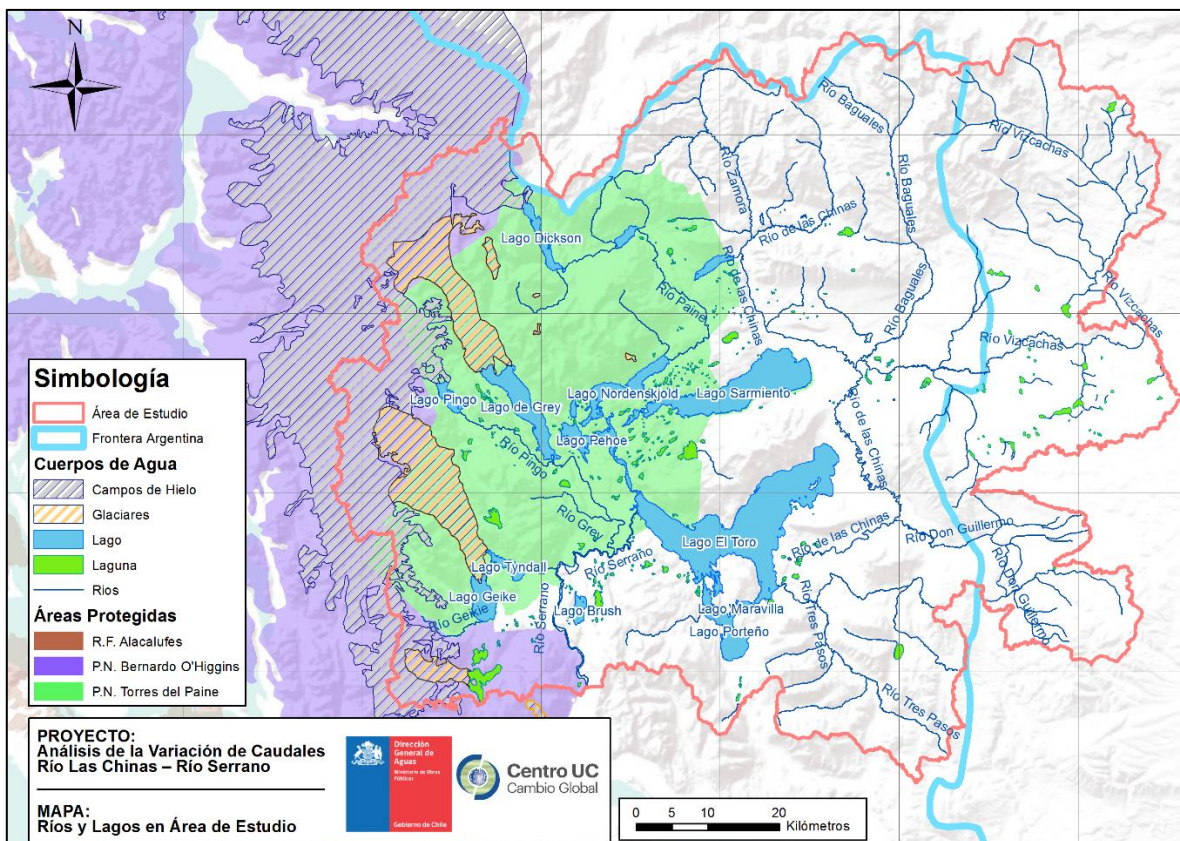


Figura 2.2. Principales ríos y lagos en zona de estudio.
Fuente: Elaboración propia en base a información DGA.

Por el lado Este de la cuenca, los ríos de Las Chinas y Tres Pasos desaguan sobre el Lago del Toro. El río de Las Chinas nace en la zona norte de la cuenca y describe una serie de meandros y curvas hasta desembocar en el Lago del Toro. Al río de Las Chinas, le tributan otros ríos menores, como los ríos Zamora, Baguales y Vizcachas. Todos estos ríos provienen de la zona norte de la cuenca, donde en invierno se acumula nieve que luego se derrite en primavera-verano. El río Vizcachas nace en Argentina y se une al río de Las Chinas ya en territorio chileno.

El río Tres Pasos proviene desde Argentina por el lado suroriente de la cuenca. Existen otras sub-subcuenas con las hoyas de los lagos del Toro y Sarmiento que prácticamente no poseen grandes ríos y que sólo reciben agua de los aportes por precipitaciones y los desagües de pequeños esteros. Es importante notar que aunque la hoya del lago Sarmiento es de carácter endorreico, de todas maneras se puede conectar a la cuenca a través de flujos sub-superficiales y subterráneos

Por último, el lado noroeste de la cuenca del río Serrano está influenciado fuertemente por los glaciares que se descuelgan desde Campos de Hielo Sur y que aportan a la hidrología de la cuenca principalmente durante la primavera y verano debido al deshielo producto del aumento de las temperaturas promedio. Los pequeños valles al interior del Macizo del Paine también aportan a la hidrología de la cuenca de manera mixta de acuerdo a si existen o no glaciares en ellos.

3 RECOPILOCIÓN DE INFORMACIÓN BASE

3.1 Levantamiento de información bibliográfica

Para el presente estudio se recopiló una serie de estudios e informes técnicos que incluyen información relevante para el equipo consultor, ya sea por la información de base que contienen, así como por información de referencia y normas necesarias de considerar a la hora de enfrentar el proyecto.

A continuación se listan los documentos y referencias revisadas para este estudio.

- Rev.1. Análisis de metodología y determinación de caudales de reserva turísticos (Aquaterra Ingenieros - DGA, 2010)

- Rev.2. Diagnóstico y Clasificación de los cuerpos de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Serrano (CADE-IDEPE - DGA, 2004)
- Rev.3. Especificaciones técnicas y presupuesto, Estación fluviométrica río Las Chinas (Sergio Silva Fuenzalida, 1979, presentado a DGA)
- Rev.4. Decreto 75 sobre el establecimiento de la norma secundaria de calidad ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales de la cuenca del río Serrano, (SEGEGOB, 2010)
- Rev.5. Declaración de impacto ambiental construcción puente Weber Ruta Y-156 Provincia de Última Esperanza XII Región de Magallanes y Antártica Chilena (Ministerio de Obras Públicas, Marzo 2007).

3.2 Recopilación de información de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales

3.2.1 Información actual sobre derechos de aprovechamiento

En base a la información de coordenadas obtenida desde el Catastro de Solicitudes, se generó un mapa de la zona de estudio en el que aparecen los estados de las solicitudes de derechos de aguas en el área.

Es importante hacer notar que la información respecto a los derechos de aprovechamiento no siempre es completa, faltando en algunos casos información respecto a las coordenadas de ubicación del derecho, lo que implica que el análisis territorial sólo puede hacerse para un porcentaje de las solicitudes y concesiones registradas. Esto significa que los mapas de derechos de agua y tablas mostradas a nivel de zona de estudio y parque nacional deban ser vistos como una primera aproximación al análisis territorial de los derechos. En la Tabla 3.1 se presenta el porcentaje de derechos concedidos en la cuenca del río Serrano que cuenta con coordenadas de ubicación.

Tabla 3.1. Porcentaje de derechos con coordenadas geográficas para las subcuencas del río Serrano.

Subcuenca	% derechos concedidos con coordenadas de ubicación
Lago del Toro	93%
Lago Sarmiento	100%
Lagos Nordenskjöld y Pehoé y río Paine en Desembocadura	100%
Río de Las Chinas Entre Antes Junta con río Baguales y Lago del Toro	100%
Río Grey	100%
Río de Las Chinas en junta río Baguales	57%
Río Paine en desembocadura Lago Nordenskjöld	100%
Río Serrano entre Lago del Toro y desembocadura	100%
Río Tres Pasos	95%

Fuente: Elaboración propia en base a datos DGA, 2015

En lo que respecta a los derechos concedidos de la cuenca del río Serrano en general, es posible caracterizar el tipo de uso que se hace de los recursos superficiales, así como de las actividades involucradas.

En lo que respecta al uso específico de estos derechos concedidos, existen dos usos principales explícitamente señalados en los registros: Bebida / Uso doméstico / Saneamiento y Riego. Lamentablemente, muchos registros (95% del total) no disponen de información explícita respecto al uso que se hace del recurso, sobre todo en aquellos no consuntivos, no pudiendo identificar y caracterizar de manera acabada estos y otros usos que se saben están presentes en la región, tales como Uso Minero, Uso Industrial, Piscicultura y Generación Hidroeléctrica.

En la Tabla 3.2 se presenta la distribución de derechos en la cuenca, según uso y subcuenca, en donde destacan las áreas del Lago del Toro, río de Las Chinas y río Tres Pasos como aquellos que presentan la mayor intensidad de uso de agua en la cuenca, siendo consistente con la ubicación de las principales actividades económicas presentes, tales como instalaciones turísticas, estancias ganaderas y agricultura y actividad piscícola.

Tabla 3.2. Derechos de agua concedidos según uso y subcuenca del río Serrano.

Sub Cuenca	Uso del Agua			
	Bebida / Uso Doméstico / Saneamiento (l/s)	Riego (l/s)	Uso ND* (l/s)	Total general (l/s)
Lago del Toro	5	272	15.682	15.958
Lago Sarmiento	46			46
Lagos Nordenskjöld y Pehoé y río Paine en Desembocadura	496	43		539
Río de las Chinas Entre Antes Junta con río Baguales y Lago del Toro	39		210	249
Río Grey	2			2
Río de Las Chinas en junta río Baguales			1.905	1.905
Río Paine en desembocadura Lago Nordenskjöld	5	204		209
Río Serrano entre Lago del Toro y desembocadura	16			16
Río Tres Pasos	33	15	4.779	4.828
Total general	643	533	22.576	23.753

* Uso No Definido

Fuente: Elaboración propia en base a datos DGA.

3.2.2 Escenarios futuros para derechos de aprovechamiento

Para efectos de este trabajo y considerando el interés de la autoridad en lo que respecta a la evolución de la demanda por el uso de los recursos disponibles en la cuenca hacia futuro, se plantean algunos posibles escenarios de desarrollo futuro. Estos escenarios dependen de proyecciones de crecimiento de algunas industrias en la Región: Turismo, Acuicultura, Agricultura y Ganadería.

Construcción Escenarios Futuros

En base a estos antecedentes y a documentación disponible acerca del crecimiento de las actividades y usos presentes en la cuenca es posible generar escenarios de proyección de cambio futuro en la demanda de derechos de aprovechamiento.

La asignación de las tasas de cambio proyectadas según escenarios se realiza según los siguientes criterios:

- Escenario de Referencia:
 - No se consideran cambios en los derechos de aprovechamiento respecto al periodo de calibración del modelo.
- Escenario BAU (*Bussiness As Usual*, "negocios como de costumbre"):
 - Asignación de la tasa de crecimiento máxima según antecedentes y uso principal en caso que éste esté explícito y sea mayor al caudal de derechos sin definición de uso.
 - Asignación de la tasa de crecimiento promedio entre los usos en aquellas áreas en donde el total del caudal de derechos sin uso explícito es mayor a cualquier uso definido.
 - Para el caso de derechos no consuntivos, se plantea una tasa homogénea de un 6% anual, explicada principalmente por el crecimiento de la actividad de acuicultura en toda la zona de estudio.
- Escenario Conservador
 - Disminución de un 30% a la tasa de cambio respecto al Escenario BAU aplicable para el periodo 2015 – 2025. Luego se restringe la evolución del derecho a un 2% anual.
- Escenario Intensivo
 - Aumento en un 30% a la tasa de cambio respecto al Escenario BAU, sin restricciones a este crecimiento futuro.

3.3 Recopilación información hidrometeorológica disponible en la zona estudio

En este apartado se detalla la información disponible sobre las redes de monitoreo de precipitación, temperatura y medición de caudales dentro del área de estudio. Esta información fue obtenida desde el portal de descargas de la Dirección General de Aguas desde donde se pueden obtener los datos de manera gratuita.

3.3.1 Estaciones Meteorológicas

Precipitación

En la zona de estudio se encuentra disponible información para dieciséis estaciones con mediciones de precipitación, estando tres de ellas en carácter de suspendidas (Tabla 3.3). La mayor cantidad de registros se encuentran en las estaciones Torres del Paine y Cerro Castillo con una extensión de más de veinte años. Estos datos serán analizados en el capítulo 4 para saber la calidad de ellos y los posibles vacíos existentes.

La ubicación de estas estaciones dentro del área de estudio se encuentra graficada en la Figura 3.1. Como puede observarse, la zona a estudiar se encuentra bien cubierta a nivel espacial, pudiendo encontrarse estaciones en los principales cursos de agua a excepción del río Tres Pasos. Sin embargo, la extensión, calidad y utilidad de estos datos debe evaluarse para conocer su real aplicabilidad en la confección y calibración de modelos.

Tabla 3.3. Estaciones con mediciones de precipitación en el área de estudio.

ID	Estación	Fuente	Rango Registros	Número Registros	Latitud	Longitud	Estado
1	Lago Dickson	DGA	12/1/2003; 9/30/2015	3.200	-50,82	-73,11	Vigente
2	Lago Paine	DGA	6/1/2009; 9/30/2015	1.700	-50,84	-72,90	Vigente
3	Laguna Azul	DGA	7/1/1997; 3/16/2003	1.363	-50,88	-72,73	Suspendida
4	Cerro Guido	DGA	1/1/1984; 9/30/2015	11.105	-50,90	-72,34	Vigente
5	Río Paine en Parque Nacional 2	DGA	2/16/2007; 9/30/2015	2.851	-50,97	-72,80	Vigente
6	Lago Sarmiento	DGA	3/1/1964; 9/30/2015	6.022	-51,01	-72,72	Vigente
7	Río Las Chinas en Cerro Guido	DGA	12/9/2004; 9/30/2015	3.385	-51,05	-72,52	Vigente
8	Lago Pehóé	DGA	3/1/1964; 8/31/2015	2.586	-51,08	-72,99	Vigente
9	Lago Grey	DGA	9/24/2011; 9/30/2015	1.370	-51,11	-73,13	Vigente
10	Glaciar Tindall	DGA	2/10/2011; 10/31/2014	321	-51,12	-73,28	Suspendida
11	Torres del Paine	DGA	5/1/1982; 9/30/2015	12.122	-51,18	-72,96	Vigente
12	Estancia Río Paine	DGA	5/1/1970; 12/31/1979	2.619	-51,24	-72,90	Suspendida
13	Cerro Castillo	DGA	2/1/1980; 9/30/2015	12.259	-51,26	-72,34	Vigente
14	Río Rincón en Ruta Y290	DGA	1/1/2010; 9/30/2015	1.506	-51,32	-72,83	Vigente
15	Río Serrano en Desembocadura	DGA	2/20/2007; 9/30/2015	2.567	-51,33	-73,11	Vigente
16	Glaciar Balmaceda	DGA	6/1/2012; 5/31/2014	91	-51,42	-73,10	Vigente

Fuente: Elaboración propia en base a datos DGA.

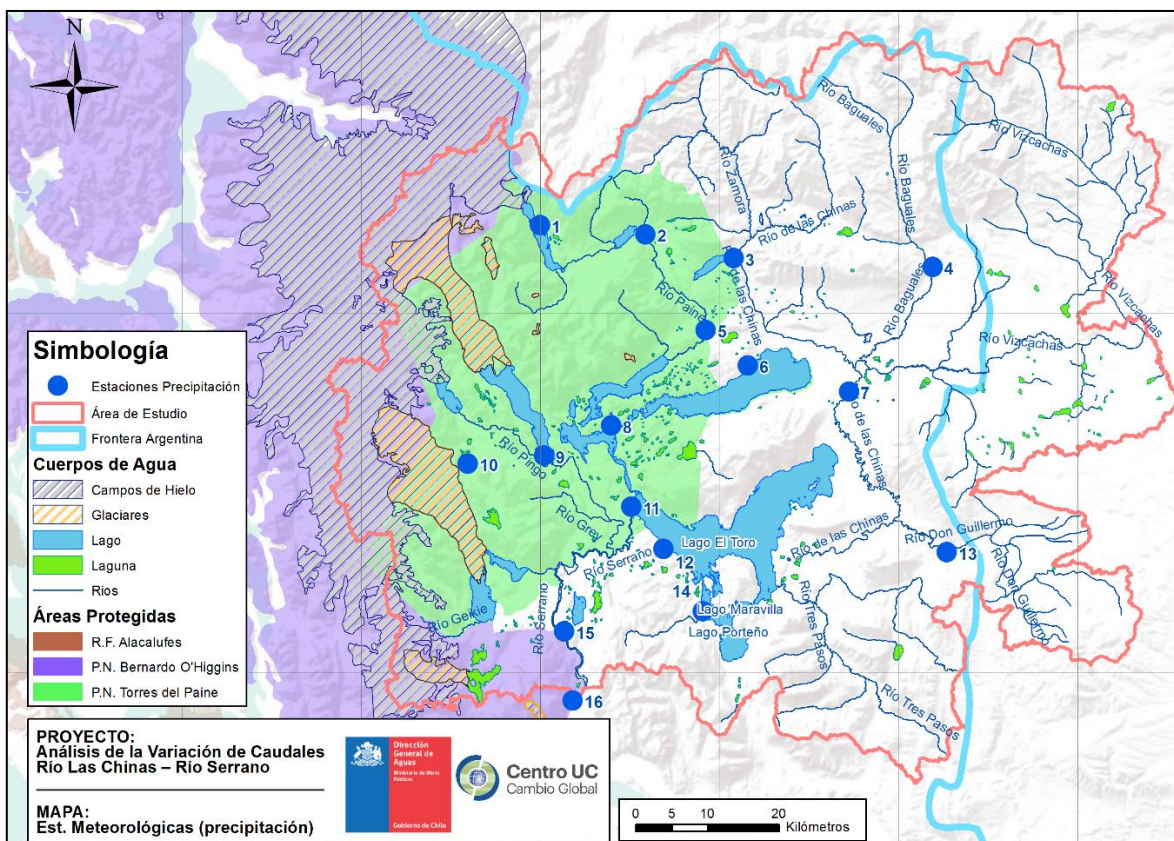


Figura 3.1. Estaciones con mediciones de precipitación en zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Temperatura

En la zona de estudio se encuentra disponible información para seis estaciones con mediciones de temperatura, estando una en carácter de suspendida (Tabla 3.4). La mayor cantidad de registros se encuentran en la estación Torres del Paine con una extensión de cincuenta años, datos que serán analizados en el capítulo 4. Cabe destacar, que estas seis estaciones presentan además mediciones de precipitación, por lo que el número de indicador es el mismo que las estaciones mostradas anteriormente.

La ubicación de las estaciones se encuentra en el mapa de la Figura 3.2. Como se puede observar, para esta variable no existe una buena cobertura de estaciones dentro de la zona de estudio, esto, junto a la instalación reciente de la mayor parte de las estaciones significa una deficiencia que deberá ser compensada de alguna forma para poder realizar los modelos que se proponen en este estudio.

Tabla 3.4. Estaciones con medición de temperatura en área de estudio.

ID	Estación	Fuente	Rango Registros	Número Registros	Latitud	Longitud	Estado
1	Lago Dickson	DGA	6/25/1999; 6/18/2005	1.517	-50,82	-73,11	Vigente
3	Laguna Azul	DGA	7/1/1997; 3/17/2003	845	-50,88	-72,73	Suspendida
4	Cerro Guido	DGA	12/1/1991; 2/28/2014	6.666	-50,90	-72,34	Vigente
7	Río Las Chinas En Cerro Guido	DGA	12/9/2004; 6/18/2015	1.480	-51,05	-72,52	Vigente
11	Torres del Paine	DGA	3/4/1964; 9/30/2015	16.097	-51,18	-72,96	Vigente
13	Cerro Castillo	DGA	2/1/1997; 5/1/2015	5.083	-51,26	-72,34	Vigente

Fuente: Elaboración propia en base a información DGA.

