



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**INCERTIDUMBRE EN LA ESTIMACIÓN DEL HIDROGRAMA DE SALIDA EN LAGOS  
USANDO PRODUCTOS SATELITALES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

**JAVIERA ALEJANDRA CÁCERES HERNÁNDEZ**

PROFESORA GUÍA  
**XIMENA VARGAS MESA**

PROFESOR CO-GUÍA  
**EDUARDO MUÑOZ CASTRO**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN**  
YOHANN VIDELA GIERING  
MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA

SANTIAGO DE CHILE

**2023**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERA CIVIL  
POR: JAVIERA ALEJANDRA CÁCERES HERNÁNDEZ  
FECHA: 2023  
PROF. GUÍA: XIMENA VARGAS MESA

## **INCERTIDUMBRE EN LA ESTIMACIÓN DEL HIDROGRAMA DE SALIDA EN LAGOS USANDO PRODUCTOS SATELITALES**

En el año 2016, se iniciaron en el país los estudios para la actualización del Balance Hídrico Nacional, vigente desde el año 1987. El presente manuscrito viene a cubrir un vacío metodológico referido a la forma en que se incluyen los lagos en la modelación de cuencas utilizando el modelo hidrológico Variable Infiltration Capacity (VIC).

Para ello, se trabaja con los lagos Ranco y Pirihueico, y sus respectivas cuencas, para evaluar el desempeño predictivo del modelo VIC en la estimación del hidrograma de salida de dichos lagos. Asimismo, se evalúa la estimación del hidrograma mediante la configuración de perfiles de lagos con distinto número de nodos y la sensibilización de los parámetros de nivel de agua de vertedero y ancho de desagüe.

Se obtuvo un KGE aceptable de 0,59 para la cuenca del Lago Pirihueico (Río Fuy en Desagüe Lago Pirihueico) y un KGE deficiente de 0,37 para la cuenca del lago Ranco (Río Bueno en Bueno) debido principalmente a una baja correlación y déficit en la representación de la variabilidad. Se observó que, en ambas cuencas, la cantidad de nodos especificadas para definir el perfil del lago no implica un cambio significativo en el desempeño del modelo. Dado que los parámetros utilizados en la modelación hidrológica fueron calibrados previamente sin considerar la presencia de lagos y que los resultados indican una baja en el criterio de eficiencia, KGE, debido a la presencia de estos, se deduce que modelar sin considerar el efecto de lagos puede conducir a resultados sesgados puesto que los impactos hidrológicos de estos sistemas resultan compensados por los parámetros de calibración.

Por otra parte, el análisis de sensibilidad permite expandir el espectro de desempeño del modelo y reconocer la influencia de los parámetros sensibilizados en la estimación del hidrograma de salida. El modelo presenta un mejor funcionamiento cuando se suponen condiciones para una baja escorrentía y se recomienda que el nivel de agua de vertedero adopte valores dentro del rango de variación del nivel de agua del lago. El impacto del ancho de vertedero está limitado al flujo superficial.

Adicionalmente, se determina que el modelo es capaz de representar adecuadamente la variación del nivel de agua de lagos. Por el contrario, existen ciertas limitaciones en el modelo VIC cuando se trata de estimar los cambios en el área superficial; sin embargo, no se puede evaluar el desempeño del modelo con respecto a esta variable debido a que no existen observaciones in situ con las que comparar. Así, tampoco es posible ser concluyentes en cuanto a la utilidad de los productos Pre SWOT y NDWI de Landsat 5 y 8 para estimar el espejo de agua de lagos.

La metodología es generalizada para cuencas con lagos sin control fluviométrico aguas arriba de estos, y de nivel de agua y profundidad del lago conocidos para un momento determinado. Sin embargo, resulta necesaria la existencia de control fluviométrico aguas abajo del lago para validar el desempeño del modelo. Se sugiere seguir estudiando las limitaciones y sensibilidades del módulo de lagos de VIC para mejorar su precisión y utilidad práctica.

*«The scary news is: You're on your own now.  
But the cool news is: You're on your own now.»*

– TAYLOR SWIFT

*«You're all sorts of things you don't even know yet.»*

– TAYLOR JENKINS REID, Daisy Jones & The Six

# Agradecimientos

En la recta final de mi etapa universitaria, me he encontrado múltiples veces mirando hacia atrás y no he podido evitar sentir una enorme gratitud por todas y todos quienes me acompañaron en este proceso.

En primer lugar, a mi profesora guía Ximena Vargas, por su confianza y paciencia. A mi co-guía Eduardo Muñoz, por el tiempo dedicado y por creer en que podía lograrlo, esta memoria no hubiese sido posible sin tu ayuda.

A quienes me brindaron su tiempo y ayuda en distintas etapas de la memoria. Al profesor Yohann Videla, por enseñarme a utilizar ArcGIS y proponer ideas que me resultaron de gran utilidad. A las capitánas de puerto de Puerto Fuy y Lago Ranco, por recibirnos con amabilidad y buena disposición. Y al Grage, por ayudarme con errores de código sin importar la hora.

A lo largo de mi estancia en esta Universidad, tuve el honor de formar parte de equipos humanos que llenaron de vida y motivación incluso mis días más grises. A la Rama de Natación de la FCFM, que sólo por ella podía levantarme a las 6 de la mañana; un agradecimiento especial a nuestra entrenadora, Mónica, y a las niñas de siempre, que me enseñaron de esfuerzo y a desafiar mis propios límites. A la ONG CEUS Chile, especialmente al equipo del 2017 y 2018, no me alcanzan las palabras para explicar todo lo que aportaron en mi formación como persona y como futura profesional. Al equipo CDI Beauchef del 2019 (el año que recuerdo con más cariño muy probablemente por ustedes), que me enseñaron del verdadero trabajo en equipo; gracias por los días de trabajo, en los que nunca faltaban las risas.

A mi primer grupo de amigos y amigas de la facultad, por acompañarme en las mejores experiencias que tuve en esta etapa, por las tardes de estudio, los sábados después de control pasando las penas y los almuerzos en la escalera; un gracias en mayúsculas al Grage, la Favi, la Fran y la Javi, me siento infinitamente agradecida de poder llamarles amigos/as, gracias por estar siempre ahí (y gracias Beauchef por haberme permitido conocerles). A quienes me acompañaron en el plan común de Civil, por ayudarme a sobrevivirlo. A los compañeros hidráulicos de cuarentena, por acogerme en su grupo de estudio. Al grupo de Integrado y a los de la salita: Nacho, Stefi, Seba, Vale, Cata, Javi y Dani, por hacer esos días de trabajo más amenos, nos conocimos al final de la carrera pero agradezco mucho que haya pasado. También a mis xikis, Clau, Tami, Mayra y Cony, son un pilar fundamental en mi vida, las quiero mucho. A la Javi, la Isi, el Revo y la Vale, por siempre estar ahí a pesar del tiempo y la distancia.

A mi familia, a mi Lala y mi tía Olga, por llenarme de fuerzas y palabras de aliento, por no juzgarme, y por no perder su fe en mí. A mis abuelos, por ser mis ejemplos a seguir. A mis papás, por enseñarme a que puedo lograr todo lo que me proponga, por más difícil que se vea, con perseverancia y confianza en mí misma. A mi hermano, por su honestidad. Y por último, a mis perros, la Tita, el Oliver y el Campeón, por todas esas noches en que no los dejé dormir bien, y por permitirme encontrar consuelo y esperanza en el mundo en sus ojitos.

# Tabla de Contenido

Capítulo 1: Introducción .....	1
1.1. Motivación .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Organización del informe .....	2
Capítulo 2: Marco teórico y disponibilidad de información .....	3
2.1. Dinámica hidrológica de lagos.....	3
2.2. Modelos Hidrológicos.....	4
2.3. La teledetección .....	4
Capítulo 3: Zona de estudio y Datos .....	7
3.1. Descripción de los datos utilizados.....	7
3.2. Caracterización fisiográfica de cuencas y lagos y disponibilidad de información hidrometeorológica .....	8
3.3. Caracterización climatológica.....	11
3.4. Caracterización hidrológica .....	15
3.5. Hidrografía de lagos.....	16
3.6. Cambios en la superficie de los lagos .....	18
3.7. Antecedentes proyecto BHN – DGA 2022 .....	19
Capítulo 4: Metodología .....	21
4.1. Modelación hidrológica en VIC.....	21
4.2. Evaluación del desempeño del modelo y análisis de sensibilidad .....	31
Capítulo 5: Resultados .....	35
5.1. Nivel de agua de vertedero .....	35
5.2. Modelación en cuencas aguas arriba a lagos .....	36
5.3. Modelación de lagos .....	38
5.4. Sensibilidad en la modelación de lagos .....	40
5.5. Evaluación de la dinámica hidrológica de lagos.....	42
Capítulo 6: Discusiones .....	45
Capítulo 7: Conclusiones .....	48
7.1. Desempeño del modelo.....	48
7.2. Generalización de la metodología.....	49
7.3. Trabajo futuro .....	49
Bibliografía.....	51
Anexos .....	54
Anexo A: Selección de la zona de estudio.....	54
Anexo B: Producto CR2MET v2.5 y su comparación respecto a otros productos de precipitación disponibles en la literatura .....	57
Anexo C: Valores parámetros de modelación hidrológica .....	59

# Tabla de Figuras

Figura 3.1: Mapa de geolocalización de la zona de estudio y ubicación de estaciones. Los números indicados en el panel A corresponden a un identificador (ID) asociado a las estaciones fluviométricos y meteorológicos listadas en la Tabla 3.4. _____	10
Figura 3.2: Descomposición de la precipitación mensual, Río Bueno en Bueno. _____	12
Figura 3.3: Descomposición de la temperatura media promedio mensual, Río Bueno en Bueno. _____	12
Figura 3.4: Variación estacional de la precipitación mensual para ambos sistemas en el periodo 1981-2019. Los bloques incluyen los valores entre 25 y 75% de probabilidad de excedencia y la línea negra en su interior definen la mediana. _____	13
Figura 3.5: Variación estacional de la temperatura media promedio mensual para ambos sistemas en el periodo 1981-2019. Los bloques incluyen los valores entre 25 y 75% de probabilidad de excedencia y la línea negra en su interior definen la mediana. _____	13
Figura 3.6: Variación espacial mensual de la precipitación en el periodo 1981-2019, cuenca Río Bueno en Bueno. El lago Ranco se muestra en el interior de la cuenca. _____	14
Figura 3.7: Variación espacial mensual de la temperatura media en el periodo 1981-2019, cuenca Río Bueno en Bueno. _____	14
Figura 3.8: Variación espacial de la precipitación media anual en periodo 1981-2019 para ambos sistemas. _____	15
Figura 3.9: Variación espacial de la temperatura media anual en periodo 1981-2019 para ambos sistemas. _____	15
Figura 3.10: Series de caudal diario en estaciones de salida de la zona de estudio. _____	16
Figura 3.11: Mapa de los ráster de profundidad de lagos. _____	17
Figura 3.12: Variación área superficial y volumen con respecto a la profundidad, lago Pirihueico. _____	17
Figura 3.13: Variación área superficial y volumen con respecto a la profundidad, lago Ranco. _____	18
Figura 3.14: Series de tiempo altura limnimétrica observada. _____	18
Figura 3.15: Esquema de los procesos considerados para la obtención del caudal efluente de lagos en DGA (2019a). _____	20
Figura 4.1: Esquema niveles de agua lago. _____	22
Figura 4.2: Esquema del algoritmo de VIC para lagos. I: Evaporación del lago se calcula con balance de energía. II: Caudal entra al lago desde la superficie terrestre con vegetación. III: Caudal de salida del lago se calcula con el nuevo escenario. IV: El escenario es recalculado. Obtenida del informe Water Budget Record from Variable Infiltration Capacity (VIC) Model (Gao, H. et al., 2010). _____	24
Figura 4.3: Esquema del algoritmo de zonas de inundación: a) lago en su máxima extensión y zona de inundación saturada, b) baja el nivel del lago e ingresa escorrentía desde la zona de inundación, c) evaporación de ambas zonas reduce humedad de suelo, d) aumenta nivel del lago y se satura la zona de inundación mediante recarga. Obtenida del informe Water Budget Record from Variable Infiltration Capacity (VIC) Model (Gao, H. et al., 2010). _____	25

Figura 4.4: Esquema metodológico para la configuración y evaluación del modelo VIC.	26
Figura 4.5: Curvas perfiles de profundidad, lago Pirihueico.	27
Figura 4.6: Curvas perfiles de profundidad, lago Ranco.	28
Figura 4.7: Mapa de geolocalización de las cuencas para la relación de rendimiento.	29
Figura 4.8: Esquema metodológico de la modelación de lagos por etapas en VIC, lago Ranco.	31
Figura 4.9: Series de tiempo resultantes de las bases de datos de Pre SWOT para el lago Ranco.	33
<hr/>	
Figura 5.1: Distribución del error de la validación del modelo usando 1000 iteraciones, Lago Pirihueico.	35
Figura 5.2: Distribución del error de la validación del modelo usando 1000 simulaciones, Lago Ranco.	36
Figura 5.3: Series de tiempo caudal observado y simulado periodo 2002-2019, KGE = 0.5, Río Huahum en la Frontera (10600001).	36
Figura 5.4: Series de tiempo caudal observado y simulado en el periodo 1998-2019, KGE = 0.46, Río Caunahue Camino a Llifén (10305001).	37
Figura 5.5: Series de tiempo caudal observado y simulado en el periodo 2003-2019, KGE = 0.44, Río Fuy en Desagüe Lago Pirihueico (10100002).	39
Figura 5.6: Series de tiempo caudal observado y simulado en el periodo 2002-2019, KGE = 0.36, Río Bueno en Bueno (10311001).	40
Figura 5.7: Gráfico de variación de KGE según parámetros del lago Pirihueico en el periodo 2003-2019, Río Fuy en Desagüe Lago Pirihueico (10100002).	41
Figura 5.8: Gráfico de variación de KGE según parámetros del lago Ranco en el periodo 2002-2019, Río Bueno en Bueno (10311001).	41
Figura 5.9: Gráficos serie de tiempo y variación estacional del nivel de agua del lago Pirihueico en el periodo 2003-2019.	42
Figura 5.10: Gráficos serie de tiempo y variación estacional del nivel de agua del lago Ranco en el periodo 2002-2019.	42
Figura 5.11: Gráficos de dispersión del nivel de agua observado vs. simulado para el lago Pirihueico (periodo 2003-2019) y lago Ranco (periodo 2002-2019).	43
Figura 5.12: Series de tiempo área superficial lago simulada, de base de datos Pre SWOT y del producto NDWI de Landsat 5 y 8, periodo 1998-2019, lago Ranco.	44
Figura 5.13: Series de tiempo área superficial lago simulada y del producto NDWI de Landsat 5 y 8, periodo 1998-2019, lago Pirihueico.	44

# Tabla de Tablas

Tabla 2.1: Fuentes de información remota para la estimación del nivel de agua y área superficial de lagos.	5
Tabla 3.1: Características cartas náuticas del SHOA.	8
Tabla 3.2: Características estaciones limnimétricas.	8
Tabla 3.3: Parámetros morfológicos de los lagos de estudio y de las cuencas en que se emplazan.	9
Tabla 3.4 Estaciones fluviométricas y meteorológicas señaladas con números (ID) en la Figura 3.1.	11
Tabla 3.5: Valores de KGE calibrados en DGA (2022).	20
Tabla 4.1: Archivo de parámetros de lago.	22
Tabla 4.2: Configuración archivo de parámetros de lago.	30
Tabla 5.1: Valores de KGE cuencas aguas arriba lagos.	38
Tabla 5.2: Valores de KGE y sus componentes para cada perfil de lago. En verde el perfil con mejor KGE.	38
Tabla 5.3: Valores parámetros del análisis de sensibilidad que maximizan el KGE.	42
Tabla 5.4: Indicadores estadísticos nivel de agua simulada vs. observada para los lagos de estudio.	43
Tabla 5.5: Indicadores estadísticos área superficial simulada vs. otras fuentes de información.	43
Tabla 5.6: Umbrales de NDWI y NDVI utilizados en el procesamiento de los productos de Landsat 5 y 8.	44



# Capítulo 1: Introducción

## 1.1. Motivación

En el año 2016 se inició el proyecto de actualización del Balance Hídrico Nacional (BHN), que tuvo por objetivo cuantificar la disponibilidad de recursos hídricos a nivel nacional incorporando el comportamiento de cinco cuencas piloto en el periodo base 1985-2015 para luego proyectar este comportamiento en el periodo 2030-2060 (DGA, 2017), metodología que se aplicó (con modificaciones) en cuencas de las distintas macrozonas del país. Para lograr lo anterior, se utilizó el modelo hidrológico Variable Infiltration Capacity VIC (Liang, X. et al., 1994) calibrado en cuencas con disponibilidad de información fluviométrica y en régimen cercano natural o poco intervenido.

Uno de los problemas que se presentó en dicho proyecto, y que motiva el presente trabajo de título, fue que la falta de registros de caudales en la mayoría de los lagos de Chile no permitió considerar la presencia de todos estos, incluyendo en la modelación sólo aquellos lagos con una estación fluviométrica directamente en su punto de descarga, lo que redujo a un total de ocho cuencas con presencia de lagos emplazadas en las macrozonas sur y austral del país (DGA, 2019a).

Los lagos, y las zonas de inundación estacional que los rodean, participan con exclusividad en dos procesos en la hidrología de una cuenca: 1) producen un retardo en la escorrentía de salida debido a su capacidad de almacenamiento, al mismo tiempo que pueden variar estacionalmente (i.e., de una temporada a otra) sus niveles de agua muy rápido, y 2) generan importantes flujos de salida mediante evaporación debido a su alto calor latente en comparación con zonas terrestres (Mendez, J. et al, 1998), lo que en conjunto convierten a los lagos en unidades desconectadas de la cuenca en los meses de primavera y verano. Debido al irreemplazable rol de los lagos en la hidrología de una cuenca, omitir o simplificar su presencia puede derivar en resultados sesgados o poco realistas y, por el contrario, la inclusión de lagos en la modelación “da lugar a una mejora considerable de los hidrogramas de caudales simulados” (Bowling & Lettenmaier, 2009).

En el presente trabajo de título se busca modelar cuencas hidrográficas controladas con presencia de lagos mediante el modelo hidrológico VIC (que cuenta con un módulo de lagos capaz de representar, entre otros procesos, la evaporación y el retardo en la escorrentía de lagos a través del balance de agua y energía) utilizando información del nivel del lago obtenida de imágenes satelitales u otras fuentes de información para determinar los parámetros del módulo de lagos del modelo (nivel de agua de vertedero, ancho de desagüe, entre otros). En específico, este trabajo se centra en el estudio de las cuencas Río Fuy en Desagüe Lago Pirihueico y Río Bueno en Bueno, en las que se localizan los lagos Pirihueico y Ranco respectivamente.