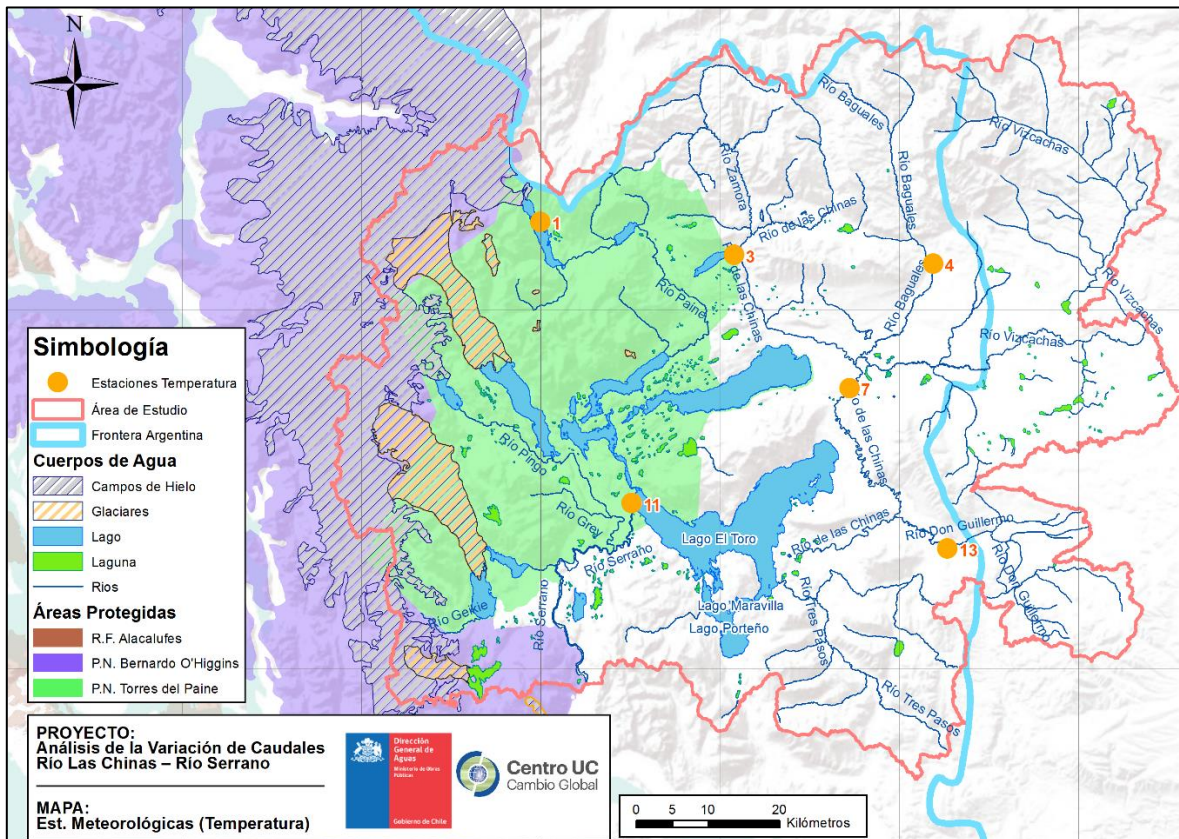


Figura 3.2. Estaciones con mediciones de temperatura en zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Estaciones Fluviométricas

Dentro de la zona de estudio se encuentra información disponible para un total de 18 estaciones fluviométricas con mediciones de caudales diarios en metros cúbicos por segundo, de estas estaciones, cinco se encuentran en carácter de suspendidas, lo cual se detalla en la Tabla 3.5.

La distribución espacial de las estaciones dentro del área a estudiar puede observarse en la Figura 3.3. De esta figura se desprende que si bien la mayoría de los ríos poseen una estación fluviométricas, existe una deficiencia de estas en el área norte, especialmente en los ríos Zamora y Baguales.

Tabla 3.5. Estaciones con medición de caudal en área de estudio.

ID	Estación	Fuente	Rango Registros	Número Registros	Longitud	Latitud	Estado
1	RÍO PAINE EN PARQUE NACIONAL	DGA	10/28/1981; 1/31/1984	740	-72,79	-50,96	Suspendida
2	RÍO PAINE EN PARQUE NACIONAL 2	DGA	2/26/1985; 1/31/2015	10.687	-72,80	-50,96	Vigente
3	RÍO BAGUALES EN CERRO GUIDO	DGA	7/29/1980; 5/31/2015	11.640	-72,48	-51,01	Vigente
4	RÍO VIZCACHAS EN CERRO GUIDO	DGA	8/27/1980; 2/28/2013	11.285	-72,50	-51,01	Vigente
5	RÍO LAS CHINAS EN PTE CARRETERO	DGA	10/28/1981; 3/11/1990	2.995	-72,45	-51,22	Suspendida
6	RÍO DON GUILLERMO EN CERRO CASTILLO	DGA	6/7/1980; 4/17/2013	8.780	-72,43	-51,22	Suspendida
7	RÍO LAS CHINAS EN CERRO GUIDO	DGA	6/8/1980; 5/31/2015	12.278	-72,52	-51,01	Vigente
8	RÍO LAS CHINAS ANTES DESAGUE DEL TORO	DGA	3/16/1990; 4/23/2015	9.063	-72,52	-51,25	Vigente
9	RÍO CHORRILLOS TRES PASOS RUTA N 9	DGA	11/25/1981; 5/15/2015	11.652	-72,49	-51,45	Vigente
10	RÍO TRES PASOS EN DESAGUE LAGO TORO	DGA	1/13/2005; 8/17/2013	3.079	-72,62	-51,31	Vigente
11	RÍO RINCON	DGA	1/29/2010; 3/26/2015	1.589	-72,83	-51,32	Vigente
12	RÍO GREY ANTES JUNTA SERRANO	DGA	10/25/1981; 5/31/2015	11.894	-73,02	-51,19	Vigente
13	RÍO SERRANO EN DESEMBOCADURA	DGA	7/21/2011; 3/29/2015	784	-73,11	-51,34	Vigente
14	RÍO SERRANO EN DESAGUE LAGO DEL TORO	DGA	12/22/2011; 3/29/2015	848	-72,96	-51,19	Vigente
15	RÍO SERRANO ANTES JUNTA GREY	DGA	10/17/2009; 10/7/2012	1.022	-72,99	-51,22	Suspendida
16	RÍO GEIKIE EN DESEMBOCADURA	DGA	12/15/1994; 3/27/2015	6.947	-73,21	-51,30	Vigente
17	RÍO TINDALL EN DESEMBOCADURA	DGA	5/22/1986; 5/31/2015	10.228	-73,16	-51,26	Vigente
18	RÍO CAÑADON 1 EN DESEMBOCADURA	DGA	4/29/1970; 3/13/1986	3.182	-73,28	-51,31	Suspendida

Fuente: Elaboración propia en base a información DGA.

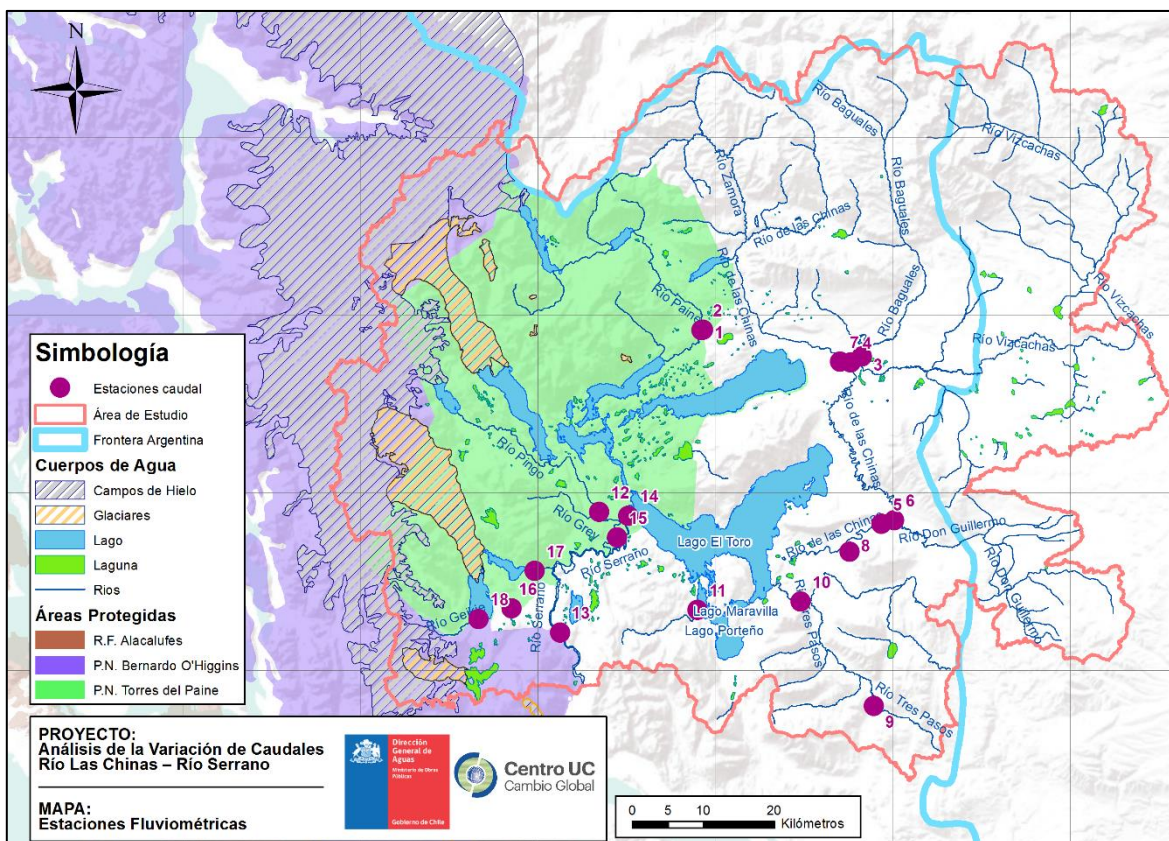


Figura 3.3. Estaciones con mediciones de caudal en zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 Estaciones Nivel de Lagos

Es de importancia en este estudio conocer la información existente sobre mediciones de altura de agua en los lagos, para esto, se recopiló la información de las siguientes estaciones

Tabla 3.6. Estaciones con medición de altura de agua en lagos

Estación	Latitud	Longitud	Inicio Registros	Fin Registros	Número de Registros	Altura Media Medida (m)
Lago Grey	-51,1119	-73,1123	24-01-2011	31-10-2014	930	267,8
Lago Pehoé	-51,0740	-73,0927	03-02-2011	30-04-2015	1.250	313,8
Lago Nordenskjöld	-51,0623	-73,0094	01-01-2010	31-10-2014	910	362,1
Lago El Toro en Estancia Paine	-51,1746	-72,9535	01-02-1984	31-12-2015	9.941	663,1

Fuente: Elaboración propia en base a información DGA.

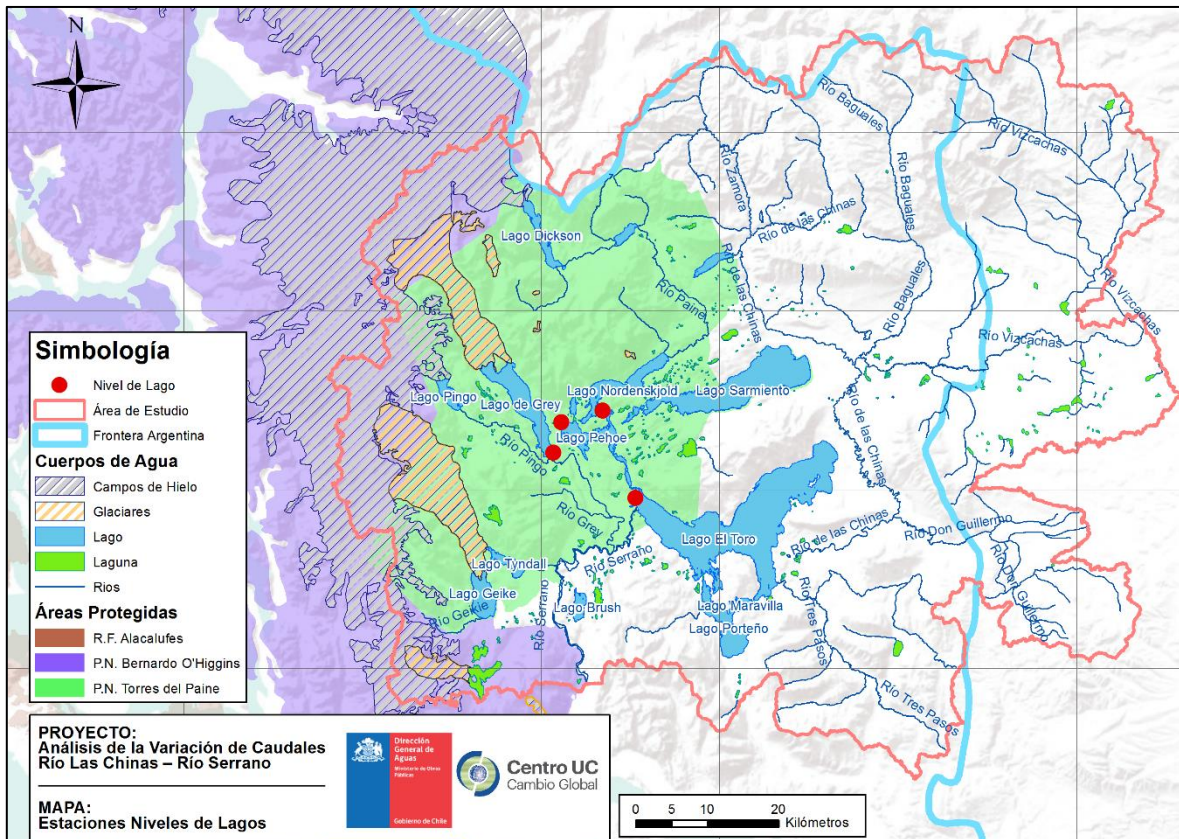


Figura 3.4. Estaciones con medición de nivel de altura de agua en lagos.
Fuente: Elaboración propia.

4 INSTALACIÓN DE ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA

La instalación y puesta en marcha de una estación fluviométrica (Figura 4.1) sobre el río Paine fue uno de los objetivos del presente proyecto. La misma se instaló próxima al Puente Weber, dentro del Parque Nacional Torres del Paine.

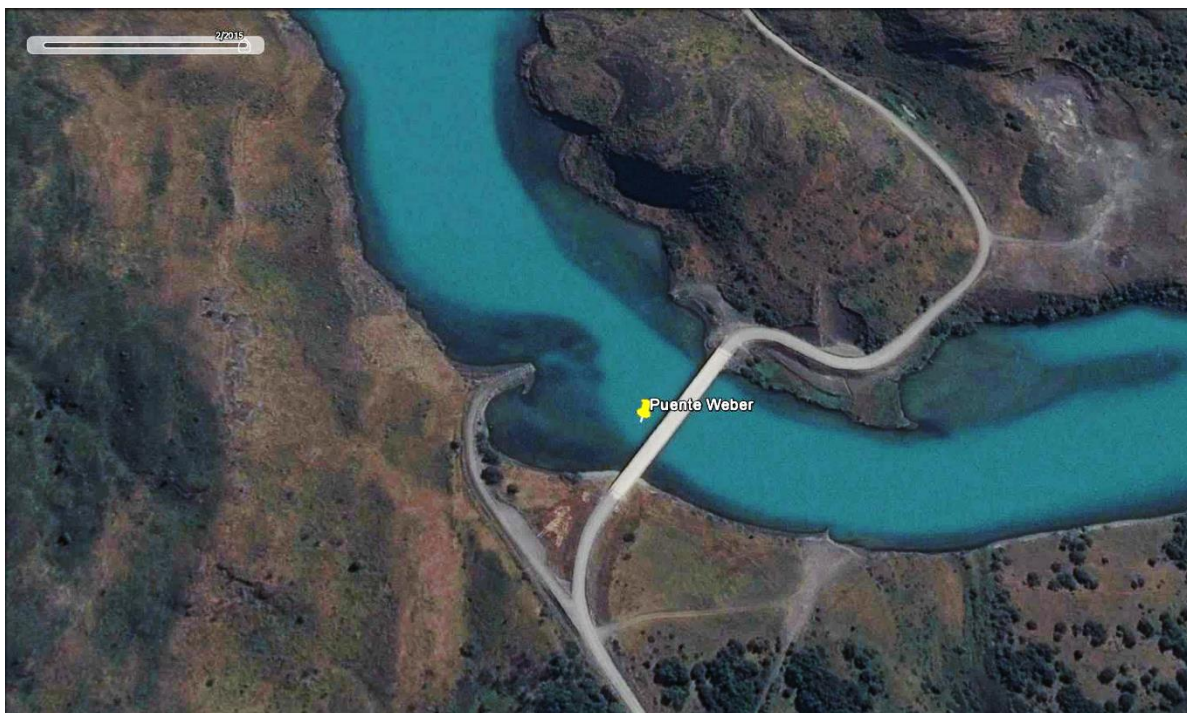


Figura 4.1. Imagen satelital, Puente Weber en Torres del Paine.

Fuente: Google Earth.

Para la descripción del proceso de instalación se procedió a dividir esta sección en los siguientes subtemas:

- *Instalación de estación fluviométrica en río Paine*
- *Funcionamiento de estación fluviométrica*
- *Comentarios finales y descarga de datos*

4.1 Instalación de estación fluviométrica en río Paine

En la Figura 4.2 se muestra los accesorios instalados en la caja Nema: *datalogger* DuoSens, batería, controlador de energía solar y cables. Además, dentro de la caja se colocó un gel con sal para evitar la generación de un micro-

ambiente húmedo, ya que esto afectaría negativamente el funcionamiento de los instrumentos. Así mismo, la batería fue protegida con aislante térmico.

La caja Nema fue instalada en una estructura metálica tipo poste, cuya altura sobre el piso es de 3 m. En la punta superior de la estructura metálica se instaló el panel solar, el cual está orientado en dirección Norte para aprovechar la luz solar, tanto en verano como en invierno. Finalmente, la parte inferior, es decir la base de la estructura metálica, está enterrada a 60 cm de profundidad y sobre una mezcla de cemento, para otorgarle más sostén y anclaje contra el factor viento, fenómeno recurrente en la zona.

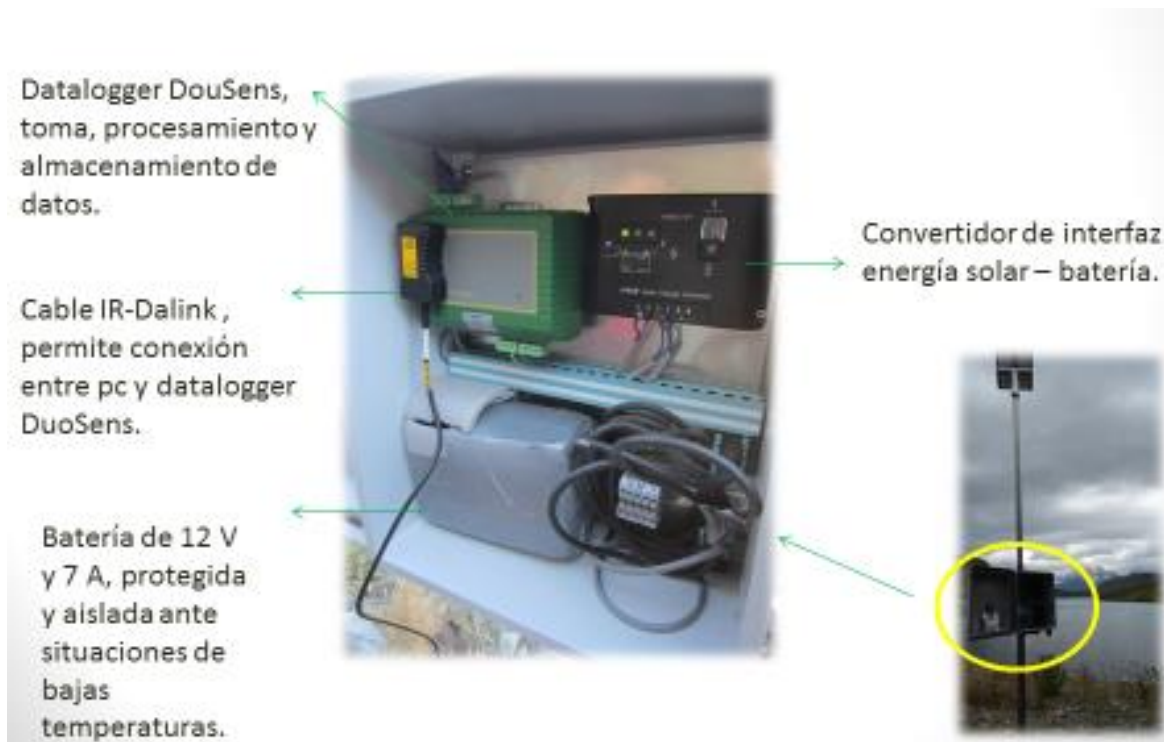


Figura 4.2. Izquierda: Caja Nema, estructura que otorga sostén y protección a los instrumentos. Derecha: foto que muestra la posición a la que fue instalada la caja Nema sobre la estructura metálica.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el radar RLS (Figura 4.3) se instaló bajo el Puente Weber, a una distancia de 40 m respecto del lugar de montaje del *datalogger*. El radar RLS está unido mediante dos tornillos a la parte inferior del puente, estos permiten el anclaje del sensor a la estructura metálica del puente, otorgándole firmeza y sostén.

El radar OTT RLS se encuentra ubicado en medio del puente Weber, este lugar fue elegido porque está por encima de una zona profunda del río Paine (teniendo en cuenta además el largo del cable disponible, requisito indispensable para la comunicación entre el *datalogger* y el radar OTT RLS).



Figura 4.3. Radar RLS, anclado a la estructura metálica del puente.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Comentarios y proceso de descarga de datos

La estación fluviométrica instalada no mide caudal directamente. Para que el sistema esté completo, queda pendiente aforar el caudal del río Paine y posteriormente relacionarlo con las mediciones entregadas por el radar.

Para la descarga de datos, el computador o notebook debe estar conectado al *datalogger* vía el cable Irda-Link. Una vez realizada esta acción, se abre el programa "OTT Data Logger Operating Program", y mediante el comando "Leer" (Figura 4.4), se establece conexión entre el notebook y el *datalogger*.



Figura 4.4. Opciones desplegadas en el menú del programa "OTT Data Logger Operating Program".

Fuente: Elaboración propia.

5 ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES Y BATIMETRÍA DE LOS LAGOS DEL TORO, PORTEÑO Y MARAVILLA

5.1 Introducción

En este capítulo se presentan las principales actividades y resultados del procesamiento de imágenes satelitales y de la batimetría de los lagos del Toro, Porteño y Maravilla de manera de determinar sus características físicas que permitan obtener las relaciones de cota de las láminas de agua versus el volumen de almacenamiento de cada uno de ellos.

Estas curvas son datos relevantes para el desarrollo del modelo de balance hídrico de la cuenca del río Serrano, ya que permiten estimar los volúmenes de almacenamiento y de desagüe en los lagos de acuerdo a los ingresos de agua en los ríos principales, como los ríos Paine y de Las Chinas y su evacuación a través del río Serrano.

Se explican ambas actividades (proceso de imágenes satelitales y batimetría de lagos) y al final se presentan los resultados más relevantes del capítulo.

5.2 Procesamiento de imágenes TH-1

5.2.1 Introducción

Se presentan en el presente subcapítulo los resultados de los trabajos de georreferenciación y procesamiento de imágenes satelitales TH-1 para la generación de un modelo digital de elevaciones (DEM) del área de estudio.



Figura 5.1. Representación de la zona adquirida a través de imágenes satelitales.
Fuente: Google Earth.

En la etapa de terreno se realizó la medición de los puntos de control terrestre para apoyar la georreferenciación de las imágenes (revisar Anexos 10.1).

En la etapa de gabinete se procesaron los datos geodésicos para obtener las coordenadas de los GCPs. A continuación se procedió con la georreferenciación de las imágenes y posterior generación del DEM mediante estereofotogrametría.

Una vez obtenidas las coordenadas de los puntos de control terrestre se procedió con el procesamiento de las imágenes TH-1 modo estéreo.

Para ello se utilizó el módulo "OrthoEngine" incluido dentro del paquete de software "PCI Geomatics". Mediante esta herramienta se georreferenciaron las imágenes TH-1 y posteriormente se generó un Modelo Digital de Elevaciones a partir de los pares estereoscópicos.

5.2.2 Obtención del DEM

El siguiente paso consiste en construir el Modelo Digital de Elevaciones para el par estereoscópico.

La siguiente imagen muestra el resultado obtenido:

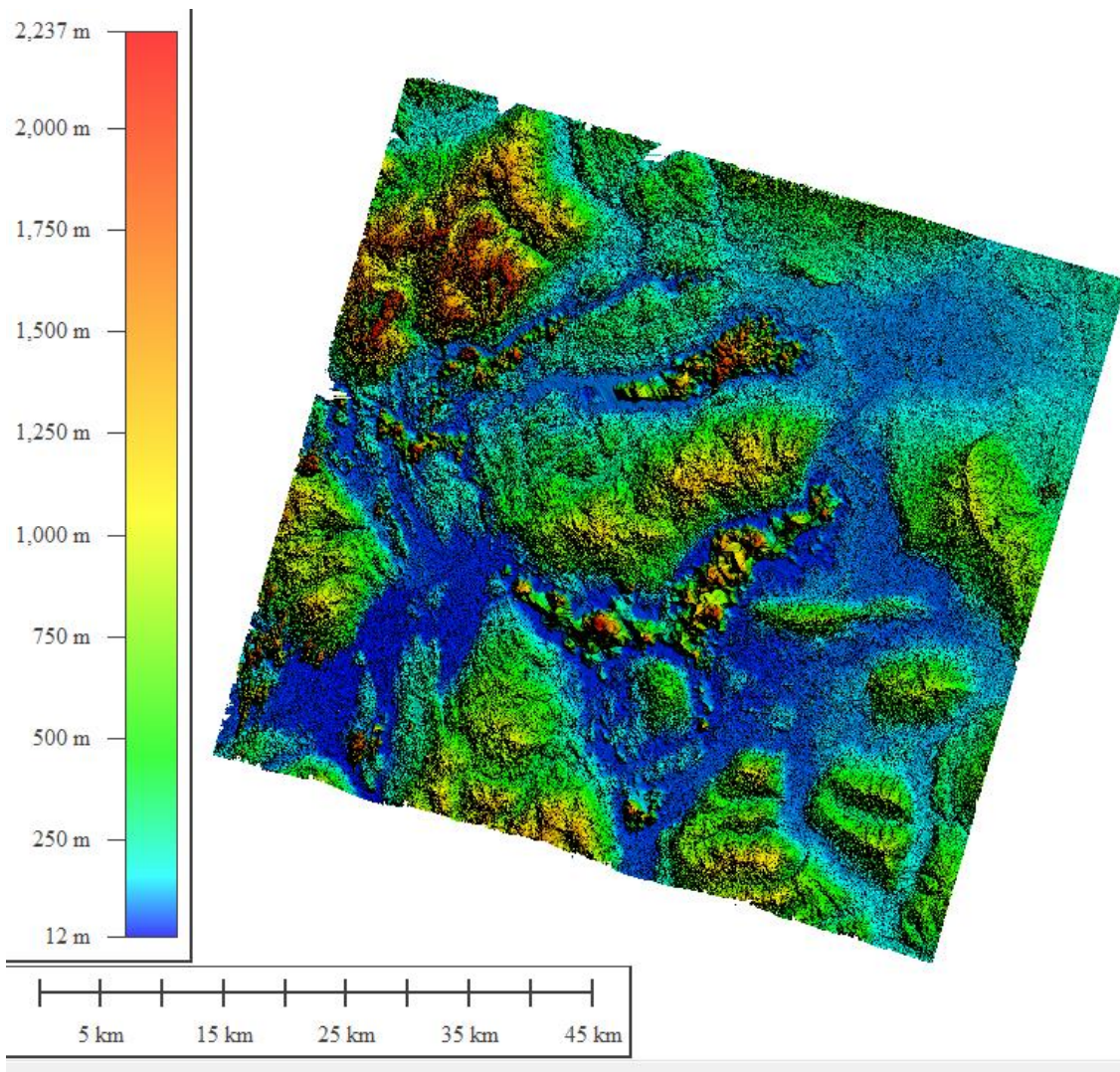


Figura 5.2. Modelos de Elevación Digital obtenido, aún sin procesar (en metros sobre el nivel del mar).

Fuente: Elaboración propia.

5.2.3 Filtrado y depuración de errores

Una vez obtenido el DEM, es necesario filtrar y depurar el resultado para eliminar los errores existentes y preparar su integración con los datos batimétricos. Estos errores fotogramétricos son debidos a diferentes factores como pueden ser los cuerpos de agua, los glaciares y zonas cubiertas por nieve, presencia de paredes verticales en la morfología del terreno, presencia de nubes en la imagen, etc.

Además es necesario filtrar los datos para eliminar la vegetación de gran tamaño presente en la superficie topográfica, de modo que obtengamos finalmente el Modelo Digital del Terreno.

Para modelar los cuerpos de agua presentes en la zona de estudio se optó por generar un plano en la cota que representa la actual lámina de agua.

Finalmente se insertaron los modelos batimétricos de los lagos del Toro, Porteño y Maravilla en el modelo de elevaciones resultante, obteniendo así una superficie de trabajo adecuada para realizar el modelado requerido.

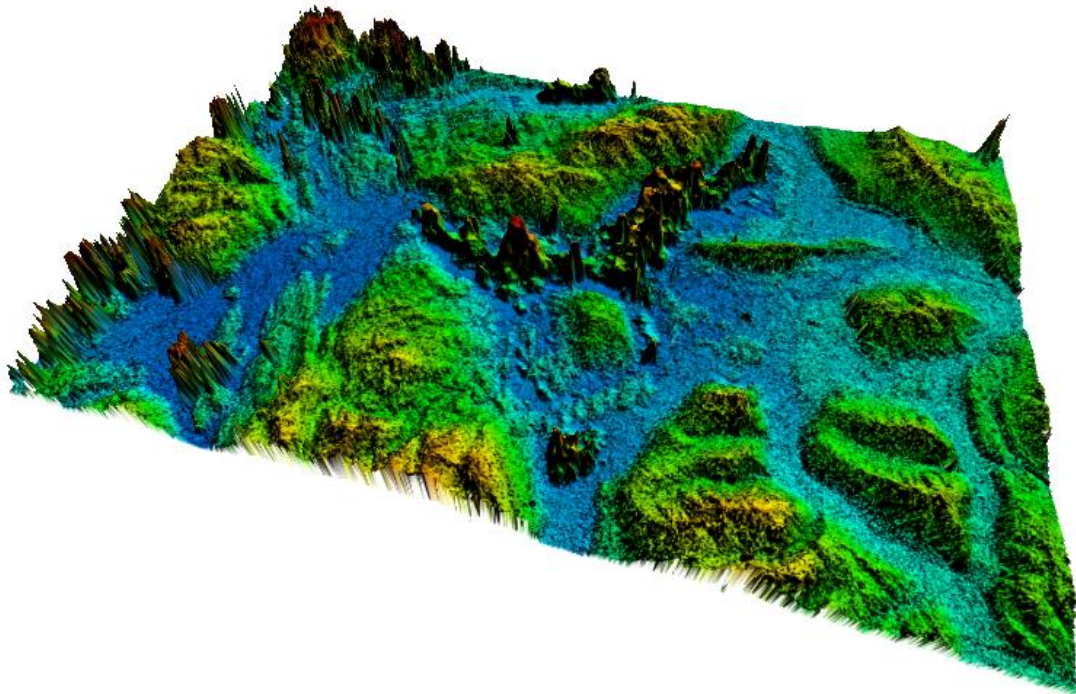


Figura 5.3. Modelo de Elevaciones preliminar.
Fuente: Elaboración propia.

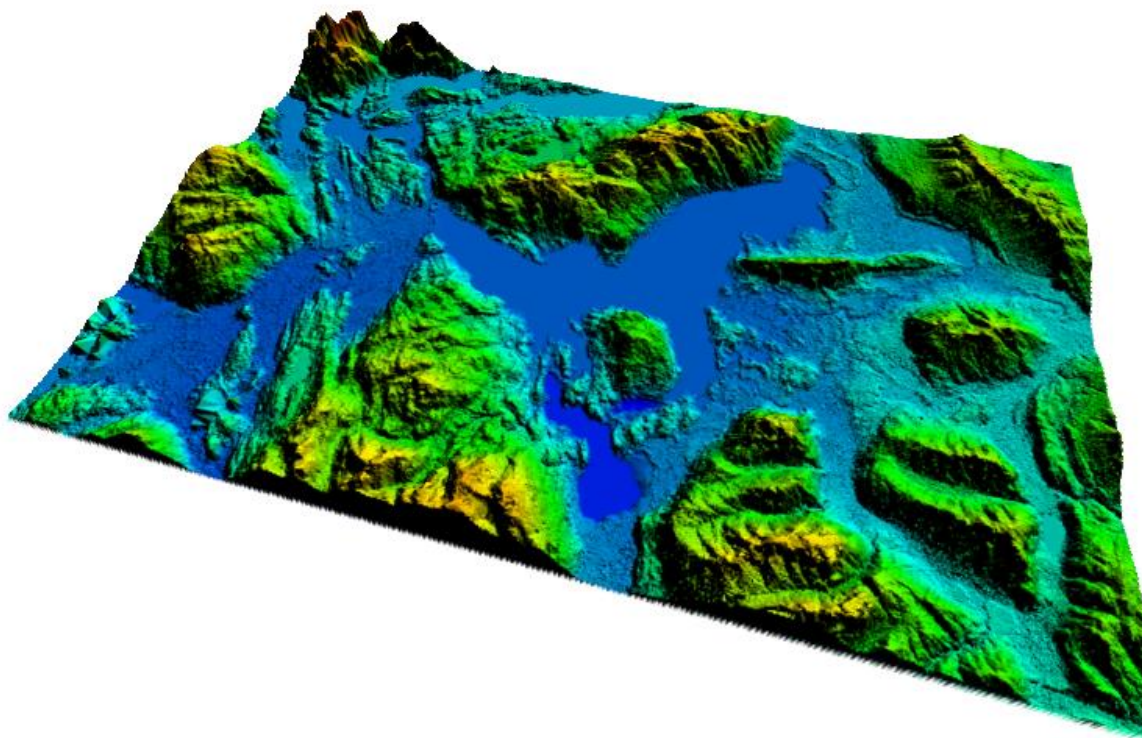


Figura 5.4. Modelo de Elevaciones final.
Fuente: Elaboración propia.

5.3 Levantamiento Batimétrico

5.3.1 Introducción

En la etapa de terreno se realizaron los levantamientos batimétricos en los tres lagos, considerando la necesidad de recolectar datos suficientes para cubrir un rango definido en su parte inferior por la cota de desagüe del río Serrano desde el Lago del Toro.

Para realizar las batimetrías en los tres lagos se tuvo en cuenta la cota de desagüe del río Serrano, de modo que se obtuviesen datos suficientes para cubrir la superficie sumergida hasta dicho valor de elevación.

En la etapa de gabinete se procesaron los sondeos realizados y se generaron los modelos batimétricos para su integración con la topografía resultante de la etapa anterior.

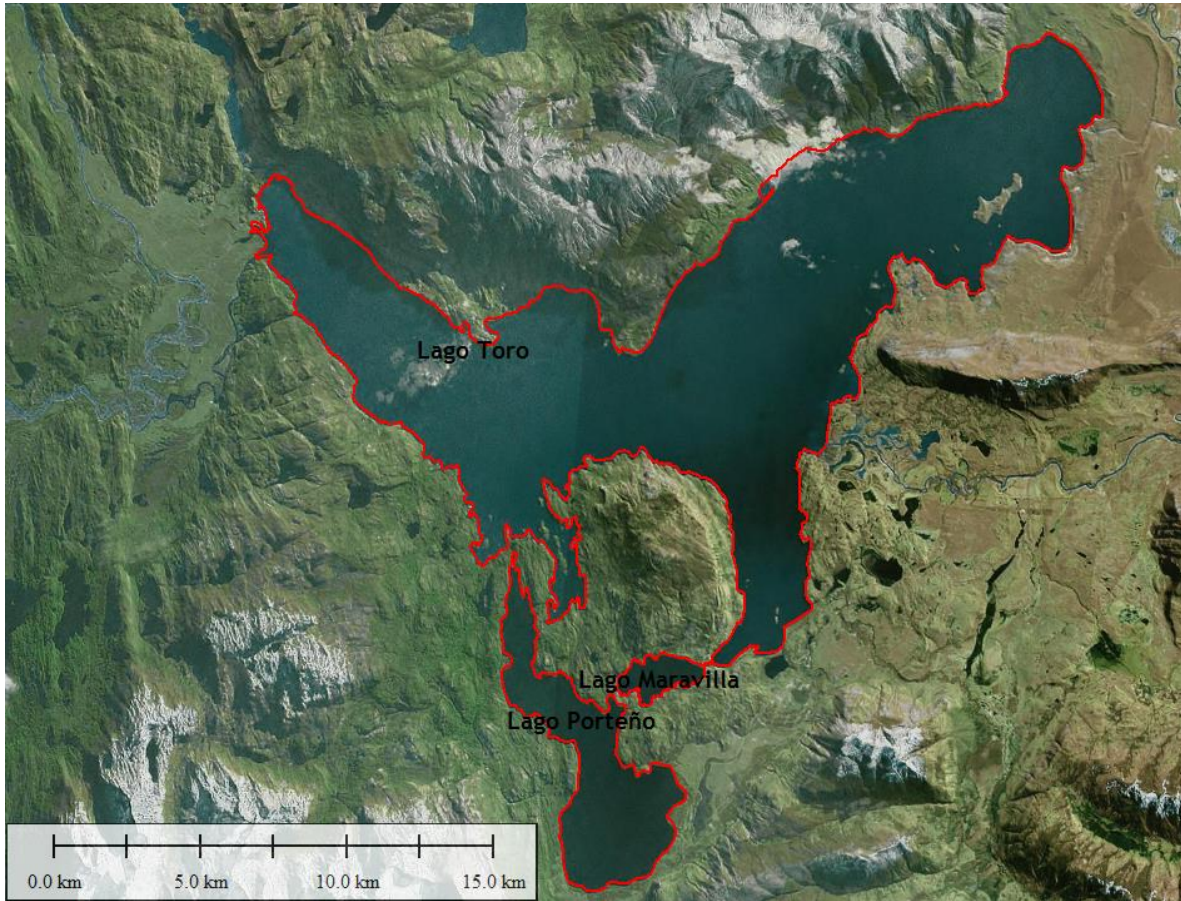


Figura 5.5. Imagen del área de interés del proyecto.
Fuente: elaboración propia.

5.3.2 Resultados de los Sondeos Batimétricos

La siguiente tabla contiene los resultados, para cada uno de los lagos, de los sondeos batimétricos realizados:

Tabla 5.1. Resultados de los sondeos para los tres lagos. A) Lago del Toro, B) Lago Porteño y C) Lago Maravilla

A)

Lago del Toro	
<i>Superficie</i>	193,55 Ha
<i>Perímetro</i>	137,284 Km
<i>Cota Lámina de Agua</i>	23,746 m (05/02/2016)

<i>Límite Inferior Batimetría</i>	20 m (batimetría parcial)
<i>Volumen Parcial desde Cota 20 m</i>	715.309.903 m ³
<i>Cantidad de Puntos</i>	102.423

B)

Lago Porteño	
<i>Superficie</i>	24,14 Ha
<i>Perímetro</i>	36,885 Km
<i>Cota Lámina de Agua</i>	30,835 m (05/02/2016)
<i>Límite Inferior Batimetría</i>	0 m (batimetría parcial)
<i>Volumen Parcial desde Cota 0 m</i>	634.736.428 m ³
<i>Cantidad de Puntos</i>	22.455

C)

Lago Maravilla	
<i>Superficie</i>	3,05 Ha
<i>Perímetro</i>	10,537 Km
<i>Cota Lámina de Agua</i>	24,279 m (04/02/2016)
<i>Límite Inferior Batimetría</i>	-50,9 m (batimetría completa)
<i>Volumen Total</i>	92.602.634 m ³
<i>Cantidad de Puntos</i>	12.757

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presentan de manera gráfica los modelos batimétricos generados para cada uno de los lagos objeto de estudio.

En el caso del Lago Maravilla, se optó por ejecutar la batimetría completa del cuerpo de agua debido principalmente a que no se registraron profundidades superiores a 100 metros, rango máximo de medición del ecosonda utilizado, considerando además el tamaño reducido del mismo.

En color rojo se indica la cota 0 metros sobre el nivel medio del mar, lo que indica que gran parte del fondo se encuentra considerablemente por debajo del nivel del mar.

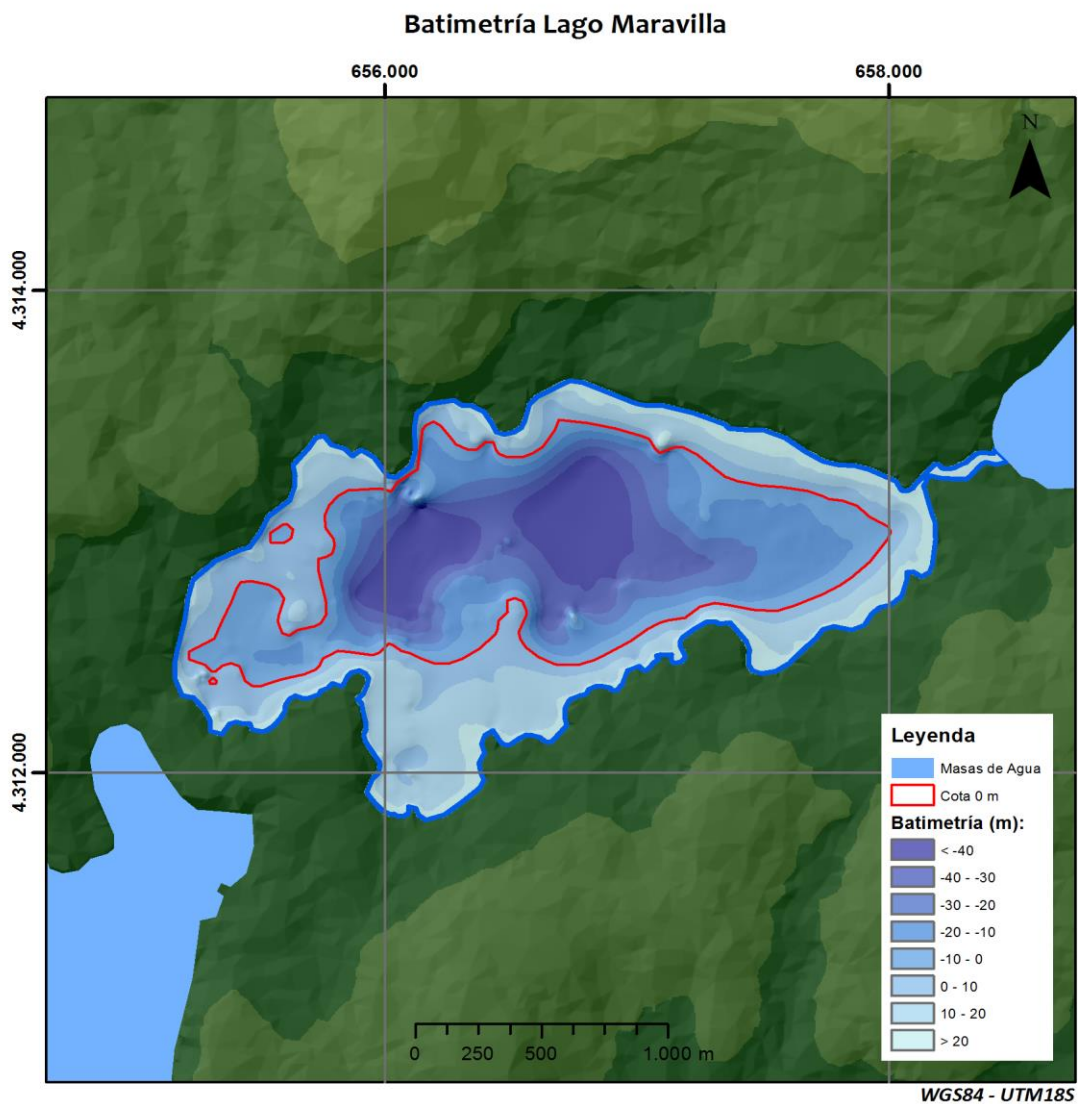


Figura 5.6. Modelo Batimétrico del Lago Maravilla.
Fuente: *Elaboración propia.*

En el Lago Porteño se obtuvieron datos suficientes para completar el levantamiento batimétrico hasta la cota 0, indicada en color rojo.