Además, se espera estimar el hidrograma de salida de estas cuencas y validar el desempeño predictivo del modelo mediante la comparación del hidrograma con los datos fluviométricos observados. En esta misma línea, se considera evaluar productos satelitales que proporcionen información del área superficial del lago (o espejo de agua) como otra forma de validar el desempeño del modelo, en específico el producto NDWI (cada 32 días) de los satélites Landsat 5 y 8 y la base de datos Pre SWOT que fue construida con información satelital.

Finalmente, se incluye un análisis de incertidumbre del hidrograma de salida modelado mediante la sensibilización de parámetros referidos al módulo de lagos de VIC, así como una comparación de los

resultados respecto a series de datos recuperados mediante técnicas de percepción remota. Lo anterior, a modo de sugerir estrategias que permitan extender la metodología propuesta a cuencas con presencia de lagos y con escasa o nula información fluviométrica.

## **1.2. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo general**

Implementar un modelo hidrológico que permita representar el efecto de lagos en cuencas utilizando productos satelitales y/u otras fuentes de información para determinar los parámetros de lagos necesarios para la modelación, como los son el nivel de agua de vertedero y el ancho de desagüe.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

1. Estimar el hidrograma de salida de cuencas con lagos, y de las respectivas cuencas aportantes a estos lagos, a nivel diario y en periodos seleccionados, mediante el modelo, y validar el hidrograma mediante la comparación con los datos fluviométricos disponibles.
2. Evaluar el potencial de uso del producto NDWI (cada 32 días) de los satélites Landsat 5 y 8 en el periodo 1995-2019 y de la base de datos Pre SWOT en el periodo 2000-2019 para estimar el cambio temporal del área superficial en lagos.
3. Evaluar la sensibilidad en la estimación del hidrograma de salida del sistema mediante la variación de parámetros que definen el módulo de lagos del modelo.

## **1.3. Organización del informe**

Las siguientes páginas del documento se organizan como se detalla a continuación:

En el Capítulo 2, se presentan los antecedentes bibliográficos sobre el comportamiento y la hidrología de lagos y se describen los principales conceptos relacionados con la modelación hidrológica y la teledetección.

En el Capítulo 3 se caracteriza la zona de estudio desde un enfoque fisiográfico, climático e hidrológico, además de describir la hidrografía de los lagos y su variación en el nivel de agua en las últimas décadas.

En el Capítulo 4, se describe detalladamente la metodología utilizada para llevar a cabo el estudio, desde la configuración del modelo VIC, pasando por los métodos de evaluación del desempeño y sensibilización del modelo, hasta el trabajo con el producto NDWI de los satélites Landsat 5 y 8. Mientras que el Capítulo 5 presenta los resultados obtenidos siguiendo la metodología planteada mediante distintos tipos de gráficos e índices estadísticos que comparan lo simulado con datos observados y productos satelitales.

En el Capítulo 6 se discuten las implicaciones de los resultados obtenidos en relación a la estimación del hidrograma de salida en lagos utilizando el modelo VIC. Y finalmente, en el Capítulo 7, se presentan las principales conclusiones del estudio y se hacen recomendaciones para futuras investigaciones en esta área.

# Capítulo 2: Marco teórico y disponibilidad de información

En el presente capítulo se realiza la revisión bibliográfica de la hidrología y dinámica de lagos, desde su papel en la hidrología de cuencas hasta la descripción de metodologías utilizadas para calcular su caudal de salida. En consiguiente con esto, se definen y describen los modelos hidrológicos y la teledetección, herramientas utilizadas para el cálculo del caudal de salida y variables relacionadas.

## 2.1. Dinámica hidrológica de lagos

Los lagos y sus zonas de inundación tienen un efecto a nivel local sobre el clima y la hidrología. Por un lado, moderan las temperaturas extremas de la región donde se emplazan durante todo el año, y aumentan la cobertura de nubes y precipitación sobre el lago en invierno para luego disminuir en verano debido a la estabilidad atmosférica que genera el agua un poco más fría (Scott & Huff, 1996). Por otro lado, debido a su capacidad de almacenamiento, los lagos controlan aspectos del balance hídrico de la cuenca atenuando y retrasando la escorrentía de salida y aumentando la evaporación (Bowling & Lettenmaier, 2009) y, en menor medida, provocando grandes descargas que pueden resultar en inundaciones aguas abajo (Zajac, et al., 2017).

Sin embargo, así como generan un impacto, también son especialmente sensibles a las condiciones climáticas e hidrológicas. Así, nivel de agua y volumen de lagos son susceptibles en primer lugar a la precipitación, en segundo lugar a la evaporación, temperatura, presión superficial, viento y radiación y, en tercer lugar, al agua subterránea y superficial (Cretaux, et al., 2011). Además, las características morfológicas de los lagos mismos, i.e. profundidad media, área superficial, volumen, línea de costa y modificaciones antropológicas de esta última, pueden influir significativamente en el nivel de agua (Crétau, et al., 2016; Wantzen, Junk, & Rothhaupt, 2008), por ejemplo, lagos angostos, poco profundos y con orillas extensas y de baja profundidad son más sensibles a los cambios meteorológicos.

De acuerdo con Quinn (2002), los lagos fluctúan su nivel de agua a escalas de tiempo seculares, estacionales, episódicas y de marea, siendo estas últimas poco significativas (menos de 10 cm). La variación secular o interanual es el resultado de cambios a largo plazo de las variables climáticas de precipitación y temperatura, razón por la cual es recomendable trabajar con largos periodos de tiempo al momento de estudiar la dinámica de lagos. La variación estacional se debe a los cambios estacionales de los flujos de entrada y salida del lago, como la precipitación, evaporación y escorrentía tributaria; y, finalmente, las variaciones episódicas ocurren producto de eventos esporádicos como tormentas.

El caudal de salida de lagos puede ser estimado mediante la formulación de un modelo conceptual basado en el balance de agua en el lago, metodología seguida especialmente cuando hay limitaciones en la disponibilidad de información registrada, como es el caso de Dinka et al. (2014). O también, puede ser estimado mediante la utilización de **modelos hidrológicos**. Por ejemplo, en Setegn et al. (2010) aplican el modelo SWAT en la cuenca del Lago Tana, Etiopía, donde se encuentra el lago del mismo nombre, para estimar su caudal de salida y, posteriormente, el cambio en el almacenamiento de este mediante un balance de agua en el lago. Otro ejemplo es el modelo VIC, capaz de representar el efecto tardío en la escorrentía de los lagos, y que en Bowling & Lettenmaier (2009) es utilizado para estimar, entre otras variables, el caudal de salida de las cuencas del río Kuparuk y Putuligayuk (Alaska) que presentan varios cuerpos lacustres.

En esta misma línea, hoy en día la **teledetección** es ampliamente utilizada para la obtención de variables del balance de agua de lagos (Velpuri, N. et al., 2012; Dembélé, et al., 2020), ya sea para su aplicación en modelos conceptuales como para estimar inputs de modelos hidrológicos. Un ejemplo de lo anterior es el estudio realizado por Velpuri, N. et al. (2012), quienes obtienen la evapotranspiración del índice NDWI (*Normalized Difference Water Index*, o índice diferencial de agua normalizado en español) derivado del radar AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), la altimetría de la zona del radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), entre otras variables, para obtener la variación del nivel de agua del lago Turkana, en Kenia, mediante balance de agua. Crétaux, et al. (2016) realiza una metodología de enfoque multi satelital para obtener esta misma variable de forma directa en el lago Ziling, en China; para ello, utiliza los satélites con altímetros TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2, ERS2, Envisat, SARAL/AltiKa y CryoSat-2 con los que se obtiene el nivel de agua promedio sobre una superficie de referencia. Utilizar múltiples satélites permite calcular el sesgo relativo que existe entre cada satélite, el que viene dado por dos razones: sesgo instrumental del altímetro y diferencias en las trayectorias que siguen estos satélites sobre el lago.

## 2.2. Modelos Hidrológicos

Un modelo hidrológico es una representación simplificada de los flujos de agua dentro de uno o más sistemas hidrológicos. Se comienzan a utilizar de manera rudimentaria desde el siglo XIX y se digitalizaron en la década de 1960 (Jorquera, E. et al., 2012), donde surge el modelo Stanford Watershed Model (SWM) de Crawford y Linsley (Crawford & Linsley, 1966), el que estima el caudal a partir de la precipitación y otras variables meteorológicas medidas. En las siguientes décadas, los modelos hidrológicos fueron incorporando la variabilidad espacial en las forzantes y respuestas, la calidad del agua, el transporte de sedimentos y contaminantes, la interacción entre el agua superficial y subterránea, entre otros avances (Donigian & Imhoff, 2006). Así, sus aplicaciones se extienden a la predicción de caudales, la extensión de registros de caudales, el diseño, planificación de obras, por mencionar algunas.

La evolución de esta tecnología se debe principalmente a la mayor disponibilidad de datos distribuidos espacialmente, al uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Jorquera, E. et al., 2012) y debido a la necesidad de herramientas que ayuden en el análisis y manejo de recursos hídricos (Donigian & Imhoff, 2006).

La componente de caudal es utilizada para la calibración y validación de los modelos hidrológicos, mediante la comparación con el caudal monitoreado (Pandi, Saravanan, & Kuppusamy, 2021). De acuerdo con Gayathri et al. (2015), existen varios desafíos en cuanto a la precisión en los resultados estimados por los modelos hidrológicos. Entre ellos, la necesidad de utilizar diferentes métodos para evaluar el desempeño del modelo, como, comparar las predicciones del modelo con datos observados o, probar el modelo bajo distintos escenarios. Realizando esta metodología, se puede comprender el funcionamiento del modelo e identificar nichos de mejora.

Entre los modelos hidrológicos que se ocupan en la actualidad, se encuentra el modelo de Capacidad de Infiltración Variable (VIC) utilizado en el proyecto de actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017; DGA, 2018; DGA, 2019a; DGA, 2019b; DGA, 2022, en prensa).

## 2.3. La teledetección

La teledetección, o percepción remota, es la técnica de adquisición de datos de un objeto sin estar en contacto con este (Lintz & Simonett, 1976). Incluye todos los métodos de obtención de imágenes, u otra forma de registros electromagnéticos, de la superficie terrestre desde la distancia, así como el posterior procesamiento (White, 1977). Funciona mediante la detección y medición de ondas electromagnéticas reflejadas o emitidas por el cuerpo de interés por un sensor (Campbell & Wynne, 2011), las que son procesadas para finalmente obtener información interpretable. Entre los métodos de teledetección se encuentran los radares y sensores, los que se montan a bordo de satélites, transbordadores espaciales o aviones.

Como se menciona anteriormente, la adquisición de datos de forma remota se ha presentado en las últimas décadas como una alternativa ampliamente utilizada en el área de la hidrología. En esta línea, la Tabla 2.1 detalla algunas fuentes remotas de información con las que se puede estimar el nivel de agua y área superficial en lagos.

*Tabla 2.1: Fuentes de información remota para la estimación del nivel de agua y área superficial de lagos.*

<b>Variables</b>	<b>Misión y fuente remota</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Rango temporal</b>	<b>Cobertura espacial</b>	<b>Resolución espacial</b>
<b>Nivel de agua</b>	TOPEX/Poseidon, satélite con radar altimétrico	10 días	1992-2005	Principalmente aguas oceánicas	~27 km
	Jason-1, 2 y 3, satélite con radar altimétrico	10 días	2002-presente	Principalmente aguas oceánicas	~4km
	ERS-2, satélite con sensor altimétrico	35 días	1995-2011	Entre 42.4° lat. Norte - 41.3° lat. Sur	26 m x 6-30 m
	Envisat, satélite con radar altimétrico	35 días	2002-2011	Entre 68.5° lat. Sur - 68.5° lat. Norte	1 km
	CryoSat-2, satélite con radar altimétrico	369 días	2010-presente	Zonas polares	250 m
	SRTM, radar altimétrico	-	2000	Global	~90 m
	Sentinel-3, sensor del satélite Copernicus	27 días	2015-2016	Entre 56° lat. Sur - 82.8° lat. Norte	300 m
	SWOT, satélite	21 días	2022-presente	Entre 78° lat. Sur - 78° lat. Norte	250 m
<b>Área superficial</b>	Producto SR, sensor MODIS, satélites Aqua y Terra	16 días	2000-presente	Global	250 m
	Producto NDWI, Landsat 5, 7, 8	32 días	1984-2021	Tierras continentales globales	30 m
	SWOT	21 días	2022-presente	Entre 78° lat. Sur - 78° lat. Norte	250 m

La Tabla 2.1 evidencia que actualmente existen distintas fuentes de teledetección para la medición del

nivel de agua y área superficial en cuerpos de agua continentales. En el primer caso, en su mayoría se trata del nivel de agua con respecto a una superficie de referencia (Crétau, et al., 2016), por lo tanto, no entregan información de la profundidad de lagos. Por otra parte, satélites como Jason-1, 2 y 3 y TOPEX/Poseidon se especializan en el nivel de agua de océanos, sin embargo, también han sido utilizados para la obtención del nivel de agua en lagos (Crétau, et al., 2016; Velpuri, N. et al., 2012) incluyéndolos en metodologías de enfoque multi satelital o de múltiples fuentes para considerar el sesgo de las mediciones en las estimaciones de la variable, tal como se explica en la sección anterior 2.1.

Es especial el caso de la misión satelital SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*), que toma imágenes bidimensionales del nivel de agua de lagos, permitiendo cuantificar la profundidad y el área superficial de sistemas lacustres y ríos (Wilson et al., 2015). El satélite fue lanzado a órbita a finales del 2022 lanzó a orbita su satélite (NASA, 2022).

En línea con lo anterior, la base de datos Pre SWOT, que cuenta con series de tiempo de nivel de agua y área para diversos lagos y ríos del mundo, fue construida en la “fase de recolección de datos científicos” de la misión SWOT con el objetivo de anticipar las estimaciones que SWOT entregará. Fue construida por Pascual et al. (2019) a partir de observaciones in situ de sensores y muestreo, y su posterior modelación en el modelo WMOP,

Entre las fuentes remotas utilizadas para estimar el área superficial de cuerpos de agua se encuentran aquellas que permiten cuantificar el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (Gao, 1996), o NDWI por sus siglas en inglés, que corresponde a un índice obtenido por álgebra de bandas espectrales que resalta el contenido de agua líquida en la imagen. Los satélites Aqua y Terra, con su sensor MODIS, obtienen el NDWI del producto *Surface Reflectance* con una resolución temporal diaria, y los satélites Landsat 5 y 8 lo obtienen del producto NDWI a distintas resoluciones temporales, diaria, cada 8 días, cada 32 días y anual.

# Capítulo 3: Zona de estudio y Datos

El trabajo descrito en este informe gira en torno al estudio de los lagos Pirihueico y Ranco y a las cuencas en las que se emplazan, Río Fuy en Desagüe Lago Pirihueico (10100002) y Río Bueno en Bueno (10311001) respectivamente. La elección de estos sistemas no fue arbitraria, por el contrario, consistió en la búsqueda de lagos con control fluviométrico en entrada(s) y salida, que no tuviesen intervención antrópica en su régimen y que contaran con la información suficiente para obtener los parámetros necesarios para la modelación de lagos en VIC. Para más información sobre la selección del área de estudio, ver Anexo A.

En este capítulo se enlistan y describen los datos utilizados para caracterizar el dominio de estudio, los que también son parte importante de la metodología de este trabajo. Luego, se aborda la caracterización de las cuencas y sus respectivos lagos desde un enfoque fisiográfico, climático e hidrológico, incluyendo información sobre la hidrografía de los lagos y los cambios en el nivel de agua que han tenido en las últimas décadas. Finalmente, se introduce la última etapa del BHN y su implicancia en el presente estudio.

## 3.1. Descripción de los datos utilizados

El comportamiento climático de las cuencas en estudio se examina utilizando como referencia el producto grillado CR2MET v2.5 (Boisier et al., 2018), que contiene información diaria en el periodo 1981-2020 de precipitación y temperatura media y extremas (i.e., máxima y mínima) para el territorio de Chile continental, espacialmente distribuidos a 0,05° latitud-longitud.

El producto de precipitación CR2MET fue construido en base a observaciones en estaciones y al reanálisis atmosférico ERA5 (Hersbach et al., 2020), un producto de gran escala (grillas de 30km) que utiliza modelos estadísticos para traducir la precipitación a escala regional. Por su parte, el producto de temperatura media y temperaturas extremas fue construido a partir de ERA5, información local de estaciones e imágenes satelitales del producto MOD11 (*MODIS Land Surface Temperature and Emissivity*). La versión 2.5 del producto fue construida para el estudio DGA (2022).

De esta forma, se cuenta con información meteorológica espacialmente distribuida y continua en un periodo de tiempo que permite el análisis de patrones climáticos y, asimismo, tendencias climáticas representativas de la totalidad de la cuenca.

El desempeño del producto en las zonas de interés es previamente comparado con las estimaciones de precipitación anual y mensual de las estaciones meteorológicas que se encuentran dentro de la zona de estudio y, adicionalmente, contrastado con otros productos de precipitación disponibles en el explorador de precipitaciones Mawün (<https://mawun.cr2.cl/>). Para más detalles sobre los resultados obtenidos de esta comparación, ver Anexo B.

Por otra parte, la hidrografía de los lagos Pirihueico y Ranco se conoce gracias a las cartas náuticas desarrolladas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). Estas cartas, a disposición pública en la Tienda Virtual del SHOA (<https://tiendavirtual.shoa.cl/>), detallan, entre otros aspectos, la superficie del terreno cubierto por el espejo de agua del lago de interés (i.e., batimetría). En la Tabla 3.1 a continuación, se muestran las características de las cartas:

Tabla 3.1: Características cartas náuticas del SHOA.

Lago	Escala	Datum	Año levantamiento hidrográfico	Año última edición
Pirihueico	1:25.000	WGS-84	2005	2008
Ranco	1:50.000	WGS-84	2002	2003

FUENTE: Cartas náuticas de papel de los lagos y Tienda virtual del SHOA.

Los cambios en el nivel de agua de los lagos se obtienen de los registros limnimétricos asociados a estaciones administradas por la DGA, las que miden el nivel de agua diario en metros (m) en un limnómetro, o regla graduada en centímetros, de cota y coordenadas conocidas. Dichos registros pueden consultarse de manera libre y gratuita en el sitio web de la DGA (<https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/>). La Tabla 3.2 resume algunas de las principales características de las estaciones de interés.

Tabla 3.2: Características estaciones limnimétricas.