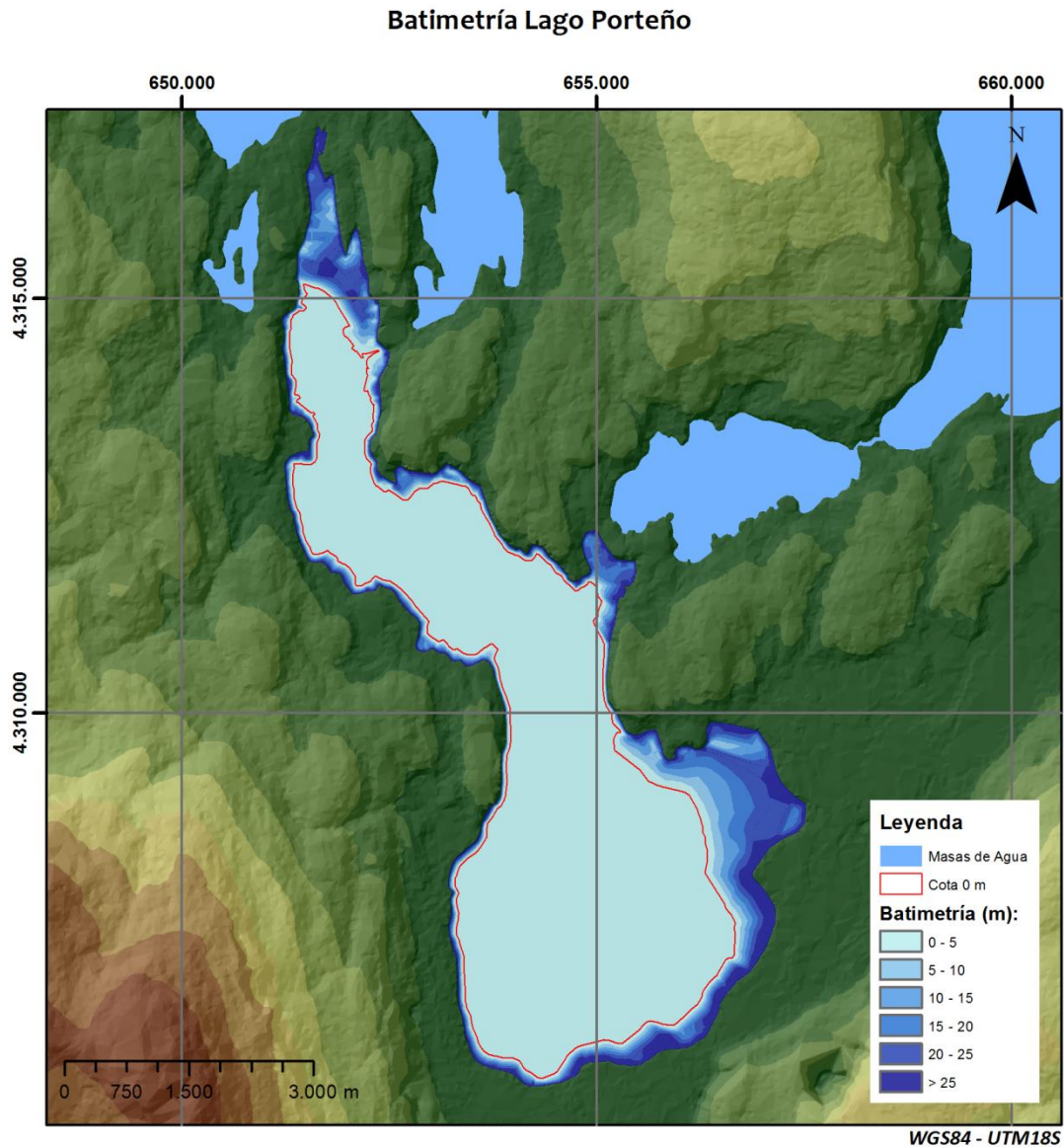


Figura 5.7. Modelo Batimétrico hasta Cota 0 del Lago Porteño.
Fuente: Elaboración propia.

En el Lago Toro se obtuvieron datos suficientes para completar el levantamiento batimétrico hasta la cota 20, indicada en color rojo.

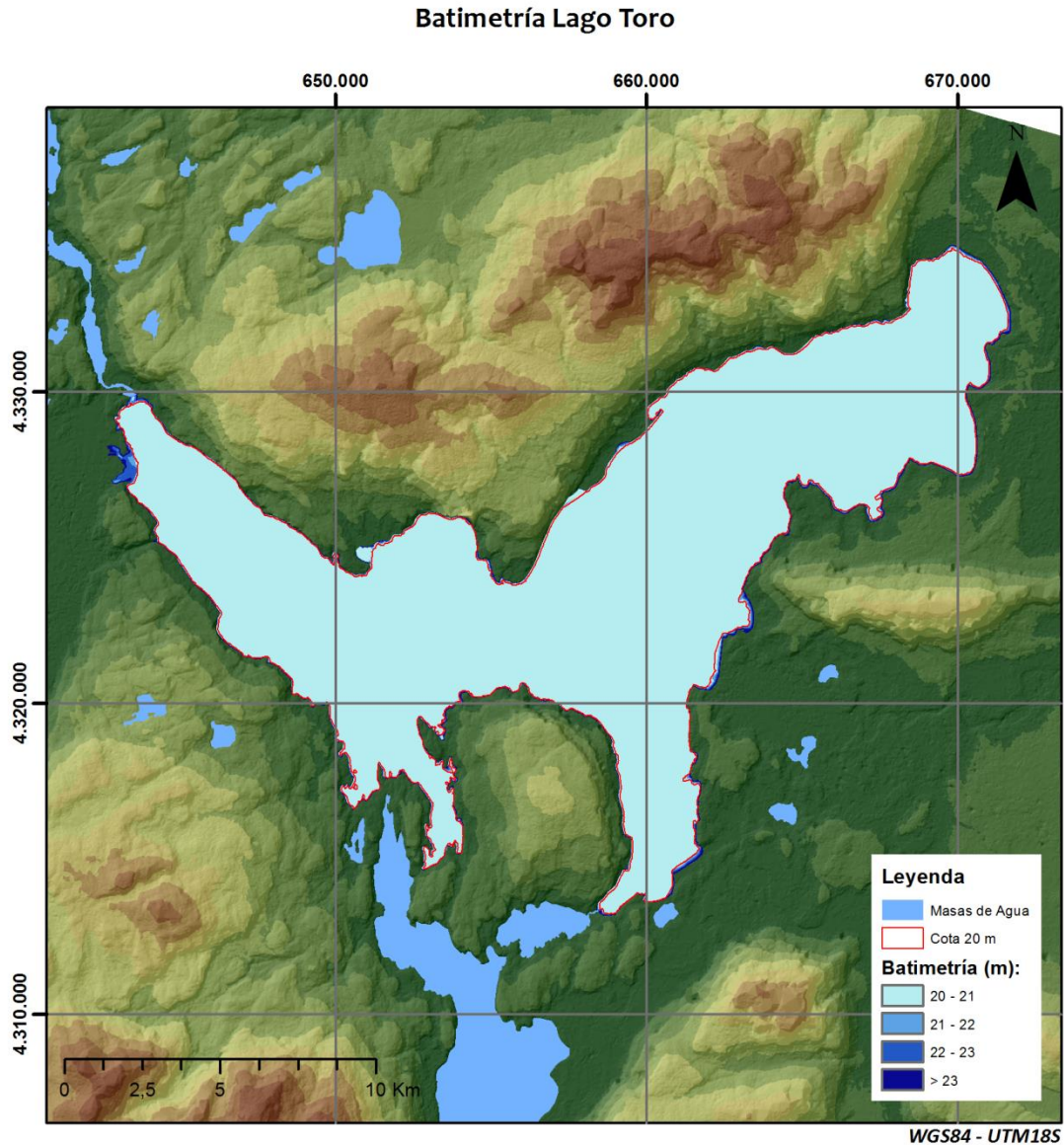


Figura 5.8. Modelo Batimétrico hasta Cota 20 del Lago Toro.
Fuente: *Elaboración propia.*

5.4 Curvas de volumen vs elevación

El objetivo de estas curvas es determinar el volumen de agua disponible para la descarga del lago, es decir, el volumen de agua que se ubica por sobre la cota de descarga. De este modo, el levantamiento se realizó sólo en la orilla de lago, por sobre la cota de descarga, y se asume un volumen constante (pero desconocido) por debajo de esta cota.

Para efectos de la modelación, sólo en los lagos del Toro y Porteño se agrega un volumen constante de manera referencial, con el fin de evitar que el almacenamiento pueda llegar a aparecer como negativo en algunos pasos de tiempo. A los valores obtenidos en el lago Porteño se le agregan 1.000 Hm³ y a los valores del lago del Toro, 10.000 Hm³. Al lago Maravilla no se le agrega ningún valor de referencia ya que como se explicó anteriormente, se le realizó su batimetría completa.

La Tabla 5.2 muestra los datos para construir las curvas de volumen vs elevación, los que son ingresados al modelo WEAP. Se asume que el volumen máximo de cada lago es el volumen en la cota 32,5msnm.

Tabla 5.2. Datos para la construcción de curvas volumen vs elevación de lagos (Hm³).

Elevación (msnm)	Volumen Lago del Toro	Volumen Lago Porteño	Volumen Lago Maravilla
20	10.000	1.388	80
20,5	10.094	1.398	82
21	10.189	1.409	83
21,5	10.284	1.420	84
22	10.379	1.431	86
22,5	10.475	1.442	87
23	10.571	1.453	89
23,5	10.668	1.464	90
24	10.767	1.475	92
24,5	10.865	1.486	93
25	10.946	1.498	95
25,5	11.048	1.509	96
26	11.147	1.521	98
26,5	11.245	1.532	100
27	11.346	1.544	101
27,5	11.446	1.555	103
28	11.549	1.567	104
28,5	11.652	1.579	106
29	11.755	1.591	107
29,5	11.858	1.603	109
30	11.961	1.615	111
30,5	12.067	1.627	112
31	12.171	1.639	114
31,5	12.293	1.651	116
32	12.410	1.663	117
32,5	12.517	1.675	119

Fuente: Elaboración propia.

5.5 Cota de desagüe del río Serrano

Según las mediciones realizadas, se estableció que la cota de desagüe del lago el Toro que da nacimiento al río Serrano se sitúa en 22,8 metros.

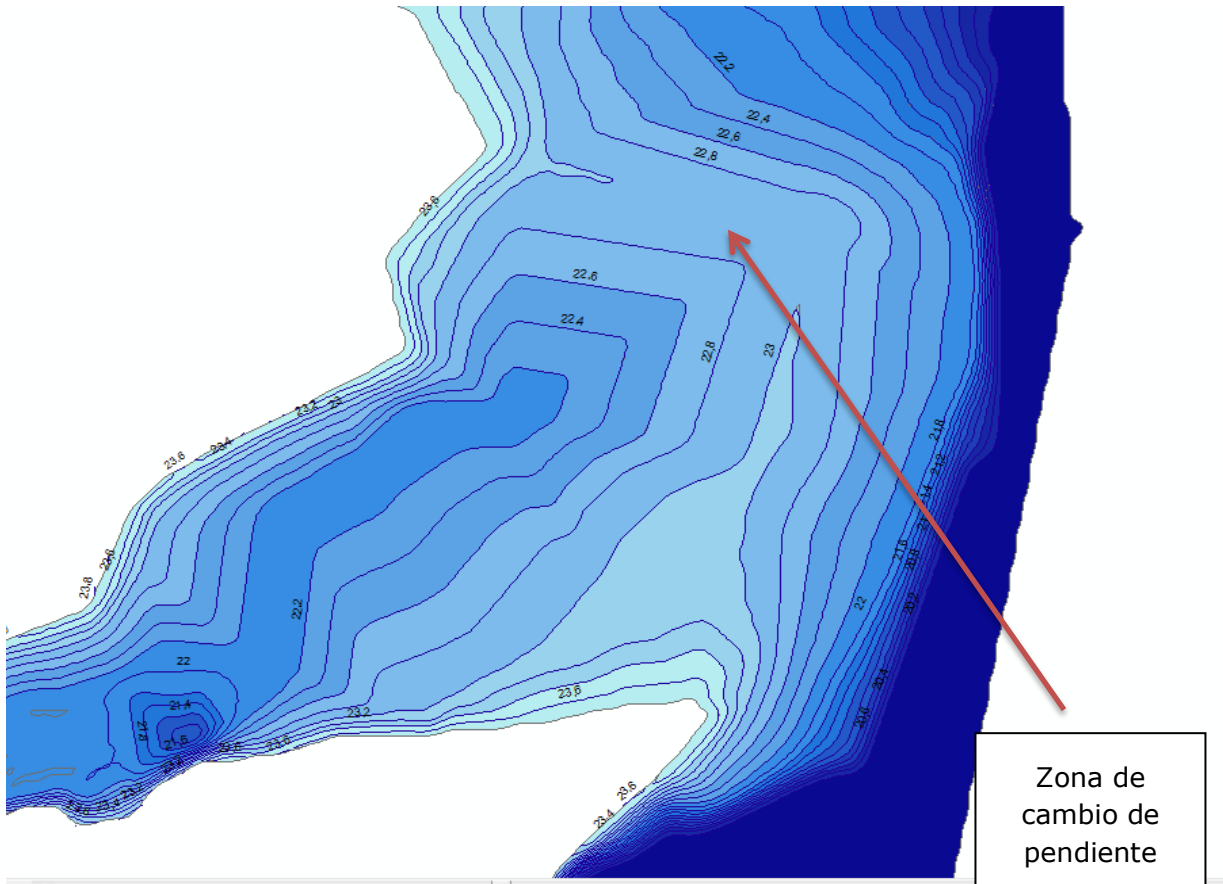


Figura 5.9. Batimetría en la zona de desagüe del Lago El Toro en el río Serrano.

Fuente: Elaboración propia.

Este valor define la cota mínima bajo la cual el Lago Toro no seguiría vertiendo agua para alimentar el nacimiento del río Serrano.

De este modo los modelos batimétricos presentan el siguiente rango de elevaciones:

Tabla 5.3. Rango de los modelos batimétricos obtenidos.

	Batimetría	Z_{MIN} (m)	Z_{MAX} (m)
Lago Toro	Parcial	20	23,746
Lago Maravilla	Completa	-50,9	24,279
Lago Porteño	Parcial	0	30,835

Fuente: *Elaboración propia.*

6 MODELO PARA EL BALANCE HÍDRICO

El área de estudio está compuesta por una red de ríos y lagos conectados entre sí. Estos lagos son alimentados tanto por ríos aguas arriba como por afluentes propios de la cuenca, precipitación directa y en algunos casos glaciares. Las principales salidas de estos lagos son a través de sus ríos efluentes y de pérdidas por evaporación.

La Figura 6.1 muestra un esquema conceptual del balance hídrico en un cuerpo de agua, específicamente de un lago. En este caso, los cambios en el almacenamiento del lago en un período de tiempo determinado están influenciados tanto por las entradas como por las salidas de agua en ese período. Las extracciones de agua pueden ser naturales (desagüe del lago, evaporación, infiltración, etc.) como antrópicas (extracción de agua por medio de bombas u otros elementos).

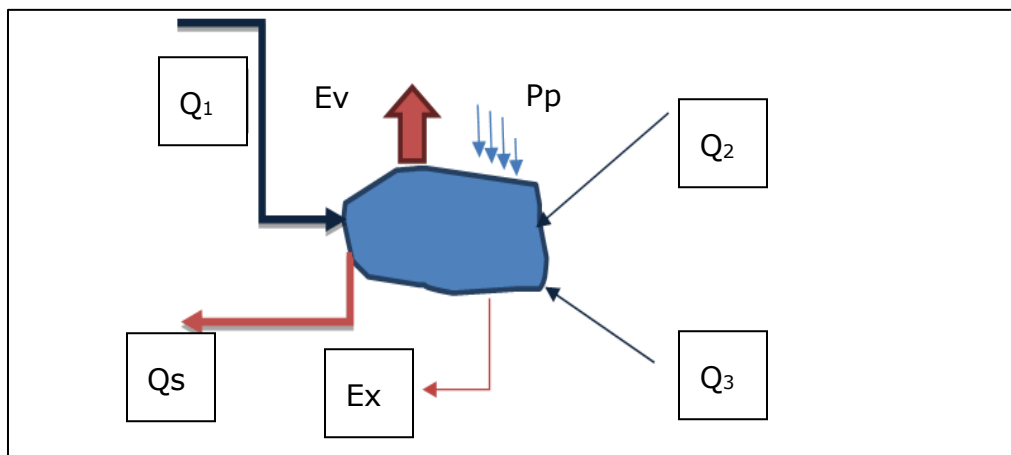


Figura 6.1. Esquema conceptual del comportamiento hidrológico asociado a un lago. Q1, Q2, Q3: Caudales de entrada al lago. Qs: Caudal de desagüe del lago. Ex: Extracciones de agua. PP: Precipitación en el lago. Ev: Evaporación del lago.

Fuente: *Elaboración propia.*

A partir de este concepto, se elaboró el balance hídrico para el lago del Toro, el cual se esquematiza en la Figura 6.2. En él se incluyen los principales lagos, cauces y procesos de entrada y salida observables en el área de estudio. Por simplicidad, este diagrama no considera los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales, los que sí están incluidos en el modelo final.

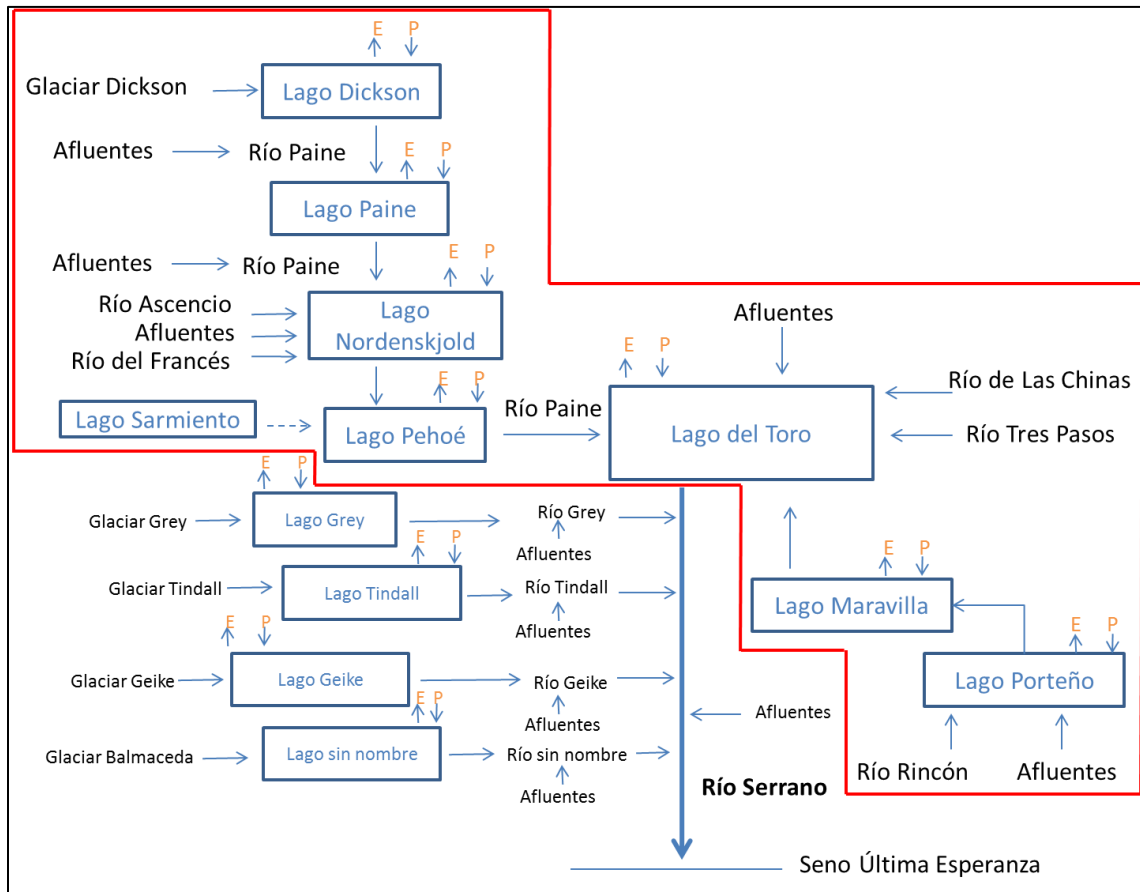


Figura 6.2. Diagrama del balance hídrico de la cuenca del río Serrano hasta su desembocadura al mar.

E: Evaporación. P: Precipitación. La Línea roja delimita la zona del presente estudio (hasta el Lago del Toro). Fuente: Elaboración propia.

6.1 Metodología de generación de series sintéticas de caudales

La información disponible originalmente en la cuenca del Lago del Toro no es suficiente para desarrollar un balance hídrico del lago, ya que hay ríos o afluentes a los lagos que no tienen ninguna estación fluviométrica que mida sus caudales. Debido a esto, una de las actividades del estudio fue la de generar series sintéticas de caudal en varios puntos de interés y que sirven como dato

de entrada al lago, de manera de completar los datos de caudales de toda la cuenca para que el balance esté completo.

Para generar series sintéticas de caudal en la zona de estudio, se utiliza el Método de Transposición de Cuencas. Este método fue utilizado también en el estudio "Análisis de Metodología y Determinación de Caudales de Reserva Turísticos" (DGA, 2010).

El método de transposición de cuencas consiste en generar series de caudales en una cuenca sin información fluviométrica a partir de datos observados en una cuenca similar. Para generar la serie de caudales en el punto sin información, se selecciona primero la estación fluviométrica que mejor represente el comportamiento hidrológico de la cuenca sin información, en base a sus características hidrológicas. Luego, se determina un Factor de Transposición (FT) de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$FT = \frac{A_1 \cdot P_1}{A_2 \cdot P_2}$$

Donde,

- A₁: Área de la cuenca sin información (km²)
- P₁: Precipitación anual de la cuenca sin información (mm)
- A₂: Área de la cuenca definida por el punto donde se ubica la estación fluviométrica representativa (km²)
- P₂: Precipitación anual de la cuenca definida por el punto donde se ubica la estación fluviométrica representativa (mm)

Finalmente, se generan las series sintéticas mediante la siguiente ecuación.

$$Q_1 = FT \cdot Q_2$$

Donde,

- Q₁: Serie de caudales sintéticos
- FT: Factor de transposición de cuencas
- Q₂: Serie de caudales observados en la estación fluviométrica representativa

6.2 Principales componentes del Balance Hídrico del Lago del Toro

El balance hídrico del Lago del Toro se define de la siguiente manera, de acuerdo al esquema de la Figura 6.2:

$$\Delta S = Q_{tp} + Q_{ch} + Q_p + Q_r + Q_a + P - E - Q_s$$

Ecuación 6.1. Ecuación del Balance Hídrico del Lago del Toro

Donde,

ΔS : Almacenamiento del lago del Toro
 Q_{tp} : Caudal aportante del río Tres Pasos
 Q_{ch} : Caudal aportante del río de Las Chinas
 Q_p : Caudal aportante del río Paine
 Q_r : Caudal aportante del río Rincón
 Q_a : Caudal aportante por los afluentes adyacentes al lago del Toro
 P : Precipitación en la superficie del lago del Toro
 E : Evaporación del lago del Toro
 Q_s : Caudal de salida en el río Serrano

En el balance, no se incluye la cuenca de lago Sarmiento, ya que no tiene conexión superficial con el lago del Toro.

Además del balance hídrico, es necesario considerar el efecto regulador del lago del Toro. Para esto, se usa la información obtenida de la batimetría del lago de y su curva de volumen vs altura del lago. Además, con la información batimétrica y el registro de caudales en la estación fluviométrica, se realiza una modelación hidráulica utilizando el modelo unidimensional HEC-RAS (US. Army Corps of Engineers, 2010), con el cual se estima finalmente la curva de descarga del lago.

6.3 Escenarios

En el presente informe se consideran dos escenarios diferentes para caracterizar las cuencas de entrada al lago del Toro:

- Escenario 1: Situación Actual

Este escenario considera la generación de series mediante las metodologías descritas, considerando el efecto regulador de los lagos del Toro, Porteño y Maravilla.

- Escenario 2: Cambio Climático y Demanda Futura

Este escenario considera tres proyecciones futuras del clima y, para cada una de ellas, tres proyecciones futuras de la demanda de recursos hídricos. En total son 9 combinaciones.

6.4 Desarrollo del modelo WEAP

El balance hídrico del lago del Toro se realiza en el modelo hidrológico WEAP, desarrollado por *Stockholm Environment Institute* (SEI), con el objetivo de obtener una herramienta que sea utilizada en la planificación de recursos hídricos. El modelo WEAP es capaz de simular un sistema hídrico ingresando las características de distribución hídrica del sistema (la oferta y demanda de agua) y la hidrología correspondiente. Este modelo es flexible a simular distintos escenarios, lo cual lo convierte en un modelo eficaz para la evaluación de

Para el caso particular de este estudio, y en base a la información disponible, se definió un paso de tiempo de modelación mensual, comprendiendo como periodo de calibración/validación, el periodo 1980-2015.

La Figura 6.3 muestra el módulo *Esquema* del modelo WEAP para el balance hídrico del lago del Toro. En el esquema ubicado en el centro-derecho de la figura se observan los ríos, cuencas, lagos, requerimientos de caudal (derechos de agua) y medidores de caudal (estaciones fluviométricas) incluidos en el modelo desarrollado. A la izquierda se observan los módulos del modelo: Esquema Inicial, Datos, Resultados, Explorador de Escenarios y Notas. Entre los módulos del modelo y el esquema se observan las capas generadas para la construcción del modelo. Las capas superiores corresponden a las capas generadas en WEAP, tales como ríos, embalses y requerimientos de caudal, medidores de caudal y su simbología, tal como aparecen en el esquema de la cuenca. Las capas inferiores corresponden a las capas agregadas al modelo, tales como ríos, cuencas y lagos del sistema, las cuales fueron generadas previamente en ArcGIS 10.

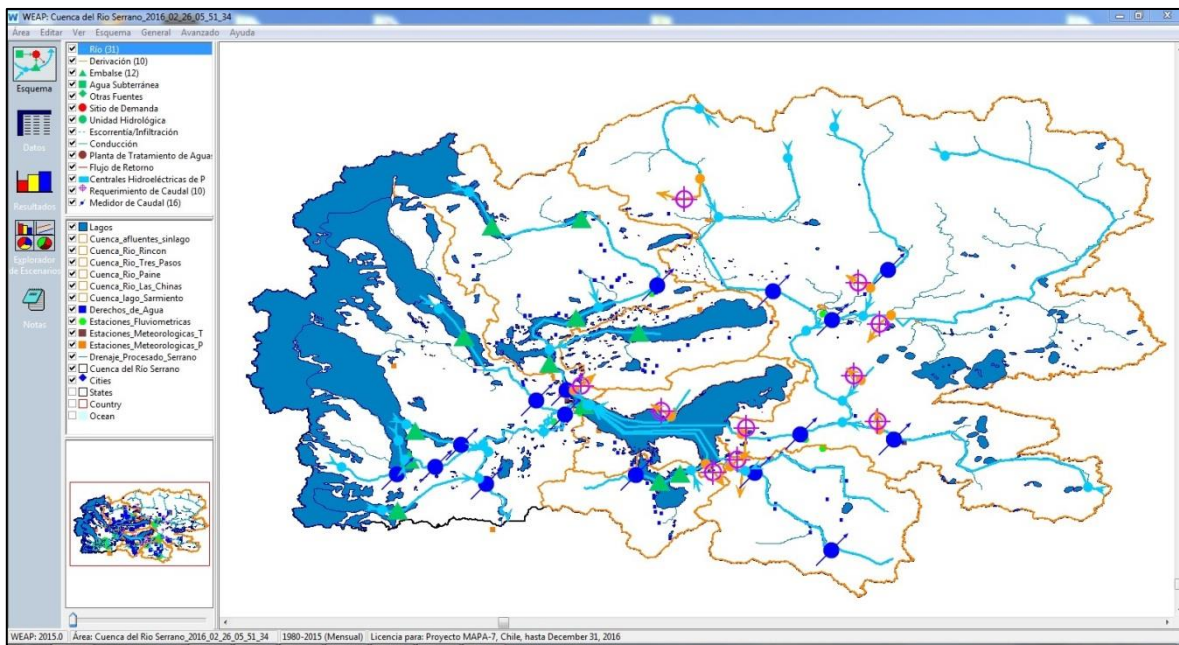


Figura 6.3. Esquema inicial del modelo WEAP.
Fuente: Elaboración propia a partir del modelo WEAP.

6.5 Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante el modelo WEAP, utilizando las series rellenas de datos fluviométricos. Entre estos resultados se presenta la calibración de las series de caudales, el balance hídrico del lago del Toro y de la cuenca del río de Las Chinas, la disponibilidad de agua del sistema y las proyecciones futuras en distintos escenarios climáticos y de demanda de recursos hídricos.

6.5.1 Balance hídrico lago del Toro

Luego de determinar los caudales de entrada al lago del Toro y caracterizar la morfología del lago se presentan los resultados de cada uno de los procesos involucrados en el comportamiento hidrológico de un lago, entre los cuales están las entradas, la salida y el almacenamiento del lago. Los resultados del balance hídrico del lago del Toro muestran una buena representación de los procesos mencionados.

6.5.1.1 Entradas al lago del Toro

La Figura 6.4 muestra la proporción del caudal medio anual de aporte de cada río al Lago del Toro. Se puede apreciar el aporte relevante del río Paine a la hidrología del Lago del Toro, con un 59,3% con respecto a todas las entradas de agua al lago a nivel anual. Luego, lo siguen el río de Las Chinas y el río Rincón. Por último el aporte de los ríos Tres Pasos y los afluentes menores al lago no suman más del 10% del total. En la Tabla 6.1 se muestra el detalle mensual para cada río y el caudal promedio de ingreso al Lago del Toro en m³/s.

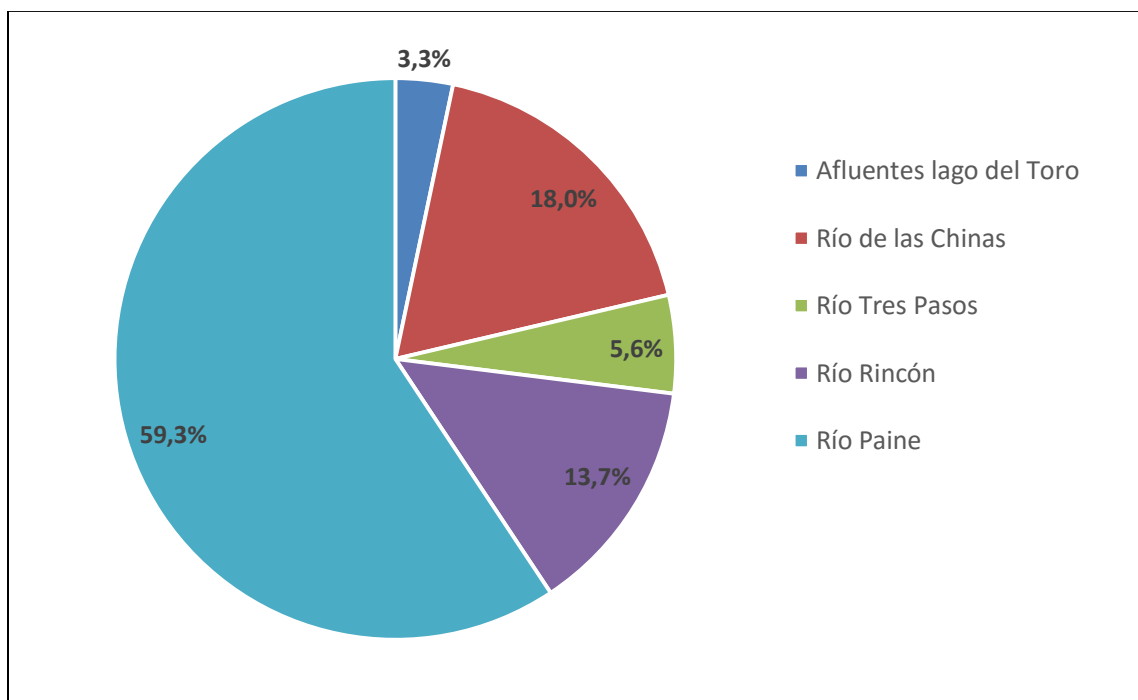


Figura 6.4. Porcentaje aportado por cada cuenca de entrada al lago al nivel anual (%), sin considerar extracción de derechos de agua.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.1. Proporción de caudal aportado por cada cuenca de entrada al lago a nivel mensual.

	Afluentes al lago del Toro	Río de Las Chinas	Río Tres Pasos	Río Rincón	Río Paine	Caudal total de entrada al lago (m³/s)
Abril	0,8%	11,7%	1,3%	16,7%	69,5%	94,8
Mayo	1,9%	14,7%	3,3%	24,6%	55,5%	85,6
Junio	5,7%	18,0%	9,8%	24,9%	41,6%	68,9
Julio	8,5%	20,7%	14,7%	13,8%	42,2%	52,5
Agosto	9,6%	23,0%	16,7%	11,5%	39,3%	60,0
Septiembre	6,7%	26,3%	11,5%	12,2%	43,4%	61,9
Octubre	3,3%	32,6%	5,7%	7,3%	51,2%	82,1
Noviembre	1,4%	28,2%	2,3%	13,2%	54,9%	109,7
Diciembre	0,6%	18,7%	0,9%	7,6%	72,1%	122,1
Enero	0,4%	9,0%	0,5%	9,3%	80,8%	137,0
Febrero	0,3%	5,5%	0,5%	10,8%	82,9%	132,7
Marzo	0,5%	7,8%	0,7%	12,4%	78,6%	120,5
Anual	3,3%	18,0%	5,6%	13,7%	59,3%	93,98

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso en que sí se toman en cuenta los derechos de aprovechamiento de agua, la proporción original cambia, ya que el río de Las Chinas pierde mucha agua en consumo, suponiendo que todo ese consumo es usado y no existen retornos al sistema. En este caso, el porcentaje de aporte del río de Las Chinas baja de un 18% a un 5,2%, siendo incluso menor al aporte del río Tres Pasos. El río Paine aumenta considerablemente su aporte proporcional, ya que no existen tantos derechos constituidos en esa subcuenca. También se muestran estos resultados, en la Figura 6.5, en la Tabla 6.2 y en la Tabla 6.3.

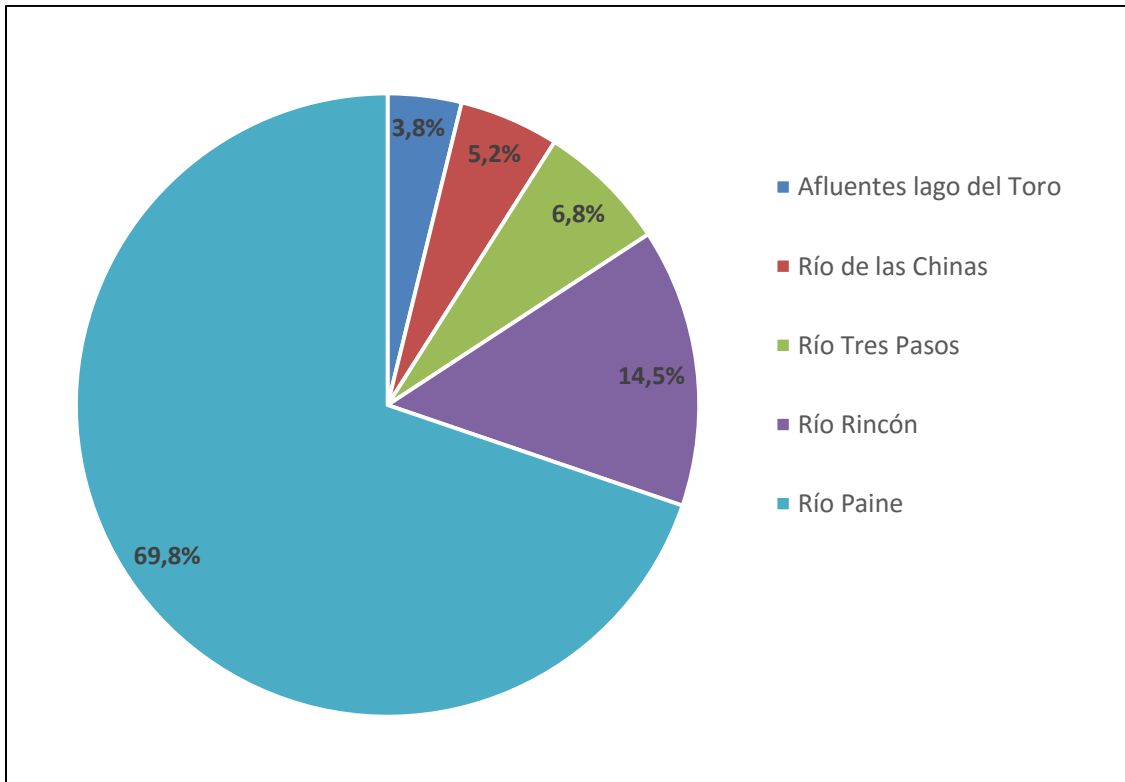


Figura 6.5. Porcentaje aportado por cada cuenca de entrada al lago al nivel anual (%), considerando extracción de derechos de agua.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.2. Proporción de caudal aportado por cada cuenca de entrada al lago a nivel mensual.

	Afluentes al lago del Toro	Río de Las Chinas	Río Tres Pasos	Río Rincón	Río Paine	Caudal total de entrada al lago (m³/s)
Abril	0,8%	2,0%	1,2%	18,1%	78,0%	83,8
Mayo	2,0%	3,7%	3,4%	27,4%	63,5%	74,1
Junio	6,0%	6,4%	11,0%	27,9%	48,6%	58,8
Julio	9,8%	5,6%	17,6%	14,7%	52,3%	42,4
Agosto	11,5%	7,0%	20,3%	12,3%	49,0%	48,0
Septiembre	8,5%	4,7%	15,0%	13,1%	58,8%	45,6
Octubre	4,2%	10,5%	7,5%	6,4%	71,3%	58,4
Noviembre	1,5%	11,6%	2,7%	14,3%	69,9%	85,5
Diciembre	0,6%	5,7%	0,9%	6,6%	86,1%	101,7
Enero	0,4%	2,4%	0,5%	9,3%	87,5%	125,9
Febrero	0,3%	1,1%	0,4%	10,9%	87,3%	125,4
Marzo	0,4%	1,3%	0,7%	12,7%	84,9%	110,9
Anual	3,8%	5,2%	6,8%	14,5%	69,8%	80,04

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que si se usaran todos los derechos de agua concedidos, el mayor aportante al río Serrano seguiría siendo el río Paine (Q_p). Los ríos Tres Pasos (Q_{tp}) y los afluentes al lago (Q_a) seguirían con aportes menores caudales al sistema, concentrados principalmente los meses de invierno. Los caudales aportados por el río Paine se concentran los meses de verano al ser una cuenca con importantes aportes glaciares, mientras el aporte del río de Las Chinas se concentraría en primavera como muchas cuencas pluviales.

La Tabla 6.3 muestra el caudal anual en las cuencas de entrada y salida del lago del Toro, sin y con considerar la extracción de derechos de agua. Se observa un cambio significativo en el caudal anual del río de Las Chinas, mientras en el resto de las cuencas, los cambios son menores.