Lago	Código BNA	Nombre estación	Altitud	Ubicación	Años con información
Pirihueico	10100007-9	Lago Pirihueico (LM)	600 (msnm)	39:52:00 S, 71:53:00 O	1998 - 2022
Ranco	10307005-8	Lago Ranco (LM)	70 (msnm)	40:18:00 S, 72:28:00 O	1995-2019

FUENTE: Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea de la DGA.

Finalmente, las cuencas de desagüe de los lagos de estudio son delimitadas usando archivos de elevación DEM (*Digital Elevation Model*) de la misión SRTM, los que son trabajados en el software GRASS GIS. Estos archivos pueden ser descargados de forma gratuita en la plataforma EarthData Search (<https://search.earthdata.nasa.gov/>). Las cuencas, en formato *shapefile*, también permiten obtener la porción de cuenca por pixel de grilla del producto CR2MET.

### 3.2. Caracterización fisiográfica de cuencas y lagos y disponibilidad de información hidrometeorológica

El lago Pirihueico se localiza en la región de los Ríos a los 39,94° latitud Sur y 71,78° longitud Oeste. De origen glaciar, se emplaza en un valle cordillerano a una altura de 603 msnm siguiendo una morfología estrecha y alargada (ver mapa A Figura 3.1), de 26 km de longitud máxima y 2,2 km de ancho medio máximo, lo que da origen a su nombre, que en mapuzugun quiere decir “agua en forma de culebra” (DGA, 2000). El área de desagüe del lago (área tributaria al lago más área del lago) es de 1494,67 km<sup>2</sup>, y es alimentado principalmente por el río Huahum, proveniente de Argentina, el que verte sus aguas al lago en la localidad de Puerto Pirihueico. Es en este extremo donde el lago alcanza su mayor profundidad, de aproximadamente 144 m. El efluente del lago Pirihueico es el río Fuy en la comuna de Puerto Fuy, el que tiene en el punto de desagüe un ancho de caja de 81,2 m. El lago alcanza una línea de costa de 67,8 km y un área de alrededor de 31,2 km<sup>2</sup>.

El lago Pirihueico forma parte de la cuenca Río Fuy en Desagüe Lago Pirihueico (código BNA: 10100002), cuya estación fluviométrica se ubica justo en el punto de desagüe del lago (39,87° latitud Sur, 71,89° longitud Oeste), por consecuencia, la cuenca controlada es coincidente con la cuenca de desagüe del lago. Más de la mitad del área de la cuenca controlada se encuentra en territorio argentino, como se muestra en el mapa A de la Figura 3.1. Esta hoya hidrográfica a su vez forma parte de la cuenca Río



Valdivia (código BNA: 101, ver mapa B, Figura 3.1), la que se caracteriza por presentar una cadena de 8 lagos, con origen en el lago argentino Lacar y término en el lago Riñihue, el que evacúa sus aguas en el río San Pedro que, aguas abajo y junto con aguas provenientes de otros sectores de la cuenca, desemboca al mar en la bahía de Corral, Valdivia con el nombre de río Valdivia.

El lago Ranco se sitúa igualmente en la región de los Ríos, poco más al oeste del comienzo de la Cordillera de los Andes a los 40,23° latitud Sur y 72,40° longitud Oeste, colindando con los centros poblados de Futrono, en su ribera norte, y Lago Ranco, en su ribera sur. Es de origen glaciar, se ubica a los 72 msnm y abarca un área de 431,96 km<sup>2</sup> y un perímetro de 206 km aproximadamente, alcanzando una profundidad de 200 m. En el lago se encuentran varias islas e islotes entre las que destacan por su tamaño las islas Huapi y Culcuma (ver mapa A Figura 3.1). El área de desagüe al lago es de 3554,86 km<sup>2</sup>, siendo sus principales afluentes los ríos Caunahue, Calcurrupe y Nilahue, que cuentan con control fluviométrico cerca de su desembocadura. El río Bueno es el efluente del lago Ranco, que posee un ancho de caja de 69,9 m en el punto de desagüe.

El lago se emplaza en la cuenca Río Bueno en Bueno (código BNA: 10311001), que colinda al norte con la cuenca Río Fuy en Desagüe Lago Pirihueico. El control fluviométrico de la cuenca se encuentra aproximadamente a 43 km aguas abajo del punto de desagüe del lago a 45 msnm, razón por la cual la cuenca controlada tiene una mayor área que la de desagüe del lago, igual a 4014,38 km<sup>2</sup>. Esta particularidad en la fisiografía de la cuenca se puede observar en el mapa A Figura 3.1. La cuenca Río Bueno en Bueno pertenece a su vez a la cuenca Río Bueno (código BNA: 103, ver mapa B Figura 3.1), que abarca su dominio hasta la región de Los Lagos. Sus aguas desembocan en el océano a 130 km aguas abajo del lago Ranco, siendo este el lago más extenso de la cuenca.

La Tabla 3.3 resume los parámetros morfológicos de los lagos y las cuencas a las que pertenecen. Debajo de esta, la Figura 3.1 muestra la disposición geográfica de los lagos y cuencas de estudio, así como de los distintos controles disponibles en la zona de estudio, los que se listan en la Tabla 3.4. Notar que la estación de ID 1 no se encuentra dentro de la zona de estudio, sin embargo, esta se destaca puesto que se utilizará en la metodología.

Tabla 3.3: Parámetros morfológicos de los lagos de estudio y de las cuencas en que se emplazan.

Parámetro morfológico	Lago Pirihueico	Lago Ranco
Perímetro o línea de costa (km) *	67,85	206,43
Área superficial (km <sup>2</sup> ) *	31,29	431,96
Volumen (km <sup>3</sup> ) *	1,8	51,2
Profundidad máxima (m) *	144	200
Profundidad media (m)*	58,29	127,50
Cota (msnm) *	603	72
Ancho salida (m) **	81,2	69,9
Área cuenca controlada (km <sup>2</sup> ) ***	1494,67	4014,38
Área cuenca de desagüe (km <sup>2</sup> ) ****	1494,67	3554,86

(\*) Digitalización de cartas náuticas del SHOA, (\*\*) estimación mediante Google Earth Pro, (\*\*\*) delimitaciones de cuencas empleadas en el estudio DGA (2022), (\*\*\*\*) cuencas delimitadas a partir de DEM de SRTM.

**MAPA DE GEOLOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO  
Y DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN  
Región de Los Ríos, Región de Los Lagos - Chile**

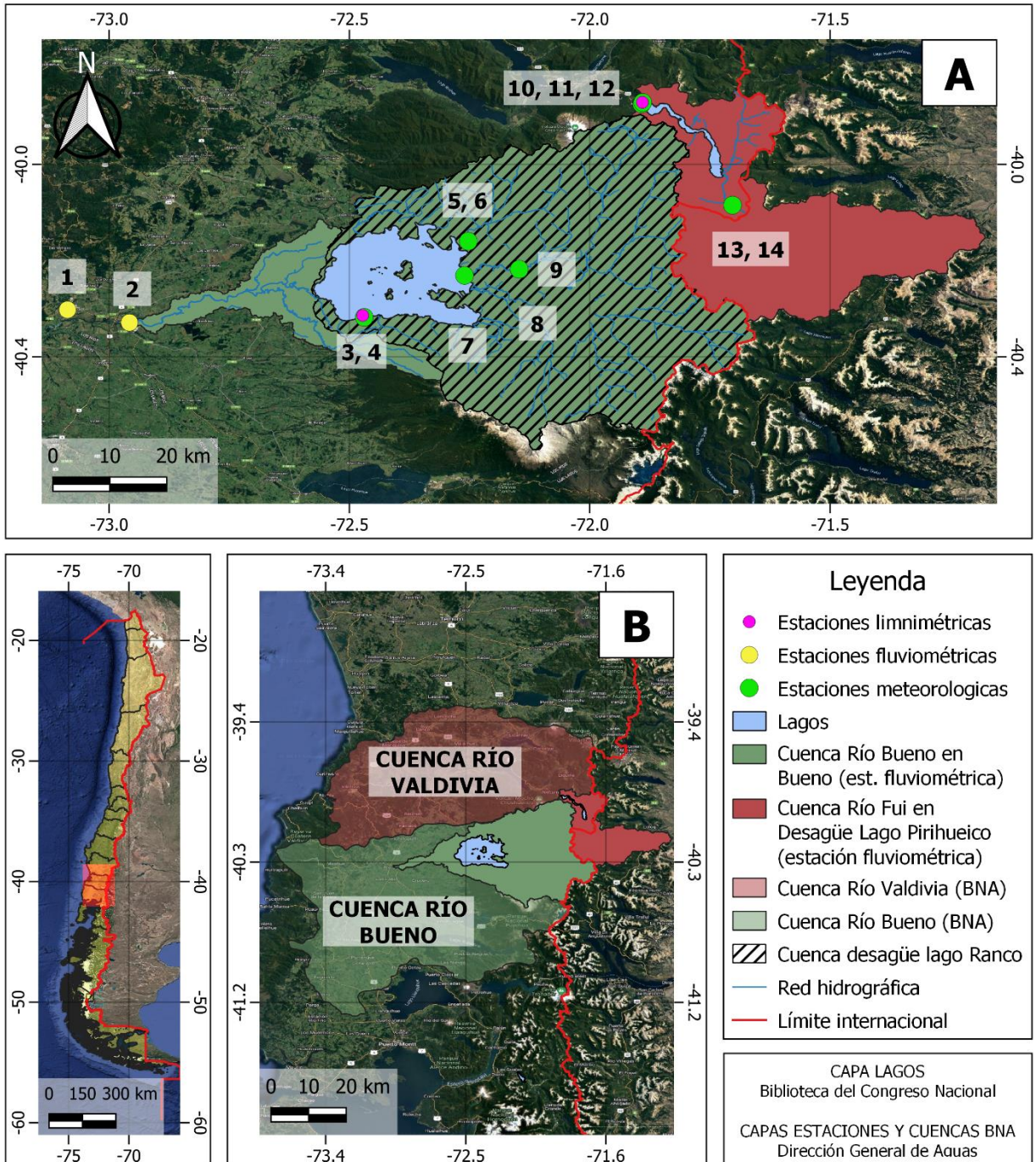


Figura 3.1: Mapa de geocalización de la zona de estudio y ubicación de estaciones. Los números indicados en el panel A corresponden a un identificador (ID) asociado a las estaciones fluviométricas y meteorológicas listadas en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Estaciones fluviométricas y meteorológicas señaladas con números (ID) en la Figura 3.1.

ID	Tipo	Código BNA	Nombre estación	Años con información
1	Fluviométrica	10313001	Río Llollehue en La Unión	2012-2020
2	Fluviométrica	10311001	Río Bueno En Bueno	2002-2019
5	Fluviométrica	10305001	Río Caunahue Camino A Llifén	1997-2019
7	Fluviométrica/ Meteorológica	10304001	Río Calcurrupe En Desembocadura	1986-2019/ 2013-2017
8	Fluviométrica	10306001	Río Nilahue En Mayay	1987-2020
10	Fluviométrica/ Meteorológica	10100002	Río Fuy En Desagüe Lago Pirihueico	2003-2019/ 2003-2019
13	Fluviométrica	10100006	Río Huahum En La Frontera	2002-2019
3	Limnimétrica	10307005	Lago Ranco (LM)	1995-2019
11	Limnimétrica	10100007	Lago Pirihueico (LM)	1998 - 2022
4	Meteorológica	10307001	Lago Ranco	1979-2018
6	Meteorológica	10305002	Caunahue	2011-2019
9	Meteorológica	10304002	Lago Maihue	1979-2019
12	Meteorológica	10100005	Pirihueico en Pto. Fuy	1999-2019
14	Meteorológica	10100004	Pirihueico en Pirihueico	1998-2019

### 3.3. Caracterización climatológica

En primera instancia, se analiza la estacionariedad de la precipitación y temperatura para ambas cuencas, Río Fuy en Desagüe Lago Pirihueico y Río Bueno en Bueno, mediante la descomposición de los datos agregados mensualmente en sus componentes de tendencia, estacionalidad y residuo (o componente aleatoria de la serie). Dado que los resultados son análogos para ambas cuencas, a modo de ejemplo, en la Figura 3.2 y Figura 3.3 se muestran el caso de la cuenca Río Bueno en Bueno.

Tanto para la precipitación como para la temperatura se observa una marcada estacionalidad con valores máximos en los meses de invierno (junio a septiembre) para la primera variable y en verano (diciembre a marzo) para la segunda. La curva de tendencia de la temperatura muestra una leve trayectoria creciente, la que se observa mejor comparando los *peaks* de temperatura (que van en aumento), llegando a valores históricos en el 2020. Sin embargo, esta última observación no forma parte de un patrón global, por lo que no se puede concluir que forme parte de la tendencia; no así los ciclos de entre 3-5 años (aumento y disminución cíclica de la temperatura) que pueden indicar potencialmente una tendencia sistemática. Siguiendo el mismo razonamiento con la precipitación, se observa una notoria disminución del mínimo anual cada 5 años aprox. manteniéndose dentro de cada ciclo una variación interanual mucho más leve (dos o tres veces menos variación); no se puede concluir sobre la trayectoria general de la tendencia.

### Precipitación mensual Río Bueno en Bueno Periodo 1981-2019

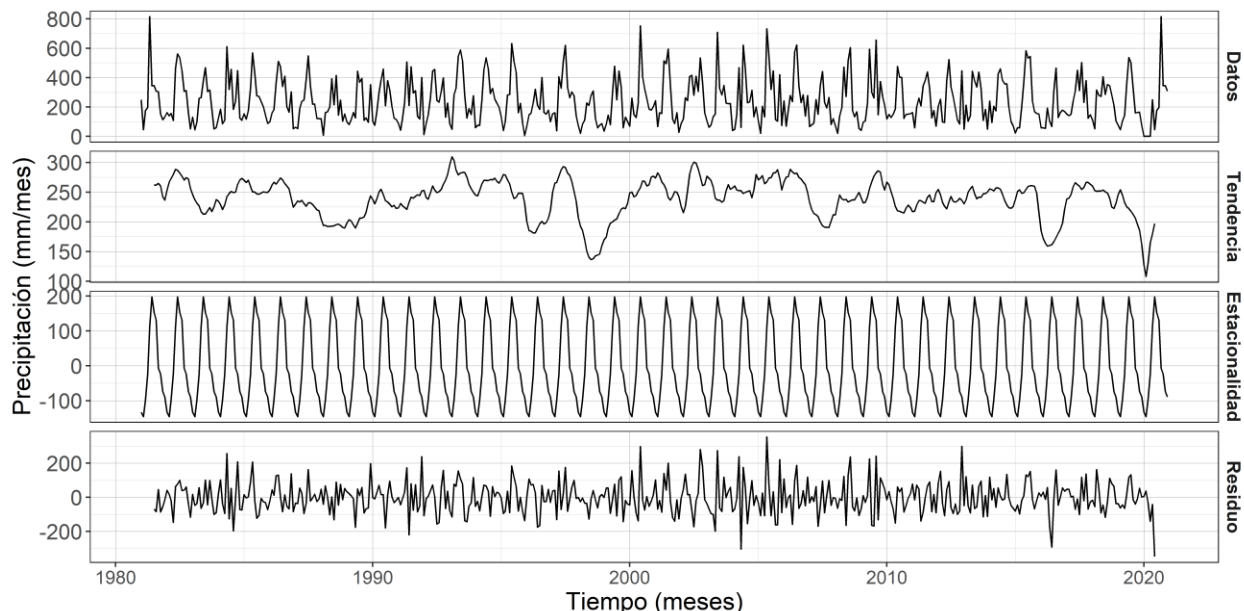


Figura 3.2: Descomposición de la precipitación mensual, Río Bueno en Bueno.

### Temperatura media promedio mensual Río Bueno en Bueno Periodo 1981-2019

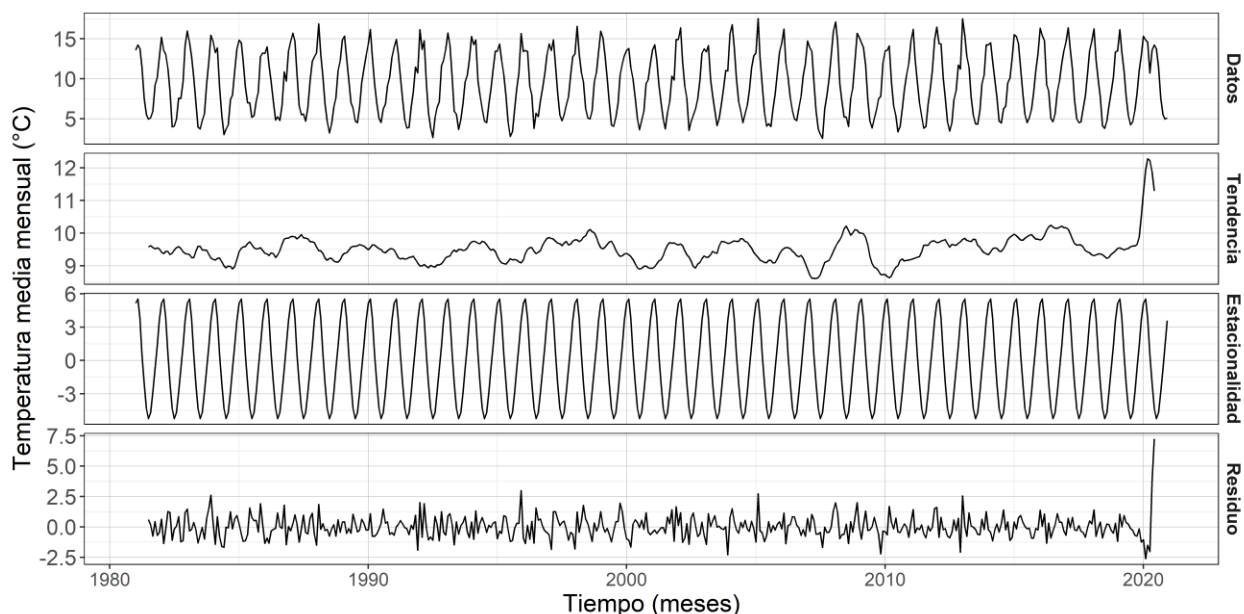


Figura 3.3: Descomposición de la temperatura media promedio mensual, Río Bueno en Bueno.