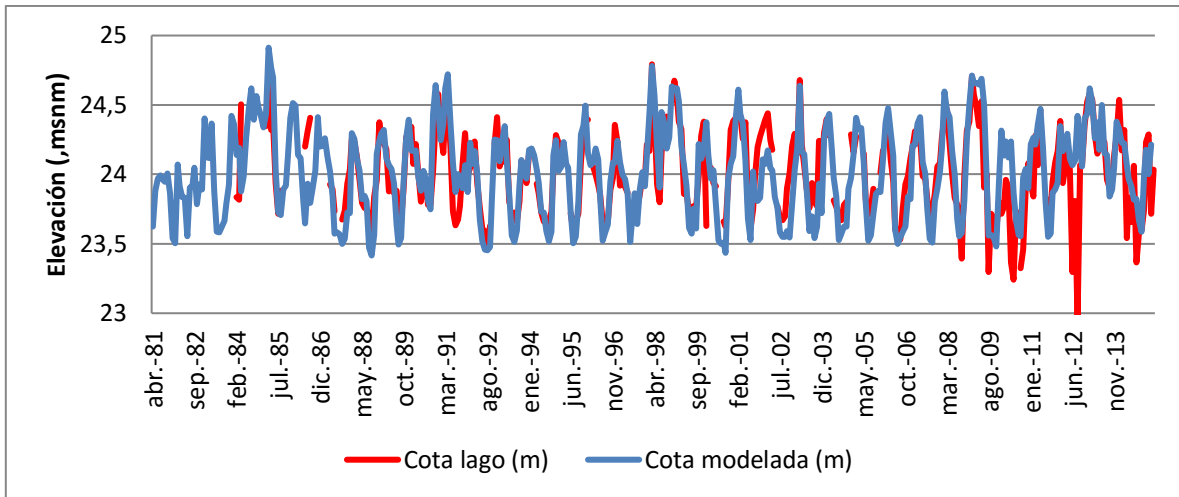
Tabla 6.3. Caudal anual en las cuencas de entrada y salida del lago del Toro (m^3/s), con y sin considerar derechos de agua.

	Caudal anual sin considerar derechos de agua (m^3/s)	Caudal anual considerando derechos de agua (m^3/s)
Afluentes lago del Toro	2,3	2,1
Río de las Chinas	15,6	3,6
Río Tres Pasos	3,8	3,6
Río Rincón	12,3	11,0
Río Paine	60,0	59,7
Río Serrano	94,0	80,0

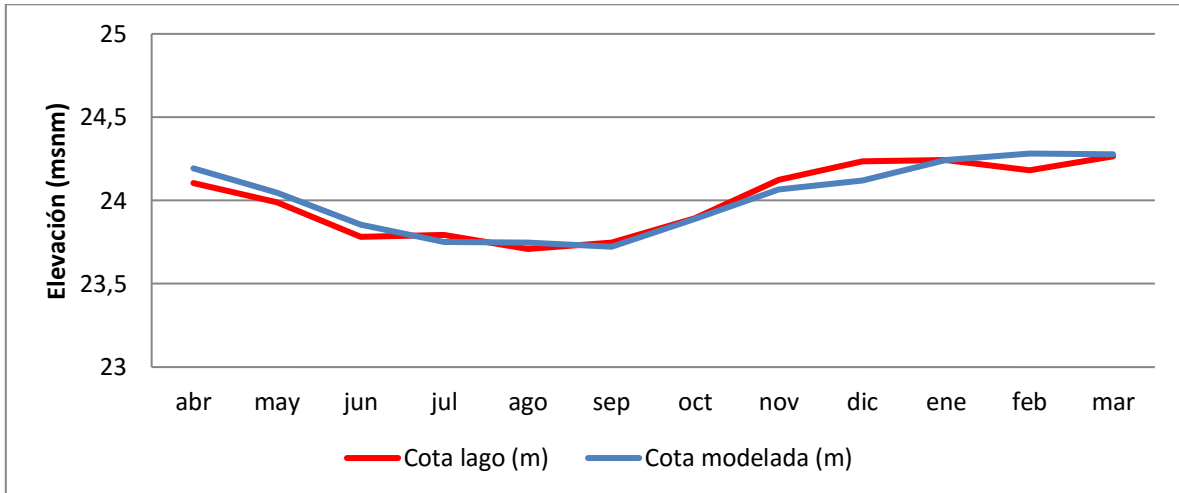
Fuente: Elaboración propia.

6.5.1.2 Almacenamiento al lago del Toro

El almacenamiento del lago del Toro refleja la elevación observada en el lago del Toro. La Figura 6.6 muestra la cota modelada y observada del lago del Toro entre los años 1981 y 2015. En general se observa una buena calibración para esta variable. Al igual que en la comparación de los caudales de salida del lago del Toro, la serie de elevación del lago modelada debe ser desfasada en un mes para ser comparada con la serie observada, ya que este valor depende del caudal de salida, el cual depende de la elevación del lago del mes anterior.



(a)



(b)

Figura 6.6. Elevación observada y modelada en el lago del Toro. (a) Serie mensual. (b) Serie media mensual.

Fuente: Elaboración propia en base a información proporcionada por la DGA.

6.5.1.3 Salidas del lago del Toro

En el período 1981 y 2015, los caudales modelados en la salida del lago del Toro concuerdan con los datos observados en la estación fluviométrica río Serrano en desagüe lago del Toro. En la Figura 6.7 se observa el efecto amortiguador del lago del Toro en los caudales de entrada y salida al lago. También se observa

que los caudales modelados difieren de los observados en aproximadamente 10 y 20 m³/s entre junio y agosto (sobrestimándolos), y aproximadamente 10 y 15 m³/s en noviembre y diciembre (subestimándolos).

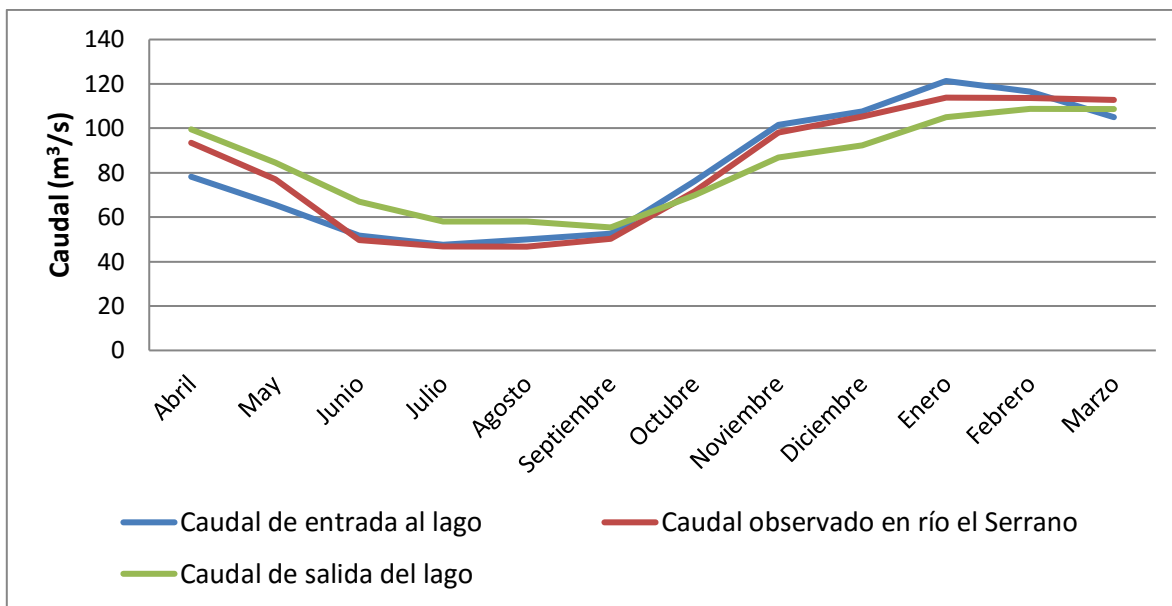


Figura 6.7. Entradas y salida del lago del Toro.
Fuente: Elaboración propia.

6.5.2 Balance hídrico río de Las Chinas

Al igual que en el caso del Lago del Toro, en esta sección se muestra el aporte proporcional de cada río al caudal total del río de Las Chinas antes de su desembocadura en el Lago del Toro. La Figura 6.8 y la Tabla 6.4 muestran el porcentaje aportado por cada una de las cuencas en relación al caudal total de entrada al lago sin considerar derechos de agua.

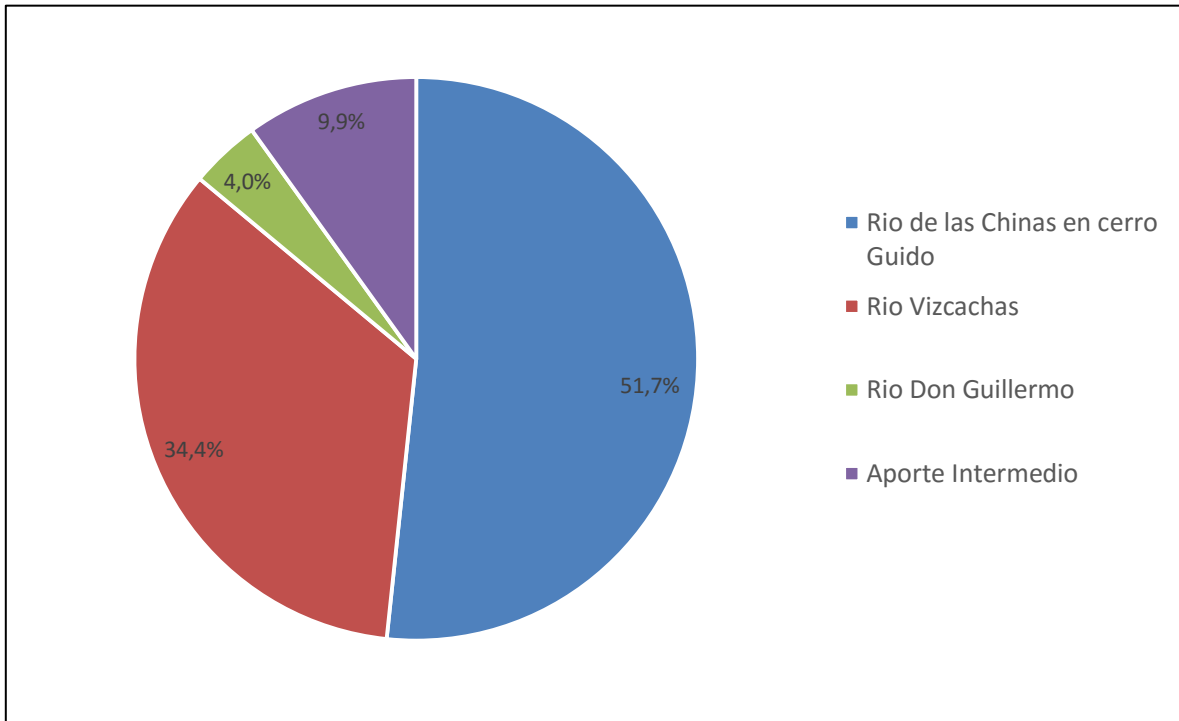


Figura 6.8. Porcentaje aportado por cada subcuenca del río de Las Chinas sin la extracción de derechos de agua

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.4. Porcentaje de caudal aportado por cada subcuenca del río de Las Chinas a nivel mensual.

	Río de Las Chinas en cerro Guido	Río Vizcachas	Río Don Guillermo	Río de Las Chinas Intermedia	Caudal total Antes del lago (m3/s)
Abril	62,8%	33,5%	0,8%	2,8%	11,10
Mayo	57,6%	32,6%	2,6%	7,3%	12,62
Junio	48,1%	30,8%	5,0%	16,0%	12,42
Julio	34,3%	34,2%	7,5%	23,9%	10,88
Agosto	38,9%	32,1%	12,0%	17,0%	13,80
Septiembre	50,9%	31,4%	13,2%	4,5%	16,27
Octubre	60,3%	32,8%	4,1%	2,8%	26,76
Noviembre	59,1%	35,2%	1,3%	4,5%	30,92
Diciembre	52,8%	38,1%	0,5%	8,6%	22,82
Enero	47,5%	38,4%	0,4%	13,7%	12,35
Febrero	49,9%	38,2%	0,5%	11,4%	7,31
Marzo	58,0%	35,0%	0,5%	6,5%	9,43
Anual	51,7%	34,4%	4,0%	9,9%	15,56

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 6.9 y la Tabla 6.5 muestran el porcentaje aportado por cada una de las cuencas en relación al caudal total del río de Las Chinas antes de la entrada al lago, considerando de derechos de agua.

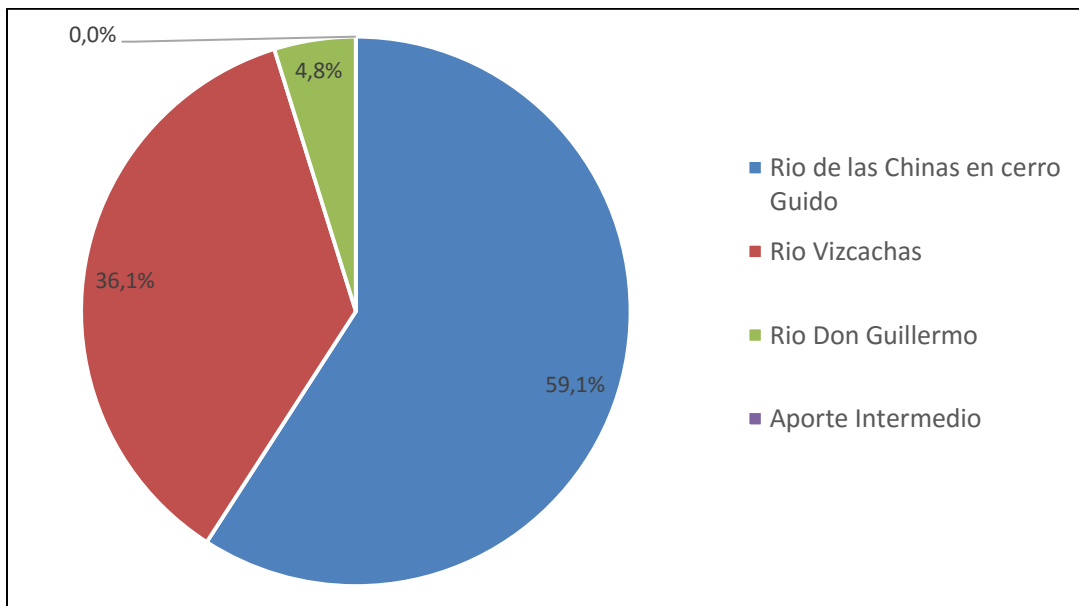


Figura 6.9. Porcentaje aportado por cada subcuenca del río de Las Chinas considerando extracción de derechos de agua

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.5. Porcentaje de caudal aportado por cada subcuenca del río de Las Chinas a nivel mensual.

	Río de Las Chinas en cerro Guido	Río Vizcachas	Río Don Guillermo	Río de Las Chinas Intermedia	Caudal total Antes del lago (m3/s)
Abril	72,2%	26,8%	1,0%	0,0%	1,67
Mayo	62,1%	35,1%	2,8%	0,0%	2,73
Junio	57,3%	36,7%	6,0%	0,0%	3,79
Julio	45,2%	44,9%	9,9%	0,0%	2,39
Agosto	45,4%	39,7%	14,9%	0,0%	3,34
Septiembre	56,5%	28,8%	14,7%	0,0%	2,14
Octubre	67,6%	27,8%	4,6%	0,0%	6,15
Noviembre	67,2%	31,3%	1,5%	0,0%	9,96
Diciembre	65,1%	34,2%	0,6%	0,0%	5,83
Enero	53,9%	45,6%	0,5%	0,0%	3,02
Febrero	56,3%	43,1%	0,6%	0,0%	1,36
Marzo	60,8%	38,6%	0,6%	0,0%	1,41
Anual	59,1%	36,1%	4,8%	0,0%	3,65

Fuente: Elaboración propia.

De estas figuras se puede observar que los caudales del río de Las Chinas provienen principalmente de las subcuencas del río de Las Chinas en cerro Guido y del río Vizcachas (con aportes del río Baguales). El resto de los afluentes, es decir, la cuenca intermedia del río de Las Chinas y el río Don Guillermo, contribuye con aportes menores, siendo de mayor magnitud durante los meses de invierno, en el caso del río Don Guillermo, y durante los meses de invierno y verano, en el caso del río de Las Chinas.

En el caso de que se usen todos los derechos consuntivos en la cuenca del río de Las Chinas, las proporciones de aportes al río cambian producto de que la extracción de derechos en la cuenca intermedia del río de Las Chinas es superior al caudal aportado por esta misma. Esto significa que el caudal de entrada al lago del Toro proviene exclusivamente de las subcuencas de los ríos Vizcachas, Don Guillermo y Las Chinas antes de cerro Guido. El caudal total que llega al Lago del Toro, disminuye de un promedio anual de 15,56 m³/s a 3,65 m³/s, es decir, un 76,5%. Esta disminución explica los importantes cambios reflejados en la Figura 6.5, en la Tabla 6.2 y en la Tabla 6.3 de la sección anterior.

6.5.3 Proyecciones futuras

En esta sección se presentan los resultados de caudales simulados bajo una proyección futura del clima y de la demanda de recursos hídricos. A continuación se resumen los escenarios futuros climáticos y de demanda.

Proyecciones climáticas

- Optimista: Considera una detención en la emisión de gases de efecto invernadero. Se utiliza el escenario RCP 2.6, con percentil 25.
- Intermedia: Considera medidas de mitigación futuras. Se utiliza el escenario RCP 6.0, con percentil 50.

Pesimista: Considera una emisión de contaminantes similar a la actual. Se utiliza el escenario RCP 8.5, con percentil 75.

Proyecciones de demanda

- BAU: Considera una tasa de crecimiento futuro similar a la actual, sin responder a alguna política de restricción o fomento al uso del recurso.
- Conservador: Disminución de un 30% a la tasa de cambio respecto al Escenario BAU aplicable para el periodo 2015 – 2025. Luego se restringe la evolución del derecho a un 2% anual.
- Intensivo: Aumento en un 30% a la tasa de cambio respecto al Escenario BAU, sin restricciones a este crecimiento futuro.

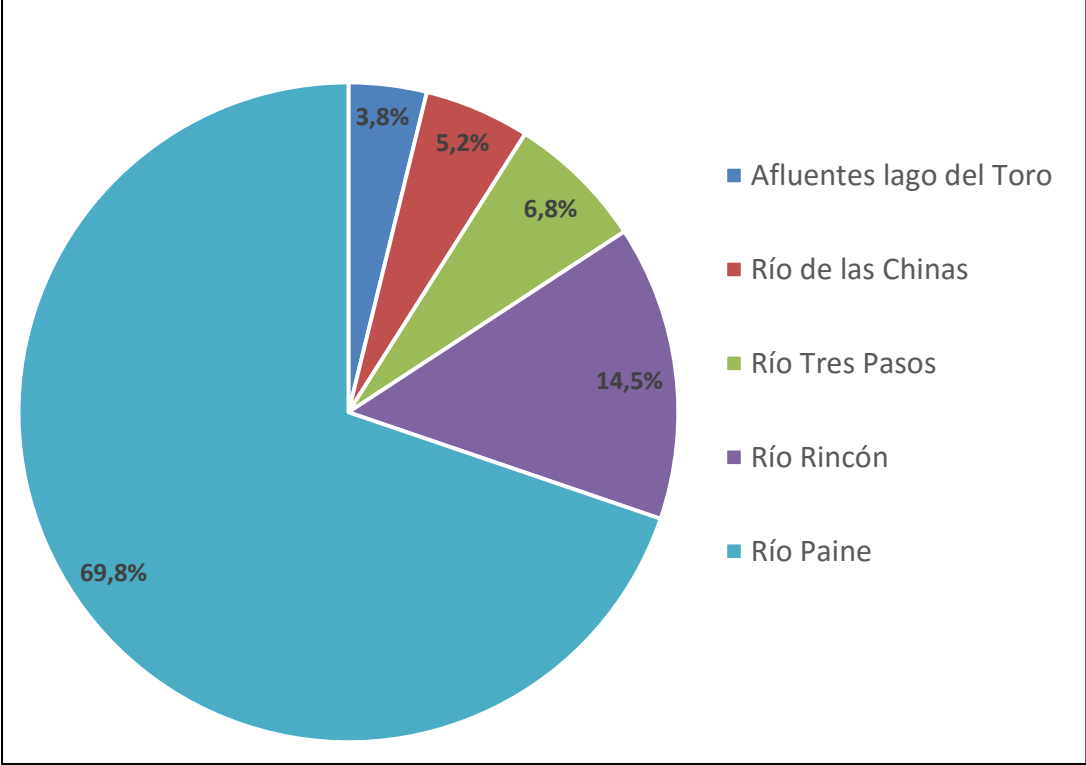
Los resultados de las proyecciones futuras se muestran para el período entre 2036 y 2050, de modo que el escenario de referencia sea similar al periodo actual (2002-2015). En cada resultado se muestra el escenario de referencia y los escenarios de mayor y menor cambio con respecto a este escenario, a excepción de los resultados de demanda insatisfecha donde sólo se muestra el escenario de mayor cambio con respecto al escenario de referencia. El mayor o menor cambio futuro se determina a mediante el caudal medio anual del registro completo en cada caso (2002-2050).