En forma complementaria a la descomposición estadística de las series de valores mensuales, se presenta mediante gráficos de cajas (*boxplots*) los patrones de variación estacional de la precipitación (Figura 3.4) y temperatura media (Figura 3.5) para ambas cuencas. La precipitación promedio anual en el periodo 1981-2019 es de 2912 (mm/año) para la cuenca Río Fuy en Desagüe Lago Pihueico y de 2882 (mm/año) para Río Bueno en Bueno, mientras que para el trimestre de invierno (julio-septiembre) la precipitación tiene un promedio de 1033 y 996 mm respectivamente, por lo tanto, para ambas cuencas en invierno cae un 35% de la precipitación anual. En cuanto a la temperatura media, el promedio anual



en el periodo de estudio es de 7,5 y 9,5 °C para Río Fuy en Desagüe Lago Pirihueico y Río Bueno en Bueno respectivamente, alcanzando la máxima en el mes de febrero con un valor de 14,5 y 15,5 °C aprox. y la mínima en julio de alrededor de 1,5 y 4°C respectivamente.

Además, se verifica el patrón estacional observado en la descomposición estadística de las series de datos asociadas a ambas variables, donde para los meses de mayor valor (mayo-julio para la precipitación, enero-marzo para la temperatura) la dispersión de los datos aumenta, aunque sin duda para la precipitación se observa una alta dispersión mensual durante todo el año. En general, el comportamiento de las variables para ambas cuencas es muy similar, probablemente debido a que son colindantes.

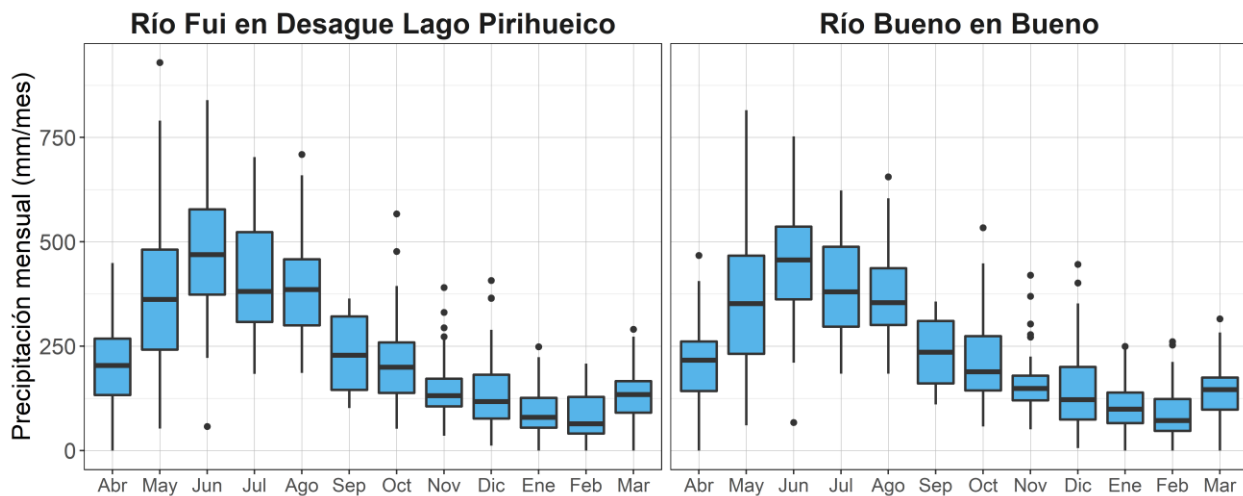


Figura 3.4: Variación estacional de la precipitación mensual para ambos sistemas en el periodo 1981-2019. Los bloques incluyen los valores entre 25 y 75% de probabilidad de excedencia y la línea negra en su interior definen la mediana.

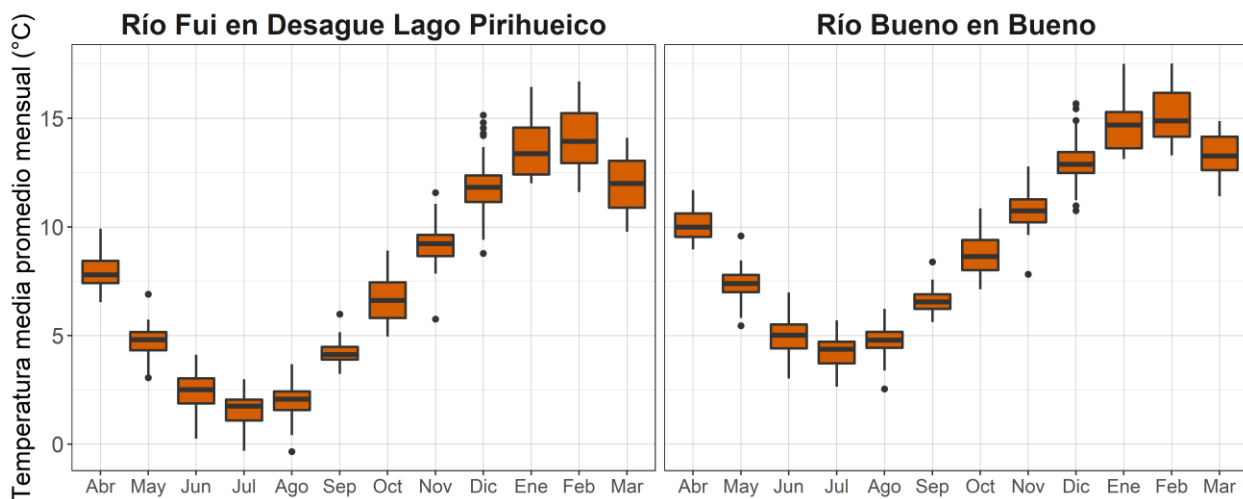


Figura 3.5: Variación estacional de la temperatura media promedio mensual para ambos sistemas en el periodo 1981-2019. Los bloques incluyen los valores entre 25 y 75% de probabilidad de excedencia y la línea negra en su interior definen la mediana.

Complementario al patrón de variación estacional concentrado a nivel cuenca, también resulta

interesante conocer la variación estacional espacialmente distribuida (i.e., pixel a pixel). En la Figura 3.6 y Figura 3.7 se muestra el patrón mensual promedio de precipitación y temperatura media en el periodo 1981-2019 espacialmente distribuido a 0,05° latitud-longitud para Río Bueno en Bueno.

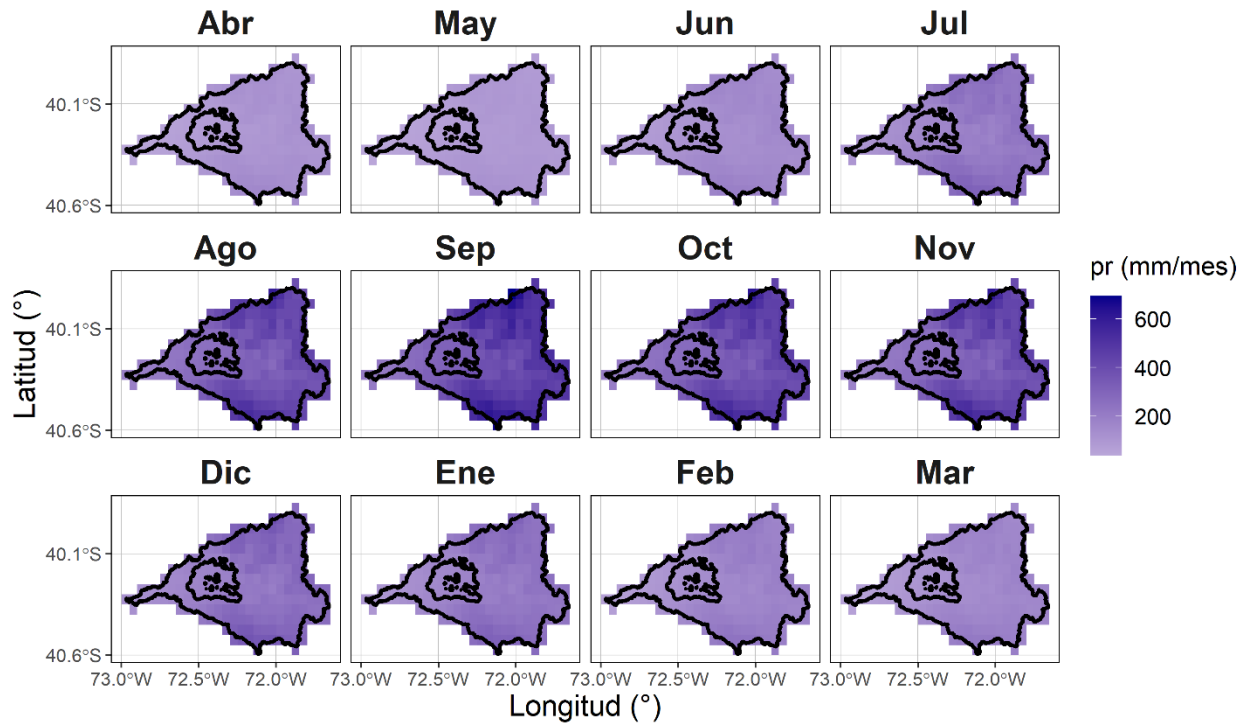


Figura 3.6: Variación espacial mensual de la precipitación en el periodo 1981-2019, cuenca Río Bueno en Bueno. El lago Ranco se muestra en el interior de la cuenca.

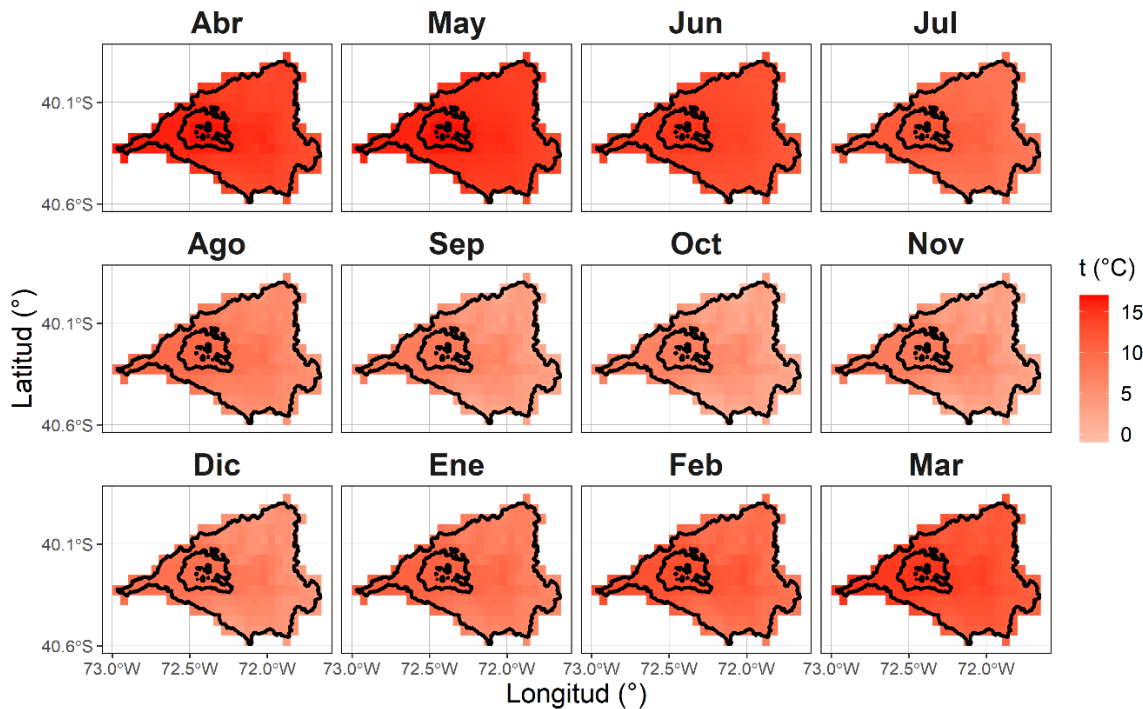


Figura 3.7: Variación espacial mensual de la temperatura media en el periodo 1981-2019, cuenca Río Bueno en Bueno.

La precipitación se observa bien distribuida en los meses de verano y otoño, además, se observa un aumento más pronunciado hacia el este. Se nota también que la precipitación aumenta hacia los límites de la cuenca, posiblemente por el efecto orográfico. Con estos dos comportamientos, la zona centro-oeste de la cuenca –que incluye al lago– no supera los 400 (mm/mes) mientras que las zonas de mayor altitud llegan a las 600 (mm/mes). En cambio, la precipitación de la cuenca asociada al lago Pihueico, aumenta de forma más homogénea en los meses de invierno y primavera, lo que se puede observar al comparar la variación espacial anual de la precipitación (Figura 3.8). De todas formas, no se debe olvidar que la cuenca del lago Pihueico es casi tres veces más pequeña que la del lago Ranco, por lo que esta homogeneidad espacial puede atribuirse a la escala espacial del dominio.

La temperatura muestra cambios bien distribuidos espacialmente durante todo el año, sin embargo, en la Figura 3.9 se observa que en las zonas de menor precipitación aumenta la temperatura, llamando la atención nuevamente que el lago Ranco se cuente dentro de estas zonas.

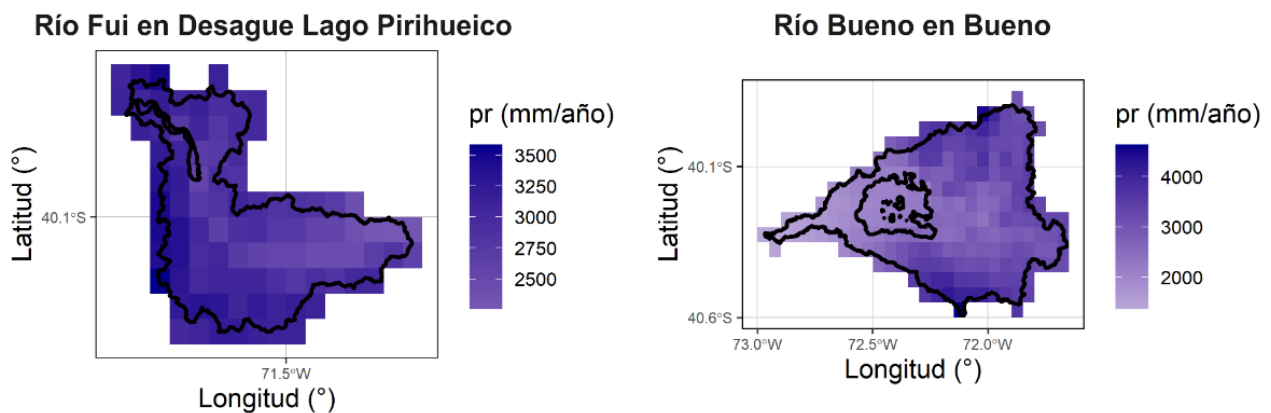


Figura 3.8: Variación espacial de la precipitación media anual en periodo 1981-2019 para ambos sistemas.

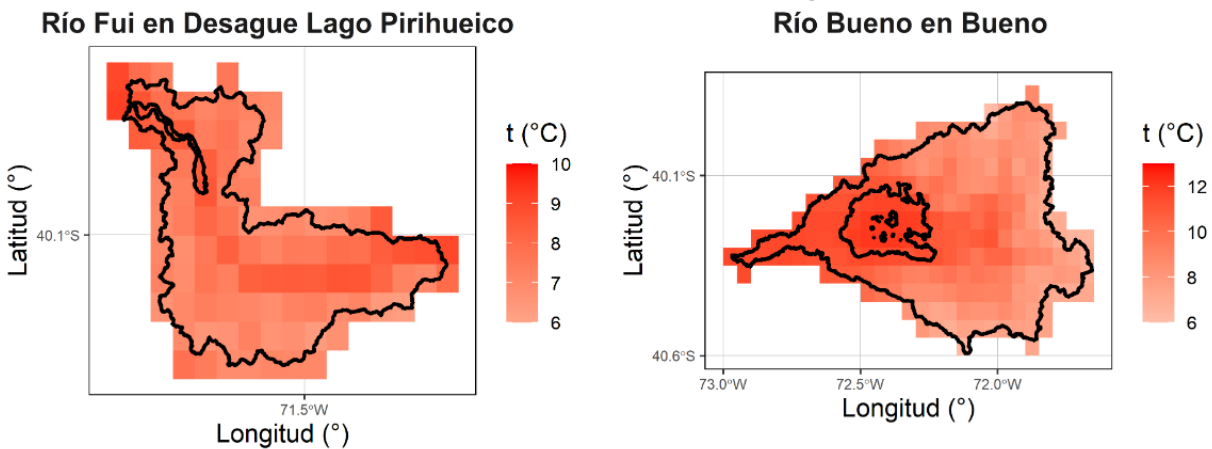


Figura 3.9: Variación espacial de la temperatura media anual en periodo 1981-2019 para ambos sistemas.

### 3.4. Caracterización hidrológica

Utilizando los registros asociados a los controles fluviométricos de las cuencas de interés (ver Tabla 3.4), se puede caracterizar el caudal de salida asociado a ellas y, asimismo, su variabilidad estacional. Se debe recordar que para la cuenca asociada al lago Pihueico, los registros fluviométricos son representativos del desagüe del lago puesto que la estación se ubica en dicho punto. Por el contrario, en la cuenca del

lago Ranco, el control fluviométrico empleado para la caracterización incluye una superficie tributaria de 459,5 km<sup>2</sup> aguas abajo del desagüe del lago (ver Figura 3.1). A continuación, la Figura 3.10 muestra el hidrograma de caudal medio diario en el periodo 2000-2020 para ambas cuencas. Cabe mencionar que, para ambas estaciones, existen mediciones entre los años 1926 y 1947 aproximadamente, sin embargo, estas no fueron incluidas en la serie ilustrada en la Figura 3.10 ya que no forman parte del periodo temporal de interés.

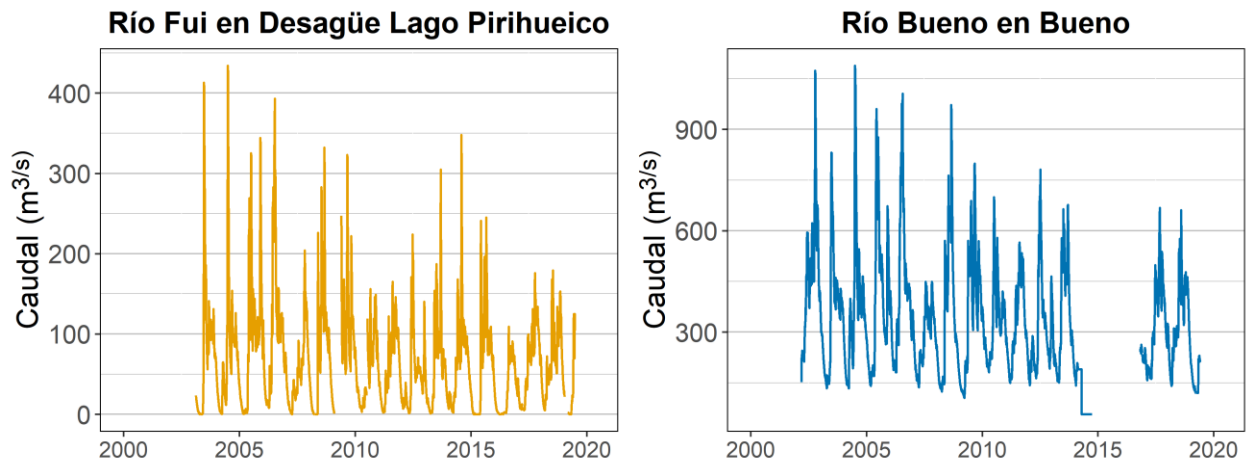


Figura 3.10: Series de caudal diario en estaciones de salida de la zona de estudio.

Se observa una disminución paulatina de los *peaks* de caudal ocurridos en los meses de precipitación; el resto de los meses parece mantenerse con valores similares a lo largo de los años. La estación del lago Pihueico (izquierda) muestra mínimos muy cercanos a 0, mientras que la del lago Ranco (izquierda) tiene su mínimo alrededor de los 150 m<sup>3</sup>/s y en ningún momento se acercan a 0 (exceptuando en el año 2014 que, por su rareza, puede atribuirse a un error instrumental).

### 3.5. Hidrografía de lagos

La hidrografía de los lagos de estudio se obtiene a partir del levantamiento hidrográfico realizado por el SHOA y plasmados en cartas náuticas de papel disponibles a la venta pública. Dichas cartas se digitalizan en el software ArcGIS, con el cual se generan archivos ráster de profundidad con resolución de 1x1 m para el lago Pihueico y de 2x2 m para el lago Ranco. Estos rásteres se muestran en la Figura 3.11.

El lago Pihueico posee mayor profundidad en sus extremos distales, los que también presentan mayor anchura con respecto a la zona central del lago. En el extremo sureste se registran profundidades superiores a 114 m (color naranja claro, Figura 3.11). En este mismo extremo, hacia la costa, se observa una gran zona de profundidades menores a 29 m (color azul). Por su parte, el lago Ranco alcanza profundidades de entre 171 y 200 m (color rojo) en el sector centro y este, presentando en la línea de costa una gran pendiente hidrográfica con respecto a su cota superficial, especialmente en la ribera sur.



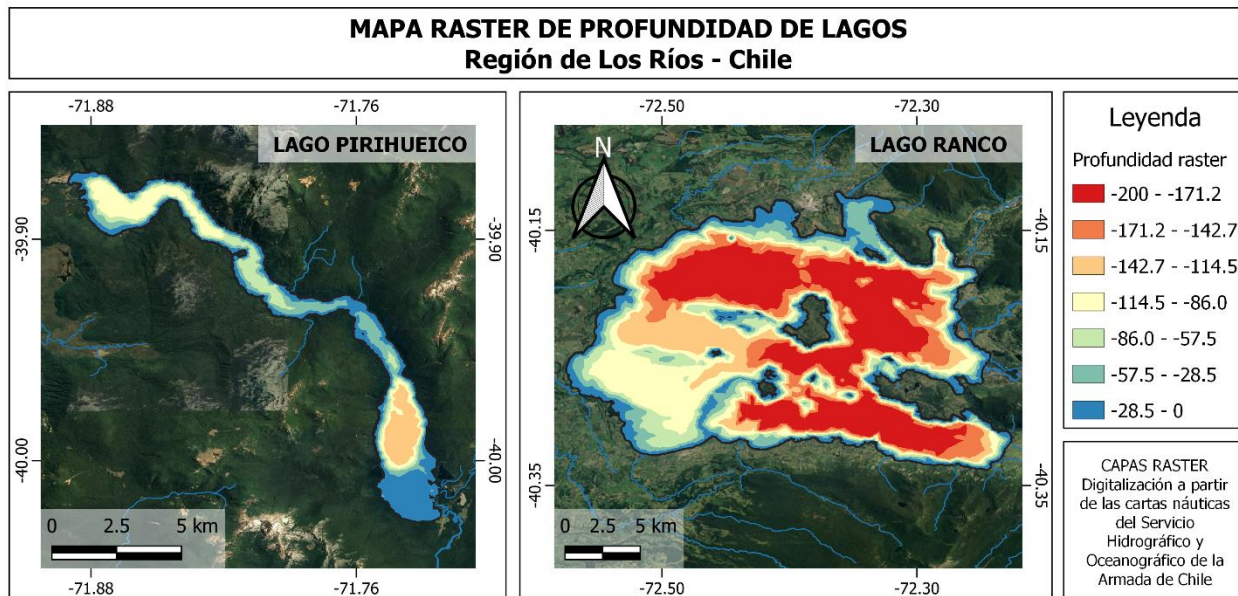


Figura 3.11: Mapa de los ráster de profundidad de lagos.

Posterior a la digitalización (Figura 3.11), se estiman las curvas de área superficial y volumen con respecto a la profundidad (Figura 3.12 y Figura 3.13), siendo 0 metros la superficie del lago al momento de realizar el levantamiento. Se observa una profundidad máxima de 144 m para el lago Pihueico y de 200 m para el lago Ranco, valores propios del momento en que se realiza el levantamiento (ver Tabla 3.1) y que pueden o no ser los mismos en la actualidad. Con esto se tiene un área y volumen máximos de 31,3 km<sup>2</sup> y 1,8 km<sup>3</sup> para el lago Pihueico y de 432,5 km<sup>2</sup> y 51,2 km<sup>3</sup> para el lago Ranco.

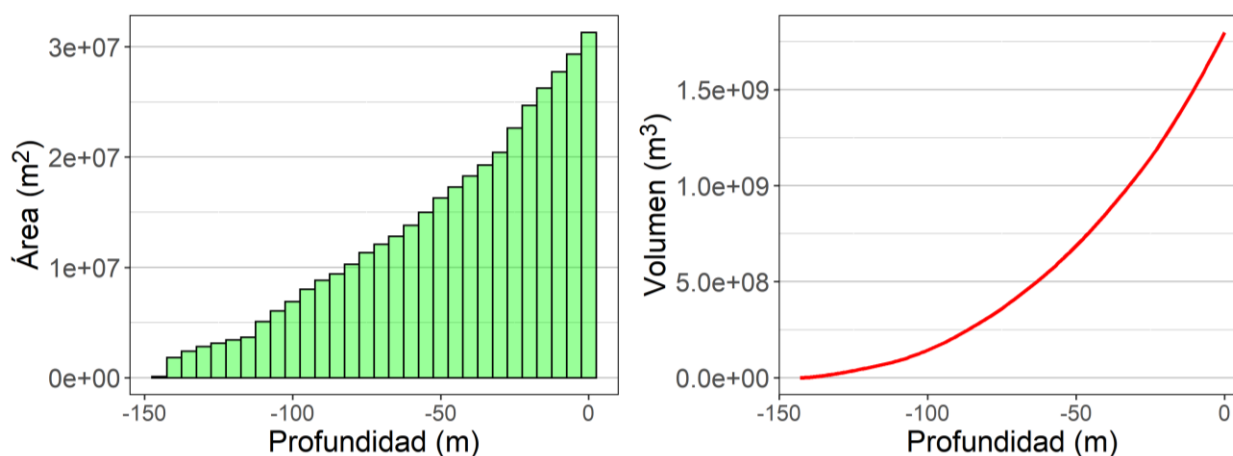


Figura 3.12: Variación área superficial y volumen con respecto a la profundidad, lago Pihueico.

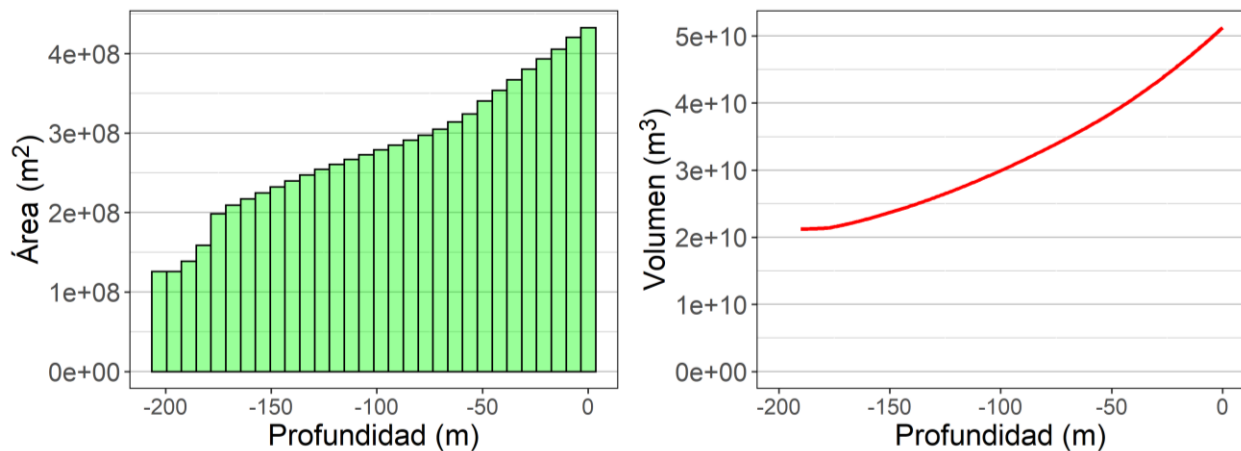


Figura 3.13: Variación área superficial y volumen con respecto a la profundidad, lago Ranco<sup>1</sup>.

### 3.6. Cambios en la superficie de los lagos

La Figura 3.14 muestra las series de tiempo de la variación de la altura limnimétrica obtenidas de las estaciones limnimétricas 10100007-Lago Pihueico (600 msnm) y 10307005-Lago Ranco (LM) (70 msnm).

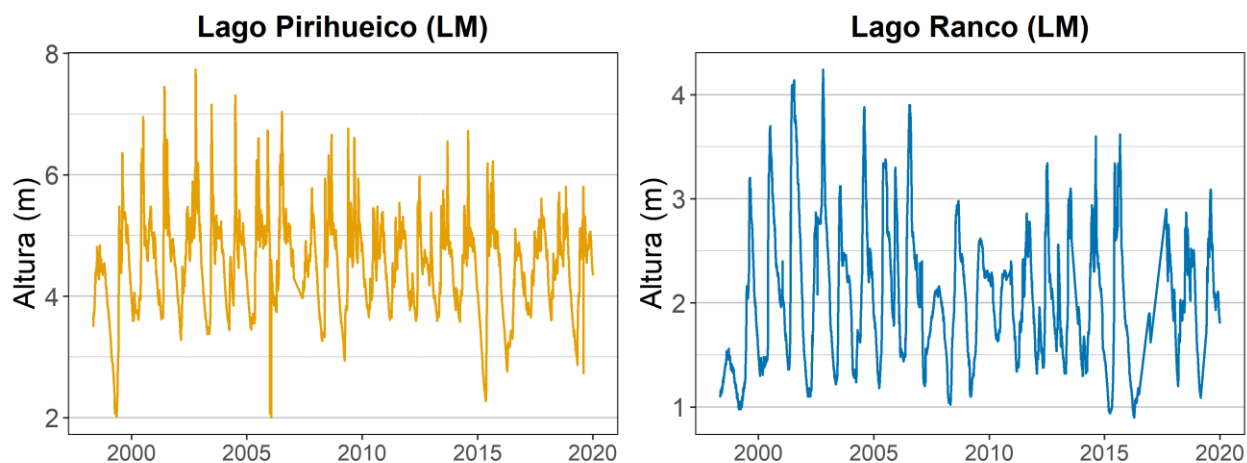


Figura 3.14: Series de tiempo altura limnimétrica observada.

El lago Pihueico muestra una fluctuación estacional en la altura limnimétrica de entre 2 y 3 metros, fluctuación que se vuelve menos homogénea desde aproximadamente el año 2015, por lo que es difícil observar un patrón fijo de máximos y mínimos en el periodo 2015-2020. Además, se nota que los valores máximos han disminuido en casi 2 metros. Por su parte, la altura limnimétrica del lago Ranco también fluctúa entre los 2 y 3 metros, pero lo hace de una forma mucho menos homogénea a lo largo del periodo mostrado y, aunque el máximo ha disminuido en los últimos años, no se puede conjeturar al respecto debido a la falta de patrón general en el periodo graficado.

Lo anterior se complementa con los testimonios<sup>2</sup> recopilados en la zona de estudio: en ambos lagos el

<sup>1</sup> La distribución del área y volumen del lago Rango carece de información entre las profundidades 190 y 200 m, sin embargo, fue posible construir los gráficos debido a que el área y volumen máximo es calculado por ArcGIS.

nivel de agua puede llegar a variar mucho en sólo un par de días y, además, se sucede una variación estacional que tiene su máximo en el mes de julio (mayor nivel de agua) y su mínimo en marzo (menor nivel de agua). En el caso del Lago Pihueico, el cambio estacional percibido a orillas de la alcaldía de mar durante los últimos 3 años ha sido de aproximadamente 13 m mientras que para Ranco ha sido de casi 28 m.

### 3.7. Antecedentes proyecto BHN – DGA 2022

Dado que en el presente trabajo se replica la metodología utilizada en el estudio de actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017) con respecto al modelo VIC, es pertinente revisar algunos antecedentes del mismo, sobre todo considerando las etapas que sucedieron al proyecto inicial (DGA, 2018; DGA, 2019a; DGA, 2019b; DGA, 2022, en prensa). En su etapa más reciente, desarrollada durante el año 2022, el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile (DIC) desarrolló el estudio titulado “Homologación del cálculo hidrológico para la estimación de la oferta natural de agua histórica y futura en Chile”, orientado a unificar los aprendizajes y avances parciales logrados en cada etapa del BHN para plasmarlos en un único estudio de dominio nacional (Chile continental, Rapa Nui y Juan Fernández). Así, se utiliza este último como fuente de algunos antecedentes de utilidad para efectos de la configuración del módulo de lagos de VIC y, a su vez, de la modelación hidrológica.

En el estudio DGA (2022) se calibraron aquellos parámetros identificados como sensibles para efectos de la modelación hidrológica con VIC en el trabajo de Sepúlveda et al. (2022), tomando como base de datos más de 100 cuencas distribuidas en Chile continental seleccionadas según disponibilidad de información, extensión de registros y bajo nivel de intervención antrópica (mayor detalle en DGA, 2022). Los parámetros fueron calibrados siguiendo un enfoque de regularización orientado a reducir la dimensionalidad del problema y preservar, hasta cierto punto, la heterogeneidad espacial que por su naturaleza física debiesen tener algunos parámetros. Los parámetros calibrados fueron:

- **Variables de caracterización de las capas de suelo:** parámetro asociado a la curva de infiltración, velocidad del flujo base, humedad de suelo, conductividad hidráulica saturada, exponente  $n$  en la ecuación de Campbell, espesor de capas de suelo.
- **Parámetros de fase de la precipitación y derretimiento de nieve:** temperatura máxima y mínima de precipitación sólida y líquida respectivamente, albedo de acumulación y de deshielo.

La calibración se realizó usando como función objetivo el estadístico de ajuste de bondad KGE, que indica un desempeño perfecto del modelo si toma un valor igual a 1. La Tabla 3.5 muestra los valores de KGE obtenidos para las cuencas de la zona de estudio.

---

<sup>2</sup> En agosto de 2022 se realizó una visita a los lagos Pihueico y Ranco donde, además de visitar los controles fluviométricos disponibles en la zona, se pudo conversar con personal naval en las capitanías de puerto respectivas de cada lago (para mayor detalle visitar <https://ingenieria.uchile.cl/noticias/190170/javiera-caceres-alumna-dic-realiza-visita-a-region-de-los-rios>).

Tabla 3.5: Valores de KGE calibrados en DGA (2022).

Cuenca (BNA)	KGE
Río Fuy en Desagüe Lago Pirihueico (10100002)	0,85
Río Bueno en Bueno (10311001)	0,69
Río Calcarrupe en Desembocadura (10304001) *	0,83
Río Caunahue Camino a Llifén (10305001) *	0,57

Las cuencas marcadas con (\*) corresponden a subcuencas de la cuenca Río Bueno en Bueno (10311001), o cuencas de entrada del Lago Ranco, tal como se muestra en la Figura 3.1. Para los casos de cuencas contenidas dentro de otra, la modelación se realizó en base al conjunto de parámetros calibrados con los registros fluviométricos asociados al punto de salida de la cuenca que las contiene. Se cuenta así con los parámetros de modelación hidrológica de VIC para ambas cuencas de estudio y para dos cuencas de entrada, cuyos valores se resumen en la Tabla C.1 del Anexo C.

Cabe mencionar que en ninguna de las etapas del BHN fue incluida la modelación de lagos en VIC. Sólo en la etapa III (DGA, 2019a) ocho lagos pertenecientes a las macrozonas sur y austral del país fueron modelados, pero de forma simplificada debido a la falta de mediciones fluviométricas en la entrada y/o salida de la mayoría de los lagos de Chile. La metodología, sintetizada en la Figura 3.15, obtiene el caudal efluente del lago mediante el cálculo del balance de masa en el lago y la calibración de un tiempo de retardo. En el caso de DGA (2022), a pesar de existir lagos anidados en algunas de las cuencas calibradas, no se consideró un enfoque de modelación de lagos ni los procesos de regulación asociados a estos durante la calibración.

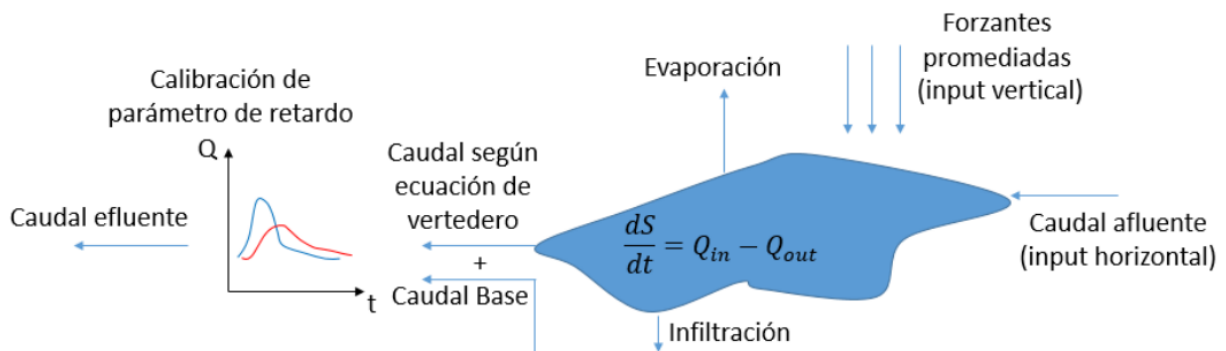


Figura 3.15: Esquema de los procesos considerados para la obtención del caudal efluente de lagos en DGA (2019a). FUENTE: Figura obtenida de DGA (2019a).