6.5.3.1 Entradas al lago del Toro

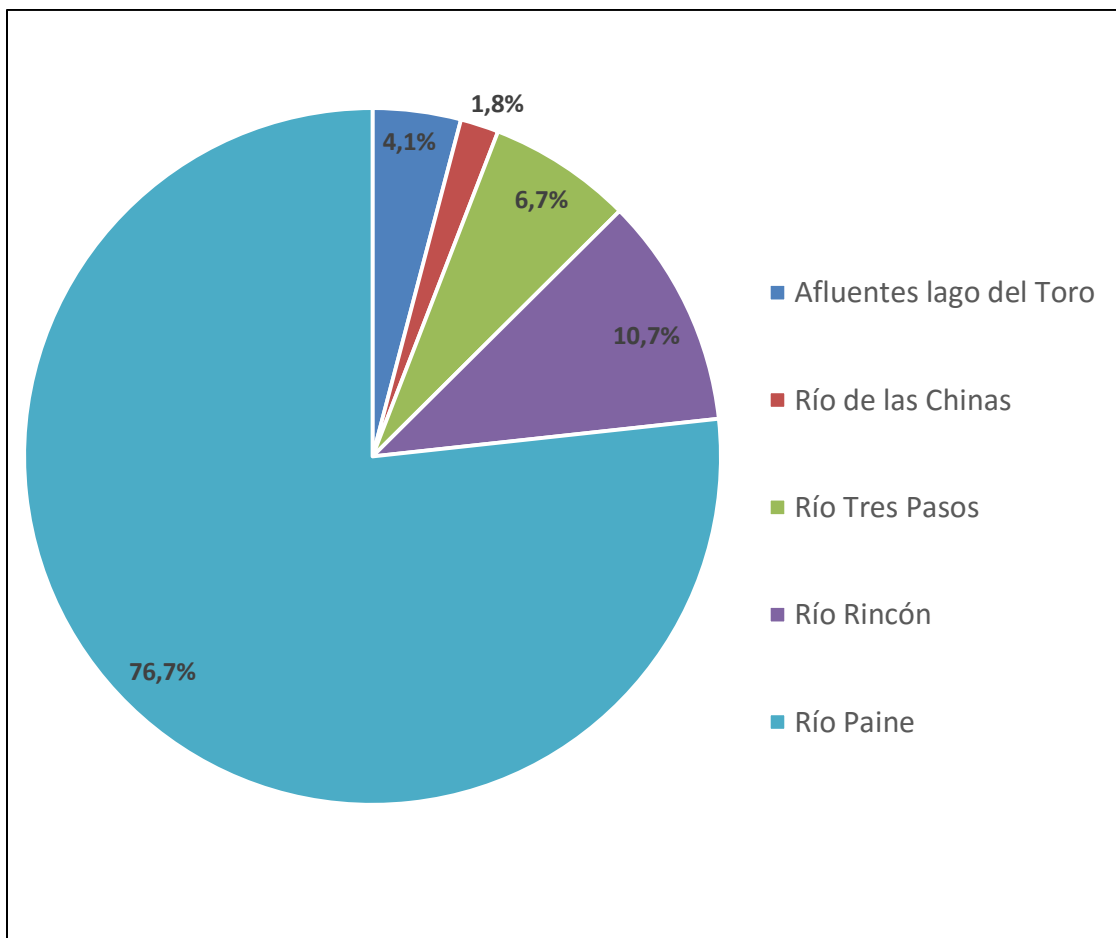
En las cuencas del río Paine y en la cuenca del río de Las Chinas se evalúa una proyección climática y en la demanda de recursos hídricos, mientras en el resto de las cuencas sólo se evalúa una proyección de demanda.

La cuenca del río Paine sólo considera un cambio climático en el aporte glacial del macizo Paine, en el resto de la cuenca sólo considera un cambio en la demanda de recursos hídricos.

La Figura 6.10 y la Tabla 6.6 muestran la proporción de los caudales de entrada al Lago del Toro, considerando el escenario de mayor cambio en la cuenca del río Serrano, es decir, el escenario Intensivo-Optimista. Se agrega además la proporción de estos caudales en la condición actual para su comparación.



(a)



(b)

Figura 6.10. Porcentaje aportado por cada cuenca de entrada al Lago del Toro a nivel anual. (a) Escenario actual (Figura 6.4), período 2001-2015. (b) Escenario de mayor cambio en la cuenca del río Serrano (Intensivo-Optimista), período 2036-2050.

Fuente: *Elaboración propia.*

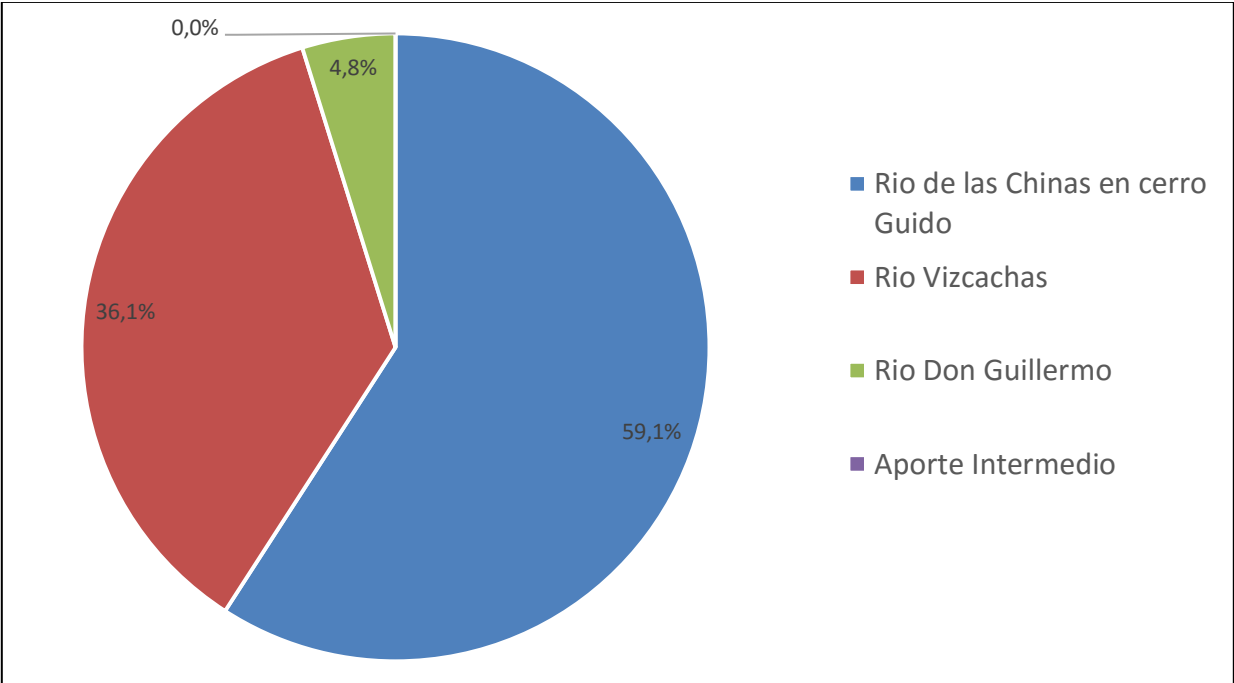
Tabla 6.6. Porcentaje de entrada aportado por cada cuenca al Lago del Toro a nivel anual

	Condición Actual (% anual)	Escenario de mayor cambio (% anual)
Afluentes al lago del Toro (%)	3,8%	4,1%
Río de Las Chinas (%)	5,2%	1,8%
Río Tres Pasos (%)	6,8%	6,7%
Río Rincón (%)	14,5%	10,7%
Río Paine (%)	69,8%	76,7%
Caudal promedio de entrada al lago (m ³ /s)	80,04	73,22

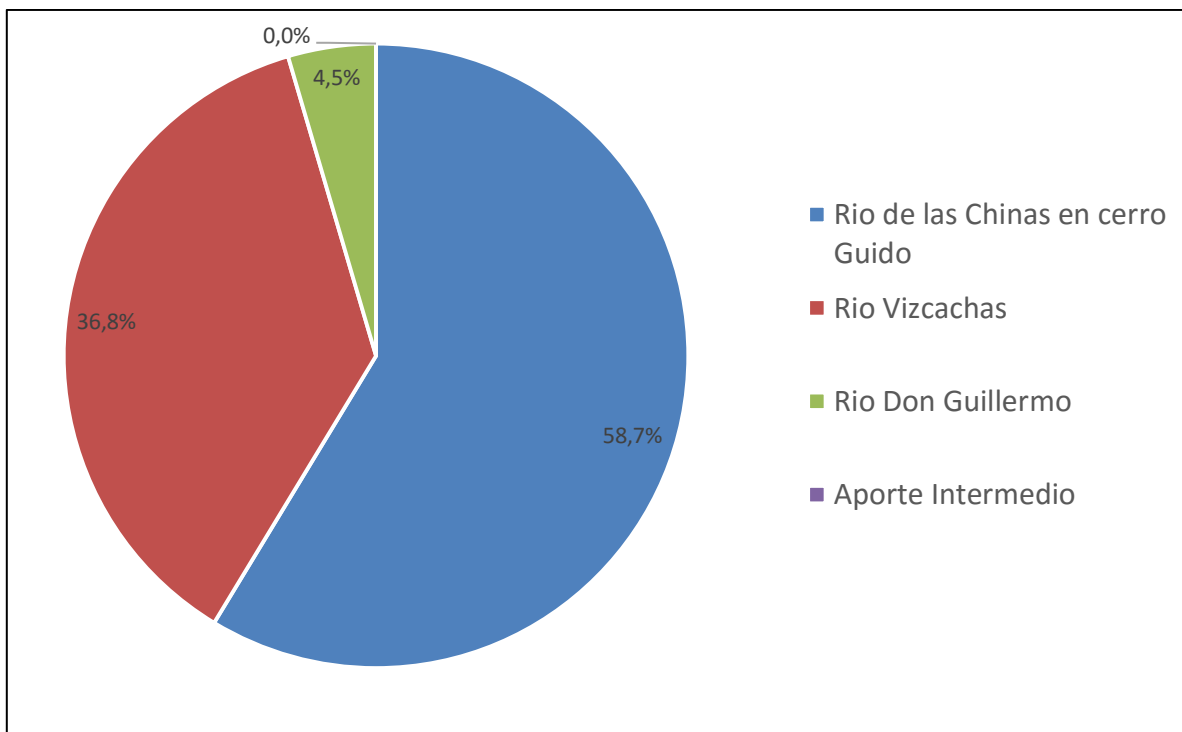
Fuente: *Elaboración propia.*

Por un lado, se observa una disminución de los caudales de entrada a nivel anual en el escenario futuro, de aproximadamente 6,8 m³/s. Por otro lado, se observa un aumento en la proporción del aporte del río Paine y una disminución en la proporción del aporte de los ríos Rincón y de Las Chinas, y levemente del río Tres Pasos. La proporción del aporte de los afluentes al lago del Toro aumenta levemente.

La Figura 6.11 y la Tabla 6.7 muestran la proporción de los caudales de las subcuencas del río de Las Chinas, considerando el escenario de mayor cambio en la subcuenca completa, es decir, el escenario Intensivo-Optimista.



(a)



(b)

Figura 6.11. Porcentaje aportado por cada subcuenca del río de Las Chinas a nivel anual (m^3/s). (a) Escenario actual (Figura 6.9), período 2001-2015. (b) Escenario de mayor cambio en la subcuenca completa (Intensivo-Optimista), período 2036-2050.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.7. Porcentaje aportado por cada subcuenca del río de Las Chinas a nivel anual (m^3/s)

	Condición Actual (% anual)	Escenario de mayor cambio (% anual)
Río de Las Chinas en cerro Guido (%)	59,1%	58,7%
Río Vizcachas (%)	36,1%	36,8%
Río Don Guillermo (%)	4,8%	4,5%
Río de Las Chinas intermedia (%)	0,0%	0,0%
Caudal total de entrada al lago (m^3/s)	3,65	1,10

Fuente: Elaboración propia.

Por un lado, se observa una disminución de los caudales de entrada al lago a nivel anual en el escenario futuro, de aproximadamente $2,55 m^3/s$. Además el caudal de entrada al lago corresponde al caudal ecológico, a nivel anual y mensual, considerando el escenario futuro. Por otro lado, se observa un comportamiento similar en la proporción de la mayoría de las subcuencas, con un leve aumento del aporte del río Vizcachas, y con una leve disminución leve

del aporte del río Don Guillermo y del río de Las Chinas en cerro Guido. Recordar que en este análisis el río Vizcachas incluye al río Baguales.

6.5.3.2 Almacenamiento

Se evalúa una proyección climática en la evaporación y precipitación del lago del Toro. La Figura 6.12 muestra el cambio de la proyección en la evaporación neta del lago (evaporación menos precipitación), el cual alcanza como máximo una disminución de 0,3 y 0,9 mm en el escenario de menor y mayor cambio, respectivamente.

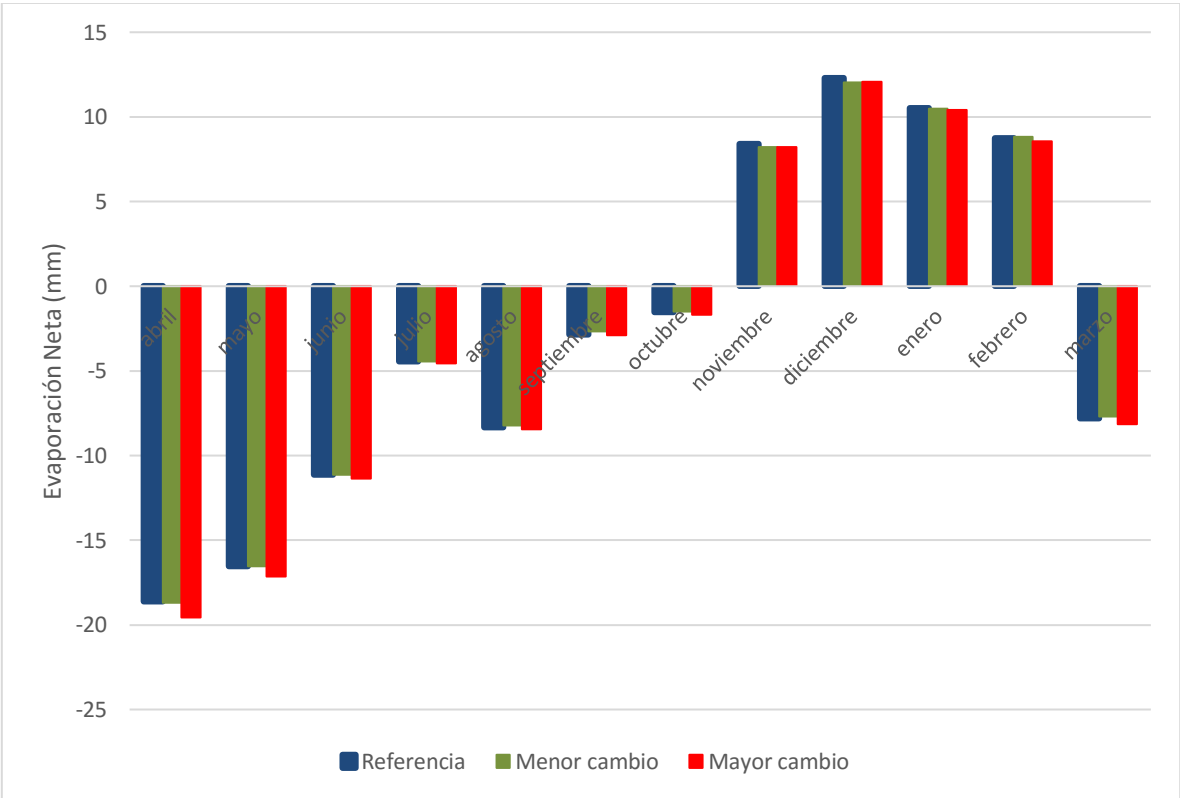


Figura 6.12. Evaporación Neta del Lago del Toro para el escenario de Referencia y para los dos escenarios de Cambio Climático.
 Fuente: Elaboración propia.

6.5.3.3 Salidas del lago del Toro

Se evalúan los caudales de la salida del lago del Toro considerando los caudales de entrada y el almacenamiento del lago con las proyecciones climáticas y de demanda mencionadas. La Figura 6.13 muestra el cambio proyectado en los caudales de salida del lago. El escenario de menor cambio considera una

proyección climática pesimista y una proyección de demanda conservadora. El escenario de mayor cambio considera una proyección climática optimista y una proyección de demanda intensiva.

En ambos escenarios el caudal del río Serrano disminuiría.

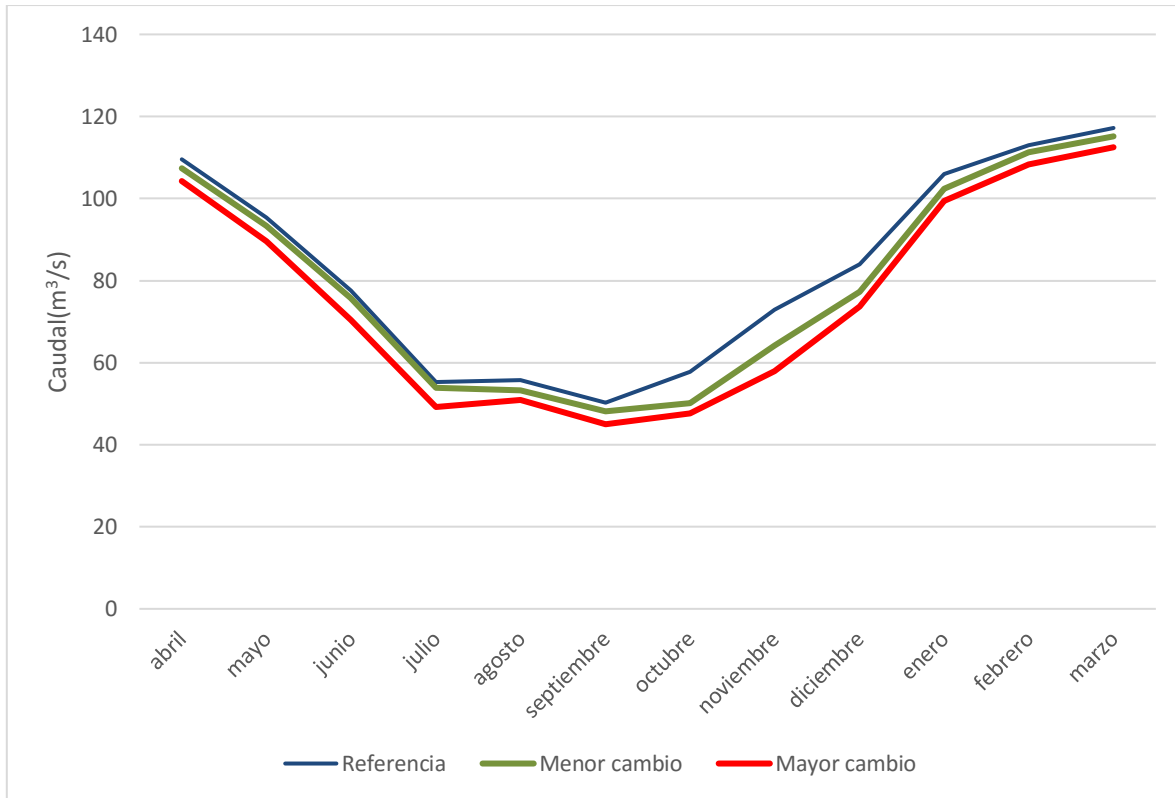


Figura 6.13. Caudal medio mensual en el río Serrano en desagüe lago del Toro para el escenario de Referencia y para los dos escenarios futuro.

Fuente: Elaboración propia.

7 CONCLUSIONES

En el presente estudio, se ha realizado un balance hídrico de la zona alta de la cuenca del río Serrano. Específicamente, la zona de estudio fue la cuenca aportante al Lago del Toro, ubicado en la comuna de Torres del Paine, Región de Magallanes y Antártica Chilena. Especial interés para la Dirección General de Aguas era entender qué efectos tenía una variación de caudales en el río de Las Chinas en el aporte al Lago del Toro y consecuentemente, si pudieran haber

consecuencias negativas para el funcionamiento del Parque Nacional Torres del Paine.

El estudio comprendió la recopilación de información base (coberturas de ríos, glaciares, lagos, topografía, etc.), infraestructura vial y relacionada a los recursos hídricos (estaciones meteorológicas, fluviométricas, nivel de lagos, etc.) y datos sobre los derechos de aprovechamiento de agua otorgados en la Región por la Dirección General de Aguas.

Este informe resume las actividades realizadas para la obtención de los datos necesarios para armar el modelo de balance hídrico en el software WEAP (*Modelo de Distribución y Planeamiento de Aguas* por sus siglas en inglés) que fue desarrollado para el cálculo del balance hídrico. Parte importante de los datos necesarios para armar este modelo provino de las batimetrías de orilla de los lagos del Toro, Porteño y Maravilla, obteniéndose las curvas de elevación versus volumen, las que son usadas en WEAP luego de aplicar ajustes de calibración.

A continuación, se presentan las conclusiones que se realizan a partir de los resultados obtenidos y los análisis de estos. Se entregan además algunas recomendaciones para la mejora de información y de posibles usos futuros de los productos entregados.

7.1 Información base y relleno de datos

Con respecto a la información cartográfica asociada a estas estaciones, se observó que las capas SIG oficiales obtenidos desde el sitio web de la DGA, no se ajustan a los cauces, tanto para las estaciones fluviométricas como para el nombre de algunos de los ríos de la cuenca del río de Las Chinas. En visita a terreno se logró corregir algunas coordenadas y otras ubicaciones (estimadas) fueron proporcionadas por la contraparte. Se recomienda revisar estas nuevas capas con la División de Hidrología de la Dirección General de Aguas.