# Capítulo 4: Metodología

El presente capítulo está orientado a describir la metodología seguida para lograr los objetivos propuestos. En primera se profundiza en los fundamentos del modelo hidrológico VIC para luego describir las etapas seguidas en el presente trabajo para modelar las cuencas y lagos de estudio en dicho modelo. Se finaliza describiendo el trabajo realizado posterior a la modelación, correspondiente al cálculo del KGE, la sensibilización de parámetros de lagos y la comparación del área calculada por VIC y con información remota. En este capítulo también se describe el trabajo llevado a cabo para cada una de las fuentes de información utilizadas: por un lado, las cartas náuticas y las mediciones fluviométricas y limnimétricas, utilizadas para el cálculo de parámetros del módulo de lagos de VIC y, por otro lado, la base de datos de Pre SWOT y las imágenes del producto NDWI de los satélites Landsat 5 y 8, que son trabajadas para conocer la variación del área superficial de los lagos.

## 4.1. Modelación hidrológica en VIC

### 4.1.1. Descripción general del modelo

El modelo de Capacidad de Infiltración Variable (VIC por sus siglas en inglés) es un modelo hidrológico formulado por Liang et al. en 1994 y que se caracteriza por ser de macroescala y semidistribuido. En otras palabras, se divide la cuenca de estudio en una grilla de celdas mayores a un kilómetro y se realiza un balance hídrico y energético para cada una de ellas.

El modelo VIC permite incorporar, para cada celda, la variabilidad en la vegetación y en las capas de suelo. Para estas últimas, las variables definen la capacidad de almacenamiento de humedad en ellas, con lo que se calcula el flujo de humedad en el suelo (o *baseflow*) como una recesión no lineal. La escorrentía superficial (o *runoff*) se estima según la curva de infiltración variable (de ahí su nombre) la que considera “la dependencia de la capacidad de infiltración sobre la distribución espacial de la superficie la humedad del suelo” (Bowling & Lettenmaier, 2009). VIC también incorpora el efecto de lagos, zonas de inundación y la topografía del lugar en el hidrograma de salida (Gao, H. et al., 2010). Sin embargo, VIC no incorpora acuíferos ni interacción lateral entre celdas (DGA, 2017).

La modelación de lagos en VIC se compone de dos etapas: balance de energía y balance de masa. La primera se modela a partir del trabajo de Hostetler y Bartlein (1990), Hostetler (1991), y Patterson y Hamblin (1988), y la segunda a partir de Cherkauer y Lettenmaier (1999) y Bowling y Lettenmaier (2009). En estos dos últimos estudios se incluye al efecto de lagos el de las zonas de inundación, las que hacen referencia a la porción de suelo que está cubiertas por agua dependiendo la estación del año (Zoltai, 1979). Como limitaciones, este modelo “sólo simula lagos que reciben todos sus caudales de entrada desde la misma celda” (Gao, H. et al., 2010).

Cuando se modelan lagos, VIC recibe como input el archivo de parámetros del lago, que incluye los siguientes términos:

Tabla 4.1: Archivo de parámetros de lago.

Parámetros	Unidad
N° de píxel o subcelda	-
Índice del tipo de suelo del píxel	-
N° de nodos (n° de puntos de nivel de agua y fracción de área cubierta)	-
Nivel de agua de vertedero	metros
Ancho desagüe como fracción del perímetro del lago	-
Nivel de agua inicial	metros
Fracción de caudal que entra al lago	-
Perfil del lago (puntos de nivel de agua y fracción de área cubierta)	(metros, -)

Todos los valores de nivel de agua se miden desde la máxima profundidad del lago o, en otras palabras, el fondo del lago tiene un nivel de agua de 0 m. Para un mejor entendimiento del módulo de lagos y de la metodología expuesta más adelante, en la Figura 4.1 se esquematiza un lago y los niveles de agua de interés.

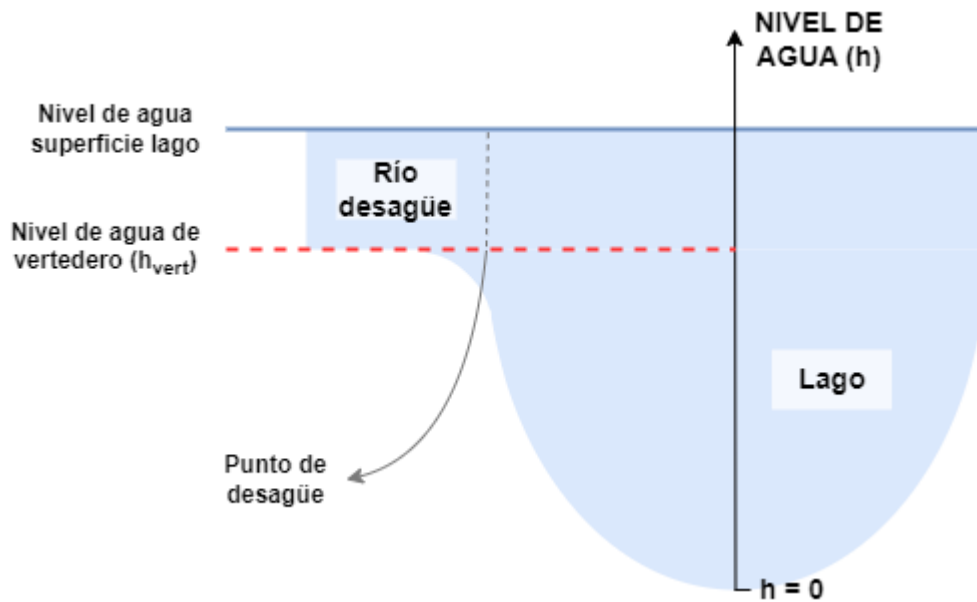


Figura 4.1: Esquema niveles de agua lago.

El perfil de lago puede especificarse por el usuario, pero en caso de no especificarse VIC supone un perfil parabólico. Además del archivo de parámetros del lago, el módulo de lagos permite incluir como entrada (input) adicional el caudal afluente desde otras zonas.

El algoritmo que sigue VIC para calcular el caudal de salida se puede dividir en cuatro pasos (ver Figura 4.2). Primero, se calcula la evaporación del lago en cada tiempo a partir de la metodología propuesta por Hostetler y Bartlein (1990) y Hostetle (1991) que consiste en la solución de las ecuaciones de transporte de calor, siendo la ecuación (4.1) de **balance de energía** en la superficie del lago una de ellas:

$$\kappa_m + K(z, y) \frac{\partial T}{\partial z} = K^* + L^*_d - L_u \pm Q_e \pm Q_h \quad (4.1)$$

Donde  $\kappa_m$  ( $m^2/d$ ) es la difusión molecular del agua,  $K(z, y)$  ( $m^2/d$ ) la difusividad turbulenta,  $T$  ( $^{\circ}C$ ) la temperatura del agua,  $z$  (m) la profundidad medida desde la superficie,  $K^*$  y  $L_u$  ( $W/m^2$ ) las radiaciones netas de onda corta y onda larga respectivamente desde la superficie del lago,  $L^*_d$  ( $W/m^2$ ) la radiación de onda larga desde la atmósfera, y  $Q_e$  y  $Q_h$  ( $W/m^2$ ) los flujos de calor latente y sensible, respectivamente. La ecuación (4.2) de transporte de calor calcula los ciclos estacionales de temperatura simulando una estratificación unidimensional (vertical) como sigue:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{A(z)} \frac{\partial}{\partial z} \{A(z)[\kappa_m + K(z, y)] \frac{\partial T}{\partial z}\} + \frac{1}{A(z)} \frac{1}{C_w} \frac{\partial[\Phi A(z)]}{\partial z} \quad (4.2)$$

Donde  $t$  es el tiempo en días,  $A(z)$  ( $m^2$ ) el área del lago a la profundidad  $z$ ,  $C_w$  ( $J/m^3C^1$ ) la capacidad calorífica volumétrica del agua, y  $\Phi$  es un término de la fuente de calor según la ley de Beer.

La evaporación  $E$  entra en los cálculos a partir del flujo de calor latente:

$$Q_e = \rho L_e E \quad (4.3)$$

Donde  $\rho$  ( $kg/m^3$ ) es la densidad del vapor de agua,  $L_e$  ( $MJ/kg$ ) el calor latente de vaporización. Finalmente, la evaporación y sus componentes se calculan como:

$$E = NU_2(e_0 - e_a) \quad (4.4)$$

$$N = 0.029A^{-0.05} \quad (4.5)$$

$$e_0 = 101.325 \exp(13.3185t_k - 1.9760t_k^2 - 0.6445t_k^3 - 0.1299t_k^4) \quad (4.6)$$

$$t_k = 1 - [373.15/(T_s + 273)] \quad (4.7)$$

$$e_a = e_a^* - \gamma(T_a - T_w) \quad (4.8)$$

Donde  $N$  ( $mm\ s/m\ kPa$ ) es el coeficiente empírico de transferencia de masa,  $U_2$  (m/s) la velocidad del viento a 2 metros sobre la superficie del agua,  $e_a$  y  $e_0$  (kPa) las presiones de vapor del aire y vapor de saturación de la superficie del lago respectivamente,  $A$  ( $km^2$ ) es el área superficial del lago,  $T_s$  ( $^{\circ}C$ ) la temperatura de la superficie del lago,  $T_a$  y  $T_w$  ( $^{\circ}C$ ) las temperaturas de bulbo seco y húmedo del aire,  $e_a^*$  (kPa) la presión de vapor de saturación del aire a la temperatura de bulbo húmedo, y  $\gamma$  (kPa/ $^{\circ}C$ ) es la constante psicrométrica.

Para más información sobre la modelación de la componente energética de VIC en lagos consultar (Hostetler & Bartlein, 1990). A partir de este paso se obtienen también los flujos de hielo y nieve usando el método de Patterson y Hamblin (1988).

Luego, se realiza un **balance de masa o agua**, que parte con el ingreso al píxel de lago del caudal de entrada entregado a VIC y la escorrentía proveniente de áreas con vegetación o zonas de inundación dentro de la celda (ver Figura 4.2, paso II) con el que se obtiene un nuevo nivel de agua a partir del cual se calcula el exceso de escorrentía (paso III), el que es liberado (paso IV).

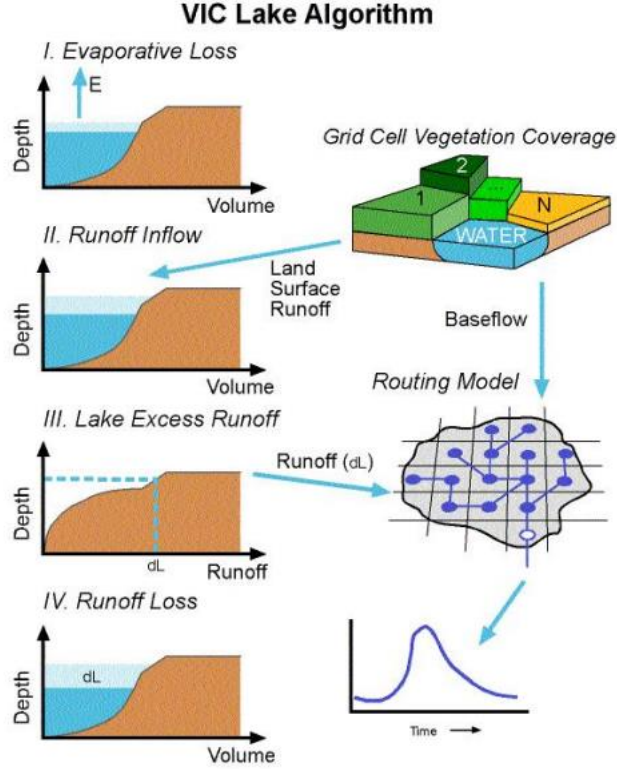


Figura 4.2: Esquema del algoritmo de VIC para lagos. I: Evaporación del lago se calcula con balance de energía. II: Caudal entra al lago desde la superficie terrestre con vegetación. III: Caudal de salida del lago se calcula con el nuevo escenario. IV: El escenario es recalculado. Obtenida del informe Water Budget Record from Variable Infiltration Capacity (VIC) Model (Gao, H. et al., 2010).

Las ecuaciones expuestas a continuación, sobre la componente másica de VIC en lagos, son referenciadas de (Bowling & Lettenmaier, 2009), donde se define  $C_{wet}$  como la máxima fracción de lago y zona de inundación que puede estar inundada y  $f_{lake}$  como la fracción de  $C_{wet}$  que está inundada para cada tiempo. El balance de agua para  $C_{wet}$  está representado por la ecuación (4.9).

$$\Delta S = P + (D_{in}) + [E_w f_{lake} + E_v(1 - f_{lake})] - R_{lake} - B_{lake} \quad (4.9)$$

Donde  $\Delta S$  es el cambio en el almacenamiento de agua del suelo, lago, hielo y nieve,  $P$  la precipitación,  $E_w$  y  $E_v$  la evaporación del lago y de la vegetación de las zonas de inundación respectivamente,  $D_{in}$  el caudal (escorrentía más flujo base) que entra al lago desde fuera del sistema lago-zonas de inundación,  $R_{lake}$  la escorrentía del lago, y  $B_{lake}$  el flujo base del lago.

El flujo base del lago es calculado bajo el lago en función del contenido de agua de las zonas de inundación saturadas según lo propuesto por Cherkauer y Lettenmaier (1999). Por su parte, el flujo superficial del lago  $Q$  ( $m^3/s$ ) se obtiene a partir de la ecuación de vertedero (4.10):

$$Q = c_d b \sqrt{g} \left[ \frac{2}{3} (z - z_{min})^{3/2} \right] \quad (4.10)$$

Donde  $c_d$  (m) es el coeficiente de descarga,  $b$  (m) el ancho del flujo,  $g$  ( $m/s^2$ ) la aceleración de gravedad,  $z$  la profundidad actual del lago, y  $z_{min}$  (m) la elevación en el desagüe. Finalmente, la escorrentía del lago  $R_{lake}$  (m/tiempo) se calcula con la ecuación (4.11) suponiendo que el lago posee una superficie circular.



$$R_{lake}(z) = \begin{cases} 0 & z \leq z_{min} \\ \frac{4}{3} C_d \sqrt{g \pi A(z)} (z - z_{min})^{3/2} dt f & z > z_{min}' \end{cases} \quad (4.11)$$

Donde  $dt$  es el tiempo de cada paso en segundos,  $A(z)$  ( $m^2$ ) la superficie del lago a profundidad  $z$ , y el término  $2[\pi A(z)]$  corresponde a la superficie del lago asumiendo una forma circular, esto con el objetivo de que el ancho de desagüe esté en proporción con el área mediante la fracción  $f$  = ancho desagüe/área circunferencial del lago.

Se considera que la totalidad de agua generada en las zonas de inundación descargan al lago, como se observa en la figura 5.nn. Estas dos zonas están en constante conversación mediante la reducción de la humedad de suelo en las zonas de inundación cuando el área del lago se reduce (b, c), el que luego satura a la zona de inundación cuando el área aumenta (d, a).

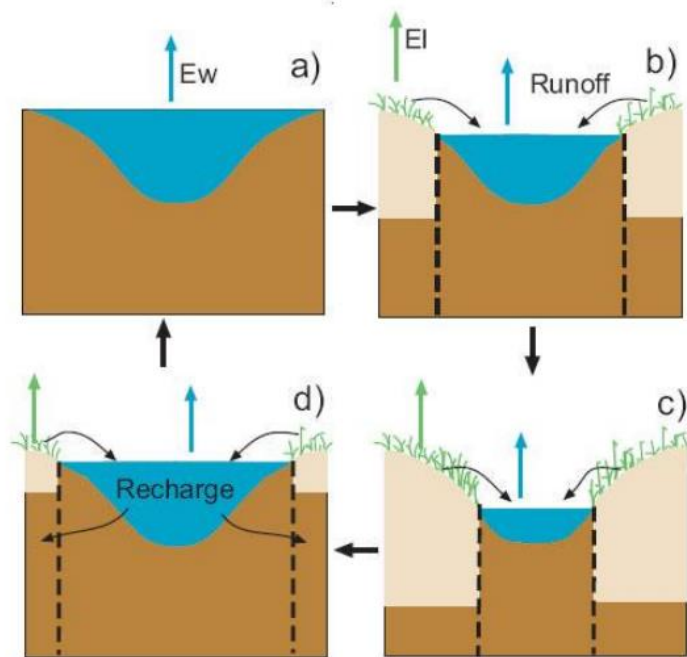


Figura 4.3: Esquema del algoritmo de zonas de inundación: a) lago en su máxima extensión y zona de inundación saturada, b) baja el nivel del lago e ingresa escorrentía desde la zona de inundación, c) evaporación de ambas zonas reduce humedad de suelo, d) aumenta nivel del lago y se satura la zona de inundación mediante recarga. Obtenida del informe Water Budget Record from Variable Infiltration Capacity (VIC) Model (Gao, H. et al., 2010).

#### 4.1.2. Configuración del modelo

La Figura 4.4 esquematiza la metodología seguida en VIC: inputs, etapas de modelación y evaluación del modelo.

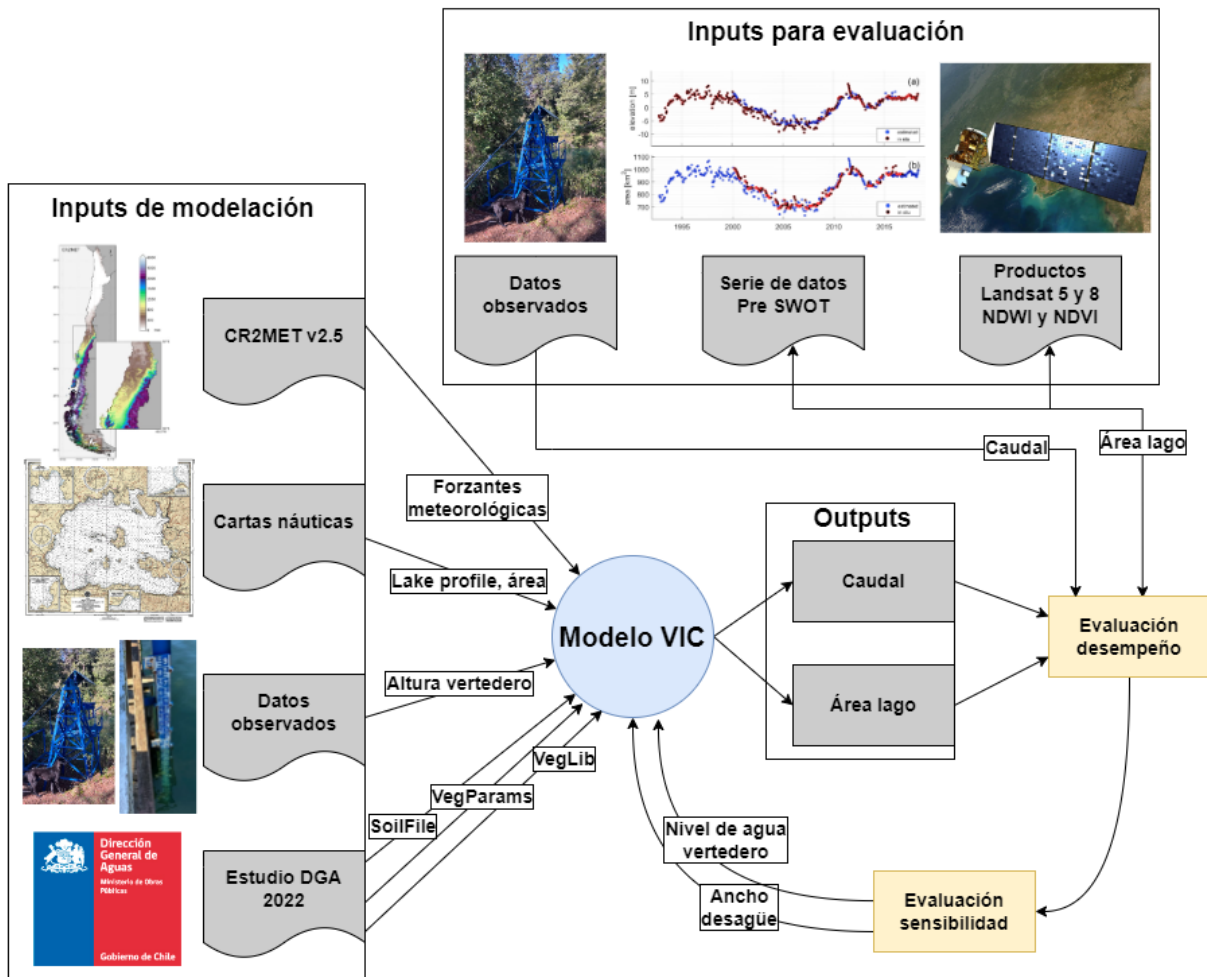


Figura 4.4: Esquema metodológico para la configuración y evaluación del modelo VIC.

Si siguiendo el esquema de la Figura 4.4, se utilizan como **inputs** las forzantes meteorológicas empleadas en DGA (2022), las cuales se obtienen mediante la combinación de CR2MET v2.5 con las distribuciones subsidiarias de ERA5 para obtener las series trihorarias de precipitación (mm/3h) y temperatura (°C). A su vez, a partir del reanálisis atmosférico ERA5 se obtienen las series de velocidad de viento a 20m de la superficie (m/s), presión atmosférica (kPa) y radiación de onda corta (W/m<sup>2</sup>) y humedad relativa (-). La radiación onda larga (W/m<sup>2</sup>) se estima, según se detalla en DGA (2022), mediante relaciones que vinculan la radiación con la temperatura. En tanto, las variaciones a nivel subcelda de las capas de suelo y vegetación quedan definidos por los documentos *SoilFile*, *VegParams*, *VegLib* realizados para el estudio DGA (2022). La modelación propiamente tal se realiza en el periodo 1981-01-01 – 2020-04-30, en concordancia con el rango temporal de las forzantes meteorológicas empleadas en DGA (2022).

Se describe en los puntos siguientes la metodología seguida para la obtención del *lake profile*, o perfil de lago, y el nivel de agua de vertedero a partir de los dos inputs de modelación restantes, cartas náuticas del SHOA y datos observados de la DGA (ver Figura 4.4).

- **Estimación del perfil de lagos**

Las cartas náuticas son obtenidas del SHOA en papel. Luego de escanearlas, se trabajan en el software ArcGIS para su digitalización que consiste en obtener el ráster de profundidades del lago.

Para un mejor entendimiento, las cartas náuticas de los lagos consisten en una serie de puntos con su respectivo valor de profundidad (número entero), además de las curvas de nivel que circundan al lago. En ArcGIS, se marca cada uno de estos puntos y su valor en un *shapefile*, lo que permite obtener un archivo TIN (“red irregular triangular”, por su traducción de las siglas al español) mediante la triangulación de los puntos, y a su vez, obtener el ráster. Los puntos que componen el ráster se extraen y se trabajan en RStudio para obtener el **perfil del lago** (*lake profile*), es decir, el nivel de agua para cada punto y fracción de área del punto que está con agua para dicho nivel, datos necesarios para la modelación en VIC.

Dado que se busca proponer una metodología para lagos con poca información, se espera desprender el número mínimo de pares de puntos nivel de agua-fracción de área, o nodos, que representen la realidad hidrográfica de los lagos. Para esto, se discretizan los puntos en perfiles de 100, 50, 25, 20, 10 y 5 nodos y se comparan con el perfil de 10000 nodos, número que se consideró representativo de la totalidad de puntos extraídos de los rásteres<sup>3</sup>. La Figura 4.5 y Figura 4.6 muestran los gráficos con estos perfiles para cada lago, en las que se puede notar que para ambos lagos a partir del perfil con 25 nodos las curvas son prácticamente iguales, es decir, más de 25 nodos no aportan información extra sobre la hidrografía de los lagos.

De la digitalización de las cartas náuticas se desprenden otros valores de parámetros utilizados para la modelación en VIC, como área, perímetro y ubicación del centroide de lagos, profundidad en desagüe y estación limnimétrica, entre otros. También son utilizadas para obtener la variación del área superficial y volumen con respecto a la profundidad del lago, lo que se muestra en la Figura 3.12 y Figura 3.13.

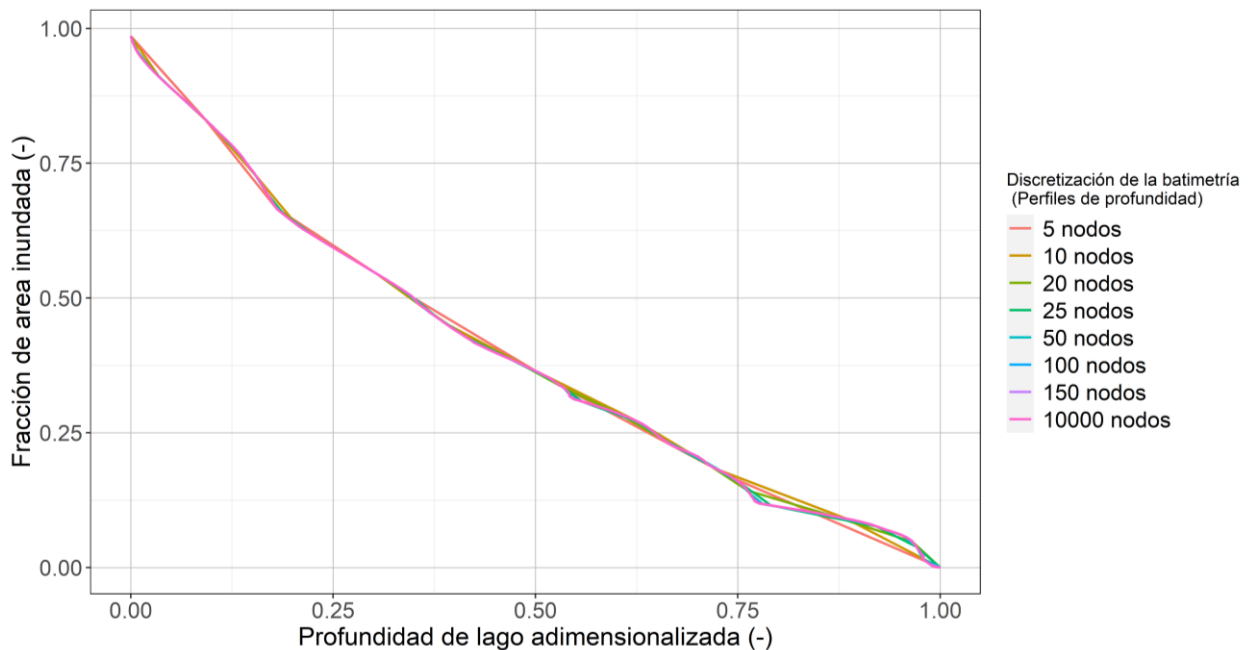


Figura 4.5: Curvas perfiles de profundidad, lago Pirihueico.

<sup>3</sup> Aproximadamente 31 millones de puntos para el lago Pirihueico y 80 millones para el lago Ranco.

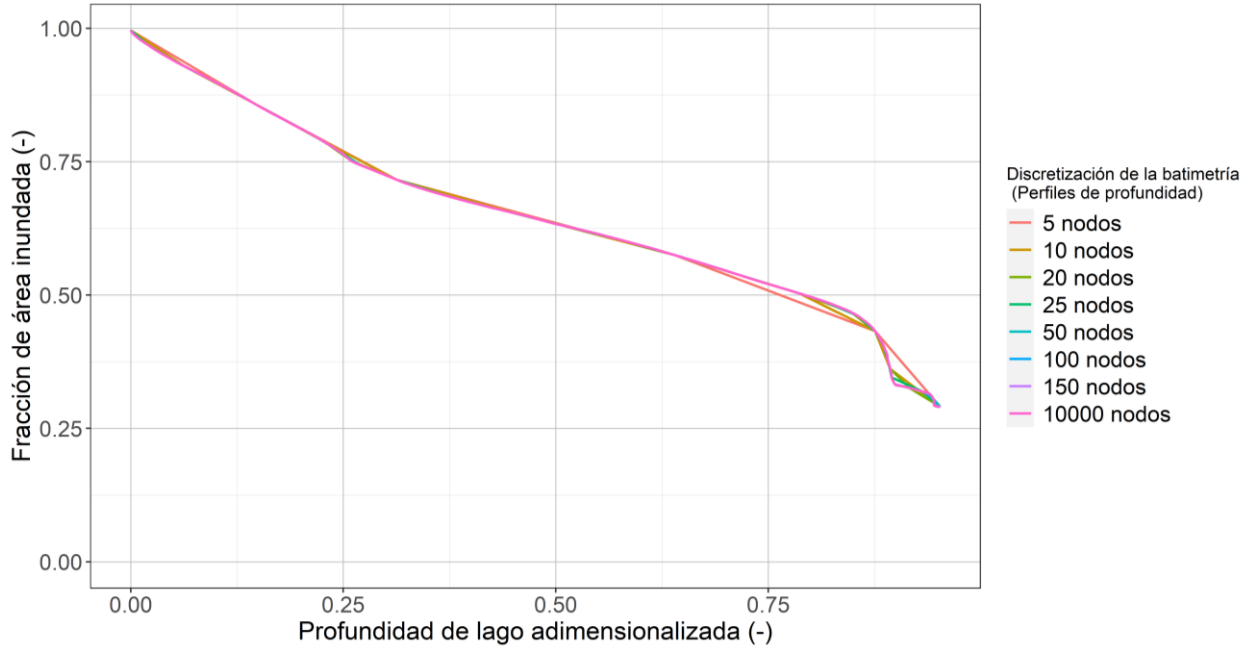


Figura 4.6: Curvas perfiles de profundidad, lago Ranco.

- **Estimación del nivel de agua de vertedero**

Con los datos de altura y caudal instantáneo y de altura de agua medidos por las estaciones fluviométricas y limnimétricas, respectivamente, de la DGA (ver Tabla 3.4), se obtiene el nivel de agua de vertedero ( $h_{vert}$ ) definido como el nivel de agua del lago al cual el caudal de salida es igual (o cercano) a 0. Considerando la distancia desagüe lago-estación fluviométrica, se sigue una metodología distinta para cada lago.

Para el caso del lago Pirihueico, la ubicación de la estación fluviométrica de salida (Río Fuy en Desagüe Lago Pirihueico, 10100002) permite usar los datos de altura ( $H$ ) y caudal instantáneo ( $Q$ ) directamente. Estos fueron trabajados a escala logarítmica para ajustarlos a un modelo lineal del tipo:

$$\log(Q) = \log(a_0) + a_1 * \log(H) \quad (4.12)$$

Donde  $a_0$  y  $a_1$  son coeficientes. Se evalúa la habilidad predictiva del modelo mediante el método *Repeated k-Fold-Cross-Validation* (validación cruzada k-fold), que corresponde a una metodología de estimación del error que “consiste en dividir el conjunto de datos en k-subconjuntos, luego, iterativamente, algunos de ellos se utilizan para entrenar el modelo, mientras el resto se usa para evaluar su desempeño” (Anguita, D. et al., 2012). En específico se evalúa el desempeño del modelo mediante el error de raíz cuadrada media (RMSE).

Para el lago Ranco, los datos de altura y caudal instantáneo de la estación fluviométrica de salida (10311001) no son representativos del desagüe del lago por lo que se debe seguir otra metodología. Así, como se muestra en la ecuación (4.13), el caudal controlado se conceptualiza como la suma del caudal aportado por el lago ( $Q_{lago}$ ) y el tributario asociado a la sección intermedia entre el desagüe y la estación ( $Q_{ds}$ ).

$$Q_{10311001} = Q_{lago} + Q_{ds} \quad (4.13)$$

En consecuencia, si se logra determinar el caudal aportante por la sección intermedia, se puede estimar el caudal en el punto del desagüe del lago. Para ello, se plantea una relación de rendimiento entre la porción de cuenca ( $c$ ) y la cuenca más próxima con mediciones de caudal ( $Q_c$ ). De este modo, el caudal asociado al tributario intermedio desagüe – control fluviométrico se expresa mediante la ecuación (4.14).

$$Q_{ds} = c * Q_c ; c = \frac{A_{ds}}{A_c} \quad (4.14)$$

En el caso de la zona de interés (i.e., Lago Ranco), la cuenca más próxima corresponde a la de Río Llolelhue en La Unión, la cual se ilustra en la Figura 4.7.

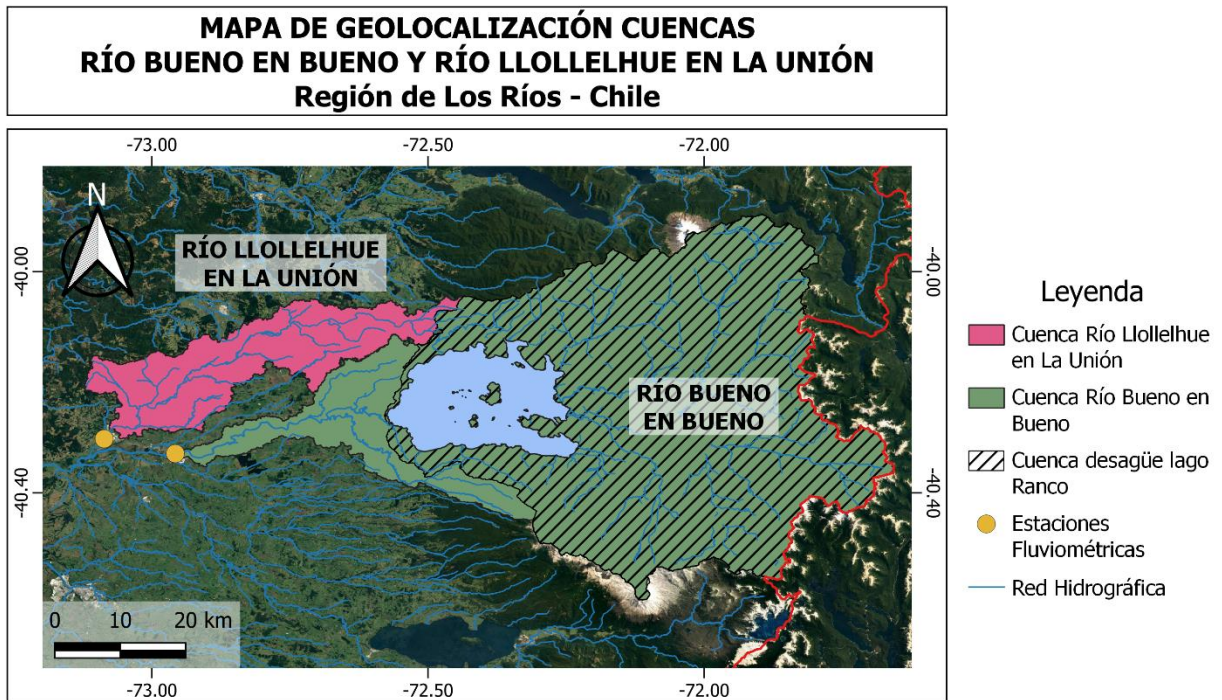


Figura 4.7: Mapa de geolocalización de las cuencas para la relación de rendimiento.

La altura en el punto de desagüe se obtiene utilizando la altura diaria medida por el limnómetro y “transportándola” al punto de desagüe sumándole la diferencia de profundidad entre limnómetro y desagüe, que se obtiene del ráster del lago. Finalmente, se ajustan el caudal y la altura a un modelo lineal siguiendo el mismo procedimiento realizado para el Lago Pihueico.

Para efectos de la modelación hidrológica, se procede según etapas, las cuales dependen del lago en cuestión. Para ambos lagos se sigue la siguiente metodología:

- 1. Etapa 1: se modela toda la cuenca**, utilizando los parámetros calibrados y sin considerar la presencia del lago. Se analiza la transferibilidad espacial de los parámetros de modelación hidrológica a cuencas anidadas en las cuencas calibradas.
- 2. Etapa 2: se modela sólo el lago**, considerándolo como un único píxel. Al tratarse de un único píxel, las forzantes meteorológicas y las características de las capas de suelo de los píxeles que componen el lago son espacialmente promediadas. Además, se agrega como “forzante” el caudal

de entrada al lago ( $Q_{in\ lago}$ ), calculado como:

$$Q_{in\ lago} = \sum_i (ro_i + bf_i) \quad (4.15)$$

Con  $i$  los pixeles aportantes al lago, es decir, los pixeles de la cuenca de desagüe (ver Figura 3.1) menos la porción de lago que los compone. Finalmente se configura el archivo de parámetros del lago con los valores señalados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Configuración archivo de parámetros de lago.