Por otra parte, en el caso de la capa vectorial de ríos obtenida desde DGA Nivel Central, también se encontraron inconsistencias, esta vez entre los cauces y sus nombres, información que también debió ser corregida con indicaciones de la contraparte.

Esto es un punto a tomar en cuenta para no cometer errores en futuros estudios. Se recomienda una revisión de todas las coordenadas de las estaciones, tanto fluviométricas como meteorológicas, de la zona y una actualización de esta información en la página web de la DGA. Se recomienda a su vez, corroborar los

nombres de las estaciones, debido a que, en especial, la estación denominada en terreno "río Tres Pasos Ruta N°9" en la web aparece como "río Chorrillos Tres Pasos Ruta N°9", esto debiese corregirse para unificar la información y evitar errores.

En la zona de estudio, se cuenta con 16 estaciones con mediciones de precipitación diaria, de las cuales seis poseen también mediciones de temperaturas extremas diarias. Para el caso de medición de caudales diarios, se cuenta con 18 estaciones fluviométricas.

La calidad de los registros es variable, las estaciones fluviométricas son las que cuentan con registros más aceptables a partir de 1980, teniendo 4 con registros mayores a 20 años y otras cinco con registros entre 20 y 10 años; mientras que para precipitación sólo dos estaciones cuentan con más de 20 años completos y para temperatura esto se reduce a sólo una estación.

Se cuenta además con información de medición de niveles de lagos a nivel diario. Esta información no se encuentra tampoco completa, tiene temporadas vacías y la extensión de los registros se concentra en la última década. Para nuestro caso se utilizó la estación Lago Toro en Estancia río Paine, la cual tiene el registro más extenso.

Cabe destacar que para este estudio los datos se utilizan como un agregado mensual, por lo que al realizar el cálculo de estos montos, también se debe considerar la cantidad de registros por mes, lo que conlleva que meses con pocos registros diarios, aparezcan como vacíos.

Teniendo en cuenta la información recopilada, se sabe que la zona de estudio tiene características meteorológicas heterogéneas entre sectores de la cuenca. Los montos de precipitación son mayores en el área oeste, donde la isoyeta indica 6.000 mm comparados con el área este, donde este monto alcanza solamente los 200 mm. Por lo mismo, es necesario fortalecer la red de estaciones en la zona, instalando nuevas en el sector norte del área de estudio e invirtiendo en la mantención y mejoramiento de las existentes, para que el periodo de registros no se vea interrumpido.

El relleno de datos se realizó por medio de un modelo lineal considerando correlaciones decrecientes entre las estaciones objetivo y aquellas ubicadas en la Región de Magallanes y Antártica Chilena, rellenando meses hasta completar la serie. Se utilizó este método para rellenar datos de caudales medios mensuales, precipitaciones acumuladas mensuales y temperaturas medias mensuales (estas dos últimas sólo para referencia).

Si bien este método logra estimar adecuadamente el valor buscado tanto para las variables en estudio, no explica toda la varianza de la serie sino solamente una porción de ella. Esto genera series rellenas con menores valores de variabilidad que en la realidad, pero al mismo tiempo es lo suficientemente simple para ser usado con todas las estaciones de la zona de estudio al mismo tiempo. Para futuros estudios de actualización del modelo de balance hídrico, sería deseable mejorar la metodología agregando factores estocásticos a la regresión lineal según métodos de estadística de series de tiempo, como pueden ser modelos autorregresivos, modelos multivariados, etc. que aportan en generar series con la variabilidad original de las variables medidas.

Para el caso de caudales, dos estaciones deben seguir un relleno modificado para ajustar de mejor forma la serie de datos rellenos a la serie de datos observados, debido a sobre y sub estimaciones evidentes observadas al graficar las series.

Es necesario considerar que estos datos de series de caudal se utilizan para ingresar al modelo detallado en capítulos posteriores, por lo que siempre es preferible utilizar aquellas con una mayor cantidad de datos observados. Sin embargo, se realizó un tratamiento lo más acucioso dentro de lo posible para obtener datos rellenos ajustados a los datos observados. Para esto, es necesario, como se concluye en párrafos anteriores, fortalecer las redes de monitoreo, para contar con datos medidos de mejor calidad y extensión para la construcción de modelos.

7.2 Derechos de aprovechamiento

En lo que respecta al análisis de los derechos de aprovechamiento de la cuenca, se analizó la información disponible en los registros de la Dirección General de Aguas. En un primer momento se analizó la situación de estos derechos respecto a solicitudes, concesiones y derechos denegados, tanto a nivel provincial como en el área de estudio.

Luego, considerando solo aquellas concesiones actualmente otorgadas en la cuenca del río Serrano se pudo caracterizar el uso del recurso para cada una de las sub-subcuencas presentes, ya sea por tipo de derecho asociado y uso del mismo. En este sentido es relevante la ausencia del uso asociado al derecho, lo cual impide realizar un análisis más acabado respecto a tendencias y dinámicas esperables dadas ciertas actividades usuarias de recursos superficiales.

A partir de esta caracterización se plantearon algunas tendencias esperables respecto a dinámicas de uso de agua en la cuenca, con las cuales poder

proyectar las demandas de derechos de aprovechamiento. Se generaron cuatro escenarios posibles: 1) Una situación sin modificaciones respecto a los derechos actualmente asignados, 2) una evolución según tendencias observadas asociadas a la evolución de distintas actividades usuarias de agua en las distintas subcuencas consideradas, 3) un escenario conservador en donde existe una restricción a la demanda por derechos (-30% respecto a la tendencia) y finalmente 4) un escenario intensivo que implica un aumento e intensificación del uso de los recursos en toda la cuenca (+30% respecto a la tendencia). En todos ellos se considera, para el caso particular de los derechos asociados al río Paine, en donde futuras restricciones a la entrada al Parque Nacional Torres del Paine, ayudan a definir los límites de crecimiento en el uso del recurso, respecto a otras subcuencas en donde esta situación es menos clara.

Como parte de las recomendaciones generadas en este apartado, se recomienda poder avanzar en la clarificación de tipo de uso para las existentes y nuevas asignaciones de derechos, con tal de poder contar con información útil para la planificación y la gestión.

Finalmente, estas tendencias junto a dos escenarios hipotéticos futuros fueron planteadas para ser incorporados en el modelo WEAP desarrollado para la cuenca, con tal de considerar el efecto de distintas presiones de demanda sobre el recurso en una plataforma integrada con una oferta que también considera evolución de los caudales en el futuro. En este sentido, el ejercicio de incorporación de estos escenarios en el modelo de hidrológico debe ser considerado como un primer acercamiento al estudio de la demanda futura de la cuenca.

Un estudio más profundo respecto a la dinámica de derechos debiese considerar con más detalle las dinámicas particulares de cada área de la cuenca, el uso efectivo de los derechos constituidos, sus usos principales, políticas de desarrollo, fomento y/o restricción, así como una representación espacial más detallada de las distintas extracciones y restituciones existentes para cada uno de los tipos de derechos existentes.

7.3 Balance Hídrico

El modelo de balance hídrico del lago del Toro se desarrolló en base a las entradas y salidas de cada componente del sistema. Para lograrlo se generaron series sintéticas de caudal en los puntos de control donde no se cuenta con datos medidos, además de la evaluación de diferentes procesos propios de un sistema hidrológico, tales como la evaporación y el caudal aportado por glaciares.

También se representó el efecto regulador de los lagos del sistema, considerando su curva de descarga y su curva de volumen versus elevación.

Mediante la modelación en WEAP se representó el balance hídrico del Lago del Toro, logrando un buen ajuste de los caudales modelados y observados en el río Serrano, justo en el desagüe del lago del Toro. Asimismo se logró un buen ajuste de las cotas modeladas y observadas en el lago del Toro.

Los caudales de entrada al lago del Toro se estimaron mediante las series sintéticas generadas y el registro de caudales observados y rellenados. La cuenca del río de Las Chinas cuenta con bastante información fluviométrica, lo cual es favorable para estudiar el comportamiento de cada una de las subcuencas.

Los caudales de salida del lago del Toro están principalmente influenciados por los caudales de entradas provenientes del río Paine, es decir, su principal aporte es de origen glacial. Por otro lado, el lago del Toro produce un efecto regulador en los caudales de salida, siendo estos últimos muy sensibles al comportamiento del lago, principalmente a la curva de volumen vs elevación.

Se recomienda en un futuro integrar el comportamiento del resto de los lagos del sistema, principalmente del lago Pehoé y Nordenskjöld. También se recomienda la instalación de estaciones de medición de elevación del agua en todos los lagos del sistema, de modo de utilizar esa información en la calibración del modelo. Con esta información disponible en los lagos Porteño y Maravilla, la calibración de las curvas de volumen versus elevación arrojaría mejores resultados en el caudal desaguado al lago del Toro por el lago Maravilla.

En cuanto a los requerimientos hídricos del sistema o demandas de agua, estos fueron satisfechos en base a la prioridad asignada de uso en WEAP. A los caudales ecológicos se les asignó la máxima prioridad, seguido por los derechos superficiales de agua permanentes y, posteriormente, por los derechos superficiales de agua eventuales. Esto puede ser modificado posteriormente por la DGA, de manera de estudiar el impacto del cambio de prioridad en la demanda de agua del medio ambiente y otros usuarios de agua.

Se consideró como caudal ecológico el máximo caudal ecológico determinado en los derechos constituidos de cada río. Esto implica una sobrevaloración del caudal ecológico en tramos alejados hacia aguas arriba, con lo cual, los derechos superficiales pueden haber sido solo parcialmente satisfechos en la modelación. Por otro lado, el catastro de derechos superficiales utilizados no cuenta con toda la información de los derechos, especialmente en su locación (algunos derechos quedaban fuera de cauces) o de uso efectivo del agua. Se recomienda completar

este catastro para que desarrollar el análisis, principalmente en las coordenadas de los derechos.

Se modelaron dos opciones extremas: el sistema en régimen natural, suponiendo que no existen extracciones de agua por parte del hombre y por otro lado, el completo uso y demanda total de los derechos de agua actualmente constituido en la cuenca.

En general, la demanda de derechos superficiales de aguas no consuntivos, tanto permanentes como eventuales, es cubierta en la mayoría de los ríos para la condición de uso de los derechos, a excepción del río Tres Pasos y levemente del río Don Guillermo. Los derechos consuntivos permanentes no son satisfechos en la mayoría de los ríos, sobretodo en la demanda de derechos eventuales. El caudal ecológico es satisfecho en su totalidad en la mitad de los ríos del sistema, siendo el río Paine el que tiene el mayor déficit.

Se realizaron proyecciones de impacto del cambio climático en algunos ríos de la cuenca. Solamente fue posible desarrollar un análisis de los caudales de deshielo del macizo del Paine, en la precipitación y evaporación de los lagos del Toro, Porteño y Maravilla, y de caudales en las distintas subcuencas del río de Las Chinas. Estas últimas fueron analizadas utilizando el método de Turc. El resto de las cuencas no pudieron ser representadas mediante el método de Turc en la condición actual debido a ser cuencas muy influidas por lagos o glaciares, por lo que no fue posible proyectar un cambio climático utilizando este método.

De acuerdo a los escenarios de cambio climático estudiados, sólo se proyectan cambios importantes en las temperaturas, llegando a aumentar 1,3°C en el escenario de mayor cambio. No se proyectan cambios importantes en las precipitaciones. Un aumento en las temperaturas implicaría un aumento en los caudales de deshielo y una disminución en los caudales de las cuencas analizadas utilizando el método de Turc, producto del aumento en la evapotranspiración.

En general, la disponibilidad de agua en los escenarios futuros de las subcuencas del río de Las Chinas disminuye en los escenarios futuros, producto del aumento en las temperaturas y en la demanda de recursos hídricos. En algunos casos se puede observar un aumento en los caudales producto de un aumento mínimo en las precipitaciones futuras bajo un escenario climático pesimista. Esto significa que a pesar de que no se proyecten cambios importantes en las precipitaciones, estas son sensibles a cambios menores. Por otro lado, las subcuencas ubicadas hacia aguas arriba no son capaces de satisfacer su demanda en escenarios futuros producto del requerimiento del caudal ecológico aguas abajo en el río de Las Chinas.

Se proyecta un aumento del caudal en el aporte de los glaciares del macizo Paine debido al mayor derretimiento de los glaciares de cabecera y de Campos de Hielo, aunque se propone revisar en mayor detalle estos resultados ya que no se tomó en cuenta la disminución de estos mismos glaciares.

Con el aumento de los caudales futuros en el río Paine y la disminución de los caudales de entrada de la mayoría de los ríos producto de un aumento en la demanda de recursos hídricos y una disminución por cambio climático en el caso del río de Las Chinas, la proporción del aporte de los caudales de entrada al lago del Toro cambia en los escenarios futuros. Por otro lado, el aporte de las subcuencas del río de Las Chinas mantendría la proporción del caudal aportado a la cuenca.

Tanto la elevación del lago del Toro como el caudal de salida en el río Serrano disminuirían en el escenario de mayor cambio. Este escenario considera una proyección de demanda intensiva y una proyección climática optimista. Con esto se concluye que la disminución proyectada tanto en el lago como en el río estaría condicionada mayormente por la demanda de recursos desfavorable (intensiva), por sobre una proyección climática desfavorable (pesimista).

Las proyecciones de mayor cambio futuro en los recursos hídricos estiman una mayor insatisfacción de la demanda de derechos consuntivos en todos los ríos, tanto para derechos permanentes como eventuales. Los derechos no consuntivos aumentarían su insatisfacción de demanda en los ríos Tres Pasos y Paine. La demanda de caudal ecológico se mantendría similar al periodo actual.

Se recomienda realizar estudios hidrológicos más profundos en toda la cuenca, de manera de simular series de precipitación y temperaturas y aplicarlas a toda la cuenca.

Además de las recomendaciones ya mencionadas, se proponen algunas ideas para profundizar en el análisis de la cuenca del río Serrano en el desagüe del lago del Toro:

- Incluir caudales ecológicos sobre derechos constituidos sobre lagos.
- Desagregar los derechos superficiales de agua, ubicándolos en su respectiva coordenada y considerar el caudal ecológico correspondiente en cada caso.
- Incluir en el análisis las solicitudes de derechos superficiales de agua, en los ríos donde aún existe disponibilidad de agua.
- Evaluar una proyección climática en el resto de las cuencas mediante un modelo hidrológico, el cual considera parámetros morfológicos e

hidrológicos que no considera un balance hídrico simple. De esta forma, sería posible considerar procesos de derretimiento producto del aumento en las temperaturas, y así proyectar cambios en la distribución mensual de los caudales.

- Identificar si existe alguna razón por la cual el río Tres Pasos no pudo ser representado mediante el modelo de Turc, por ejemplo, debido a extracciones no declaradas en el río en el lado argentino, etc.

Es de esperar que este estudio haya contribuido al conocimiento de la cuenca del río Serrano y en especial al comportamiento del sistema lacustre del Lago del Toro y sus afluentes.

Los posibles usos futuros del modelo construido son variados, desde el cuidado medio ambiental, uso responsable de los recursos hídricos para actividades productivas como agricultura, ganadería e hidroelectricidad, entre otras. La ventaja de contar con un modelo integrado es que los distintos usuarios pueden usar un lenguaje común y poder tener toda la información disponible en una sola plataforma.

Para el mejor uso, se recomienda a todos los interesados usar el modelo de manera de que éste pueda ir actualizándose periódicamente y se le puedan agregar módulos o información relevante para la toma de decisiones en la Región de Magallanes y Antártica Chilena.

8 REFERENCIAS

	Título
1	Abrishamchi, A., Alizadeh, H., Tajrishy, M., & Abrishamchi, A. (2007). Water Resources Management Scenario Analysis in Karkheh River Basin, Iran, Using WEAP Model. <i>Hydrological SCience and Technology</i> , 23(1/4), 1.
2	Anales Instituto Patagonia (2004-2013). Resumen meteorológico estación Jorge C. Schythe.
3	Braithwaite R., Zhang Y. (2000). Sensitivity of mass balance of five Swiss glaciers to temperature changes assessed by tuning a degree-day model. <i>Journal of Glaciology</i> , Vol. 46, No. 152.
4	Chow V. T., Maidment D. R., and Mays L. W. (1994). <i>Hidrología Aplicada</i> . (Traducido de la 1a.ed.). Santa Fé de Bogotá: McGraw-Hill Interamericana.
5	CONAF (2012). Programa integral de mejoramiento de la gestión del Parque Nacional Torres del Paine. 35p.
6	Condom, T., Escobar, M., Purkey, D., Pouget, J. C., Suarez, W., Ramos, C., Apaestegui, J., Zapata, M., Gomez, J., and Vergara, W. (2011). Modelling the hydrologic role of glaciers within a Water Evaluation and Planning System (WEAP): a case study in the Rio Santa watershed (Peru), <i>Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.</i> , 8, 869-916.
7	Dirección General de Aguas (1987). Balance Hídrico Nacional.
8	Dirección General de Aguas (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Serrano.
9	Dirección General de Aguas (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Informe Final desarrollado por CADE-IDEPE Consultores. 89 p.
10	Dirección General de Aguas (2008). Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos.
11	Dirección General de Aguas (2010). Análisis de metodología y determinación de caudales de reserva turísticos. Informe Final desarrollado por Aquaterra Ingenieros Limitada. S.I.T. N°206. 564p.
12	Dirección General de Aguas (2010). Análisis de metodología y determinación de caudales de reserva turísticos. Informe final.
13	Gobierno Regional Magallanes y Antártica Chilena. (2012). Estrategia Regional de Desarrollo de Magallanes y Antártica Chilena 2012-2020. 128p.

	Título
14	Ingol-Blanco E. y McKinney D. C. (2009). Hydrologic Model for the Rio Conchos Basin: Calibration and Validation. CRWR Online Report 08-09. Center for Research in Water Resources. Austin, EEUU.
15	IPCC, (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
16	Magrin, G.O., J.A. Marengo, J.-P. Boulanger, M.S. Buckeridge, E. Castellanos, G. Poveda, F.R. Scarano, and S. Vicuña (2014). Central and South America. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1499-1566.
17	Ministerio Secretaría General de la Presidencia (2010). Decreto 75. Norma secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales de la cuenca del río Serrano. Fecha de promulgación: 22-06-2009. Id: 1011869. url: http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1011869&idVersion=2010-03-19
18	Moss, Richard, Mustafa Babiker, Sander Brinkman, Eduardo Calvo, Tim Carter, Jae Edmonds, Ismail Elgizouli, Seita Emori, Lin Erda, Kathy Hibbard, Roger Jones, Mikiko Kainuma, Jessica Kelleher, Jean Francois Lamarque, Martin Manning, Ben Matthews, Jerry Meehl, Leo Meyer, John Mitchell, Nebojsa Nakicenovic, Brian O'Neill, Ramon Pichs, Keywan Riahi, Steven Rose, Paul Runci, Ron Stouffer, Detlef van Vuuren, John Weyant, Tom Wilbanks, Jean Pascal van Ypersele, and Monika Zurek (2008). Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies (PDF). Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change. p. 132.
19	Santana A., Olave C., and Butorovic N. (2010). Estudio climatológico con registros de alta resolución temporal en campamento Posesión (ENAP), Magallanes, Chile. Anales Instituto Patagonia (Chile). 38(1):5-34.
20	SEGEJOB (2010). Norma secundaria de calidad ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales de la cuenca del río Serrano.
21	Silva, S. (1979). Especificaciones Técnicas y presupuesto para construcción de la estación fluviométrica río de Las Chinas.

	Título
22	Sivan, I., Salingar Y., and Rimmer A. (2007). A WEAP model for the Sea of Galilee (Lake Kinneret) Basin – Water resources and consumers by sub-basins. <i>Water Engineering</i> 53; 50-58.
23	Solari, M; Le Roux, J; Hervé, F; Airo, A; Calderón, M (2012). Evolution of the Great Tehuelche Paleolake in the Torres del Paine National Park of Chilean Patagonia during the Last Glacial Maximum and Holocene. <i>Andean Geology</i> 39 (1): 1-21. January, 2012
24	Turc, L. (1954). The water balance of soils. Relation between precipitation, evaporation and flow. In <i>Annales Agronomiques</i> 5, 491-569.
25	US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineer Center (2010). HEC-RAS Hydraulic Reference Manual.
26	Vergara W., Deeb A., Leino I., Kitoh A., Kitoh A., and Escobar M. (2011). Assessment of the Impacts of Climate Change on Mountain Hydrology. <i>World Bank Studies</i> .
27	Yates D., Sieber J., Purkey D., and Huber-Lee A. (2005b). WEAP21: A demand, priority, and preference driven water planning model: part 1, model characteristics. <i>Water Int</i> 30(4):501–512.
28	Yates D., Sieber J., Purkey D., Huber-Lee A., and Galbraith H. (2005a). WEAP21: A demand, priority, and preference driven water planning model: part 2, Aiding freshwater ecosystem service evaluation. <i>Water Int</i> 30(4):487–500.