Parámetro	Valor
Nº de pixel	1
Índice del tipo de suelo del pixel	0, se define un único tipo de cobertura de suelo, el de cuerpos de agua
Nº de nodos	5, 10, 20, 25, 50, 100, se modela para todos los perfiles definidos (ver Figura 4.5 y Figura 4.6)
Nivel de agua de vertedero (m)	Valores obtenidos siguiendo metodología con datos fluviométricos y limnimétricos observados
Fracción de ancho desagüe	Valores mostrados en Tabla 3.3
Nivel de agua inicial (m)	0, lago con nivel de agua máximo
Fracción de caudal que entra al lago	1, todo el caudal entra al lago

Se obtienen así las salidas trihorarias del lago, con las que se estima el caudal de salida del lago  $Q_{out\ lago}$  como:

$$Q_{out\ lago} = (ro + bf + V_{lago}) * f_{lago} \quad (4.16)$$

Donde  $V_{lago}$  es el volumen de salida del lago y  $f_{lago}$  el área de lago como fracción del área de la celda.

Con esta etapa se obtiene el caudal de salida de la cuenca (al que se denominará  $Q_{sim}$  para futuros usos) para el lago Pirihueico puesto que es igual al caudal de salida del lago. Sólo en el caso del lago Ranco, se suma la siguiente etapa de modelación:

- 3. Etapa 3: se calcula el caudal aguas abajo del lago  $Q_{aguas\ abajo}$ ,** siguiendo la misma sumatoria mostrada anteriormente, a la que se suma el caudal de salida del lago para obtener el caudal de salida de la cuenca  $Q_{sim}$ .

Para un mejor entendimiento, la Figura 4.8 esquematiza las etapas de modelación y los caudales a calcular para el caso del lago Ranco:



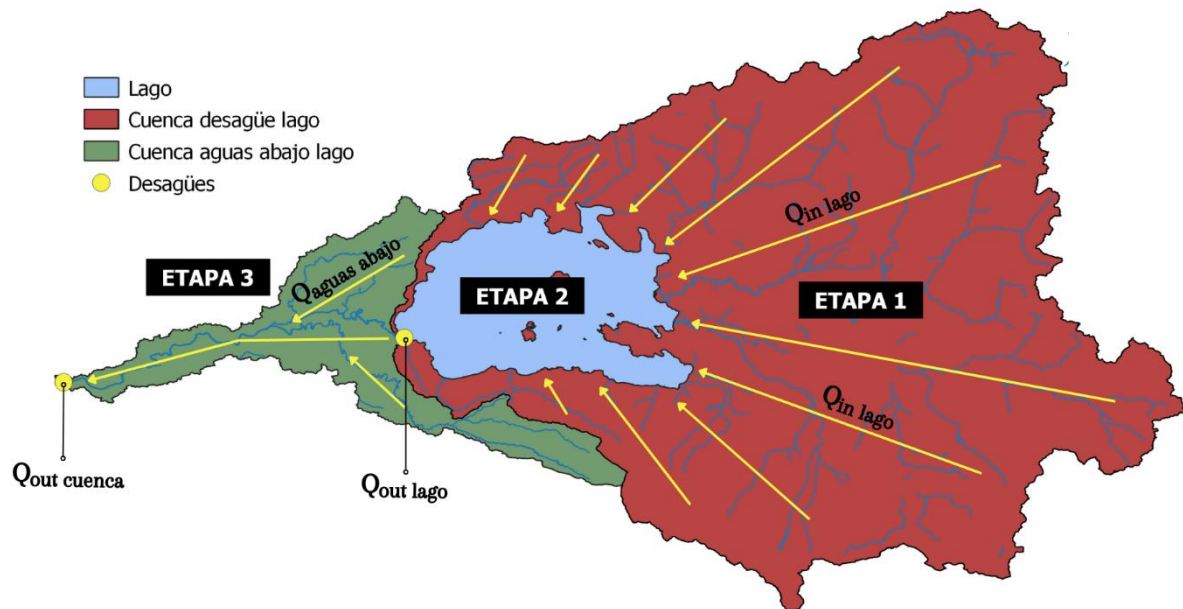


Figura 4.8: Esquema metodológico de la modelación de lagos por etapas en VIC, lago Rancho.

Junto a  $Q_{sim}$ , se trabaja también con las series de área superficial y nivel de agua del lago simuladas por VIC,  $A_{sim}$  y  $H_{sim}$  respectivamente. Los tres **outputs** son utilizados para la evaluación del desempeño del modelo, metodología que se describe en la siguiente sección.

Cabe mencionar que no se incluye rastreo en la modelación pues el lago funciona como regulador de los caudales (o realiza la mayor parte de dicho efecto en contraste al impacto que pudiese tener el rastreo).

## 4.2. Evaluación del desempeño del modelo y análisis de sensibilidad

El desempeño del modelo se evalúa en primera instancia analizando la bondad de ajuste del caudal simulado a la salida de la cuenca  $Q_{sim}$  con respecto al caudal observado por la estación fluviométrica de salida  $Q_{obs}$  mediante el índice estadístico KGE. En esta etapa se evalúa también la sensibilidad del modelo a las variaciones de dos parámetros de lago: el nivel de agua de vertedero y el ancho del desagüe del lago. Se compara también el nivel de agua simulado  $H_{sim}$  con la altura limnimétrica medida por las estaciones de la DGA  $H_{obs}$  utilizando el error cuadrático medio (RMSE). Con este mismo indicador, se evalúa la diferencia entre los valores de área superficial de los lagos predichos por el modelo y las series de tiempo de Pre SWOT y del producto NDWI.

### 4.2.1. Caudales y KGE

El índice *Kling-Gupta efficiency* o KGE es una medición estadística del desempeño de un modelo. Fue propuesto por Gupta et al. (2009) a partir de la descomposición de los indicadores MSE (*mean squared error*) y NSE (*Nash-Scutcliffe efficiency*) en sus tres componentes: la correlación lineal  $r$ , la tendencia  $\beta$  y la variabilidad  $\alpha$ , para el cálculo de la distancia euclidiana de estos al punto ideal. Este enfoque de descomposición permite “mejorar en gran medida nuestra comprensión del rendimiento general del modelo” y así, diseñar estrategias de evaluación que “apoyen adecuadamente la identificación de

modelos hidrológicamente consistentes” (Gupta, H. V. et al, 2009). Las ecuaciones que definen este índice y sus componentes son:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\alpha - 1)^2}$$

$$r = \text{coeficiente de correlación de Pearson}$$

$$\beta = \mu_{sim}/\mu_{obs}$$

$$\alpha = \sigma_{sim}/\sigma_{obs}$$
(4.17)

Donde  $\mu$  es el promedio y  $\sigma$  la desviación estándar. El KGE puede tomar valores desde  $-\infty$  a 1, donde 1 indica un perfecto desempeño del modelo. Según lo propuesto por Towner et al. (2019), se utilizan los siguientes términos para calificar el desempeño del modelo según el valor de KGE:

4. Bueno:  $KGE \geq 0,75$
5. Intermedio:  $0,75 \geq KGE \geq 0,50$
6. Pobre:  $0,50 \geq KGE \geq 0,00$
7. Muy pobre:  $KGE \leq 0,00$

Por su parte, el valor ideal para los tres componentes  $r, \beta, \alpha$  es de 1. Cabe mencionar que existe un método alternativo para el cálculo de  $\alpha$  propuesto por Kling et al. (2012), sin embargo, en este trabajo se seguirá el método antes planteado. (Kling, Fuchs, & Paulin, 2012)

Una vez obtenido el KGE para todos los perfiles de lago estudiados, se selecciona aquel perfil que tenga la mayor eficiencia para evaluar la incertidumbre del modelo.

#### 4.2.2. Sensibilización del hidrograma de salida del lago

Los parámetros de nivel de agua de vertedero y ancho de desagüe se varían usando el método de muestreo *Latin Hypercube Sampling* (LHS), que genera un muestreo aleatorio de valores entre 0 y 1 de dimensiones concordantes con el número de simulaciones que se desean modelar y con el número de parámetros a trabajar (en este caso dos). Dado un muestreo  $\alpha$ , se genera un vector de valores para ambos parámetros de acuerdo con la ecuación (4.18):

$$\theta_i = \theta_{min} + \alpha * (\theta_{max} - \theta_{min})$$
(4.18)

Donde  $\theta_{max} - \theta_{min}$  corresponde al rango de variación de cada parámetro, que para  $h_{vert}$  está dado por el error predictivo del modelo lineal usado para estimar  $h_{vert}$  (ver metodología en sección 4.1.2); mientras que para el ancho queda definido por “la precisión de la posición horizontal de Google Earth en áreas rurales” igual a 5m RMSE (Wirth, J. et al, 2015). Ambos rangos de variación fueron amplificados por 5. Se genera un muestreo de largo 500, por lo tanto, se realizan 500 simulaciones por lago. Los valores de KGE obtenidos se interpolan para construir un mapa de calor en función de los parámetros variados con el propósito de observar la distribución del índice en los rangos de sensibilización.

#### 4.2.3. Nivel de agua, Área superficial y RMSE

En esta etapa se usan las series de nivel de agua y área superficial resultantes de la simulación que usa la combinación  $h_{vert}$ -ancho que generan el mejor KGE. La precisión de las series simuladas es cuantificada usando el error cuadrático medio *RMSE* (en inglés *root mean square error*) con respecto al nivel de agua medido por las estaciones limnimétricas (Tabla 3.2) y al área superficial de la base de



datos Pre SWOT y el producto NDWI de los satélites Landsat 5 y 8. A continuación se explica la metodología seguida para estas dos fuentes de información.

- **Producto Pre SWOT**

Los productos de Pre SWOT, sólo disponibles para el lago Ranco, son descargados en formato netCDF y son trabajados en RStudio. En específico, se utilizan las bases de datos de series de tiempo de *Water Height* (m), *Water Area* (m<sup>2</sup>) y *Water Storage* (m<sup>3</sup>), donde los dos primeros son derivados de imágenes satelitales y el tercero es derivado de los anteriores, como se explica en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. En la Figura 4.9, se muestran los gráficos de las series de tiempo antes mencionadas:

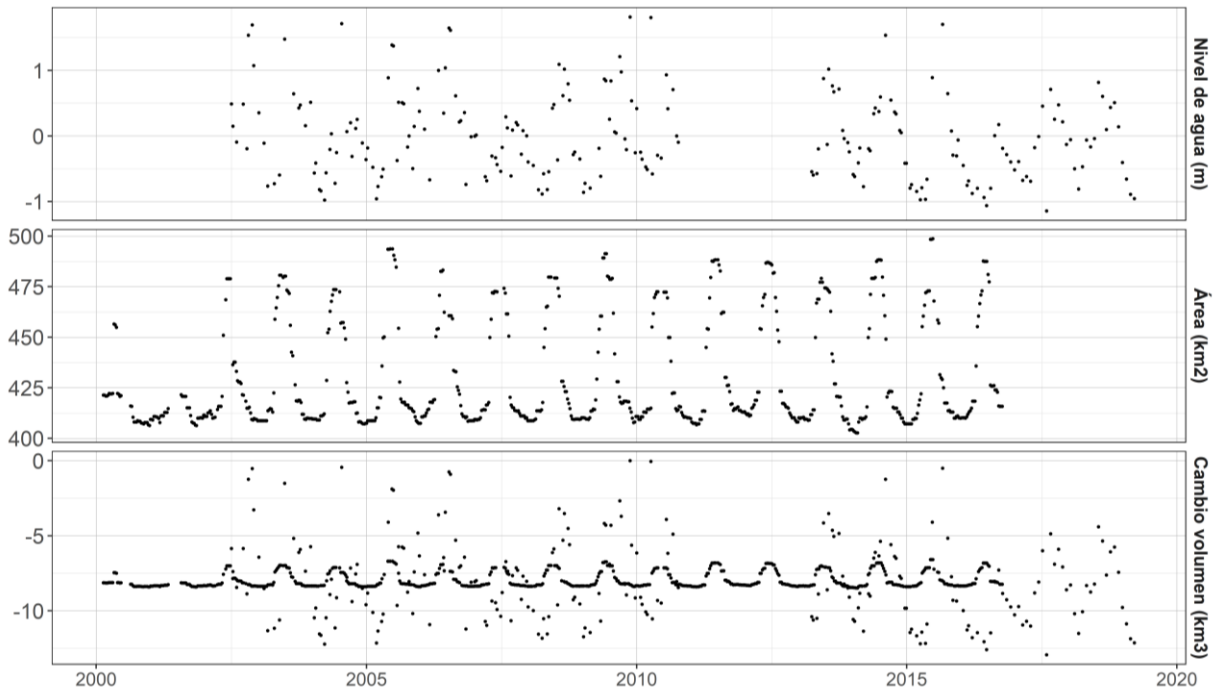


Figura 4.9: Series de tiempo resultantes de las bases de datos de Pre SWOT para el lago Ranco.

Dado que ya se tiene el valor del área del lago Ranco gracias a la digitalización de las cartas náuticas, es posible contrastar los resultados de Pre SWOT para su validación. Para el año del levantamiento hidrográfico, 2002, se observan áreas de entre 410 y 475 km<sup>2</sup>, rango dentro del cual se encuentra el área resultante de la digitalización. Por tanto, se determina factible usar la base de datos de SWOT para validar el desempeño del modelo VIC en el lago Ranco.

- **Producto NDWI Landsat 5 y 8**

Las imágenes del producto NDWI son descargadas mediante Google Earth Engine. En específico se descarga el producto que cuenta con imágenes cada 32 días, con un rango temporal de enero de 1994 a marzo de 2012 para Landsat 5 y de abril de 2013 a abril del 2020 para Landsat 8.

Se filtran las imágenes que presenten nubes en más del 15% del lago, en otras palabras, se busca trabajar con imágenes que presenten por lo menos el 85% de la información. Se ajusta un valor de NDWI, denominado umbral, usando como referencia el área obtenida a partir de las cartas náuticas (ver Tabla 3.3). Debido a que no se conoce el mes exacto en que se realizó el levantamiento

hidrográfico de las cartas, se trabaja con todas las imágenes tomadas el año del levantamiento (2002 para el Lago Ranco, 2005 para el lago Pihueico, ver Tabla 3.1). Se selecciona la imagen para la cual el umbral ajustado obtenga el área más cercana al área conocida. Este umbral será aplicado para el cálculo del área de toda la serie de imágenes.

Para una mejor precisión en el cálculo del área, se trabaja también con el producto NDWI (índice de vegetación de diferencia normalizada) cada 32 días de los mismos satélites. Este es utilizado para remover la parte de las imágenes asociadas a vegetación. Al igual que el NDWI, debe ser ajustado un umbral, para lo que se siguió el mismo procedimiento, i.e., se usan las imágenes del año del levantamiento hidrográfico. Una vez descartadas las zonas de vegetación según el umbral ajustado, se procede a calcular el área contando los pixeles que cumplen con el umbral determinado para NDWI.

Finalmente, el indicador *RMSE* se calcula usando la ecuación (4.19) que usa, a modo de ejemplo, el área superficial.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (A_{sim_i} - A_{obs_i})^2}{N}} \quad (4.19)$$

Donde *N* corresponde a la totalidad de valores,  $A_{sim_i}$  es el área simulada para el tiempo *i*,  $A_{obs_i}$  es el área observada que, para Ranco, corresponde a los valores diarios (*i* = diario) de la base de datos Pre SWOT y a los valores estimados por el producto NDWI de Landsat (*i* = cada 32 días), y para Pihueico, sólo a este último. El cálculo de *RMSE* es análogo para el nivel de agua del lago, en este caso con un tiempo *i* = diario. Un *RMSE* de 0 indica que los valores simulados y observados son iguales.

# Capítulo 5: Resultados

El presente capítulo expone los resultados obtenidos siguiendo la metodología propuesta. En primer lugar, se presenta los valores del nivel de agua de vertedero, parámetro necesario para la modelación en VIC. Posteriormente se presentan los valores que toma el índice KGE para las cuencas de entrada a los lagos, así como para las cuencas de salida. Para estas últimas, se exponen los resultados del análisis de sensibilización. Se finaliza este capítulo con la evaluación de la dinámica hidrológica de los lagos de estudio, que se enfoca en las variables nivel de agua y área superficial. Los resultados presentados en este capítulo y los datos empleados para configurar la modelación (e.g., batimetría digitalizada, forzantes, modelo VIC, etc.), se encuentran disponibles para su libre acceso a través del repositorio Zenodo (Cáceres et al., 2023).

## 5.1. Nivel de agua de vertedero

Para el lago Pihueico se obtiene una altura de 0.0596m medida desde la superficie del lago, lo que relativo a la profundidad máxima del lago resulta en un **nivel de agua de vertedero de 143,94m y un error de  $\pm 1,293m$**  como lo muestra el gráfico de la Figura 5.1 de distribución del error. Por su parte, el lago Ranco computa una altura de 0.0016m, la que relativizada a la profundidad máxima del lago resulta en un  $h_{vert} = 199,99m$  y un **error de  $\pm 1,242$**  tal como se observa en el gráfico de la Figura 5.2.

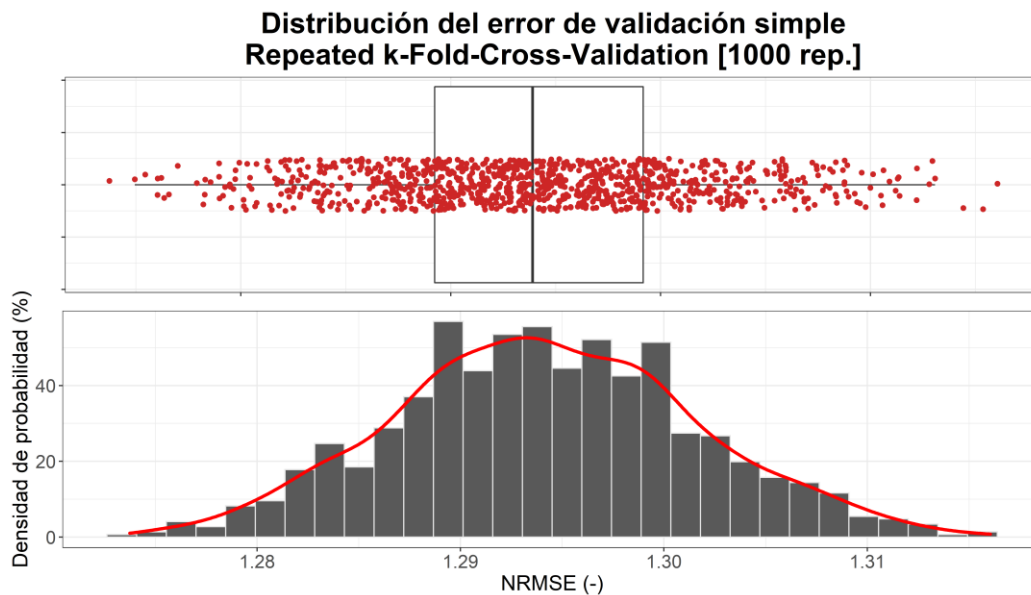


Figura 5.1: Distribución del error de la validación del modelo usando 1000 iteraciones, Lago Pihueico.

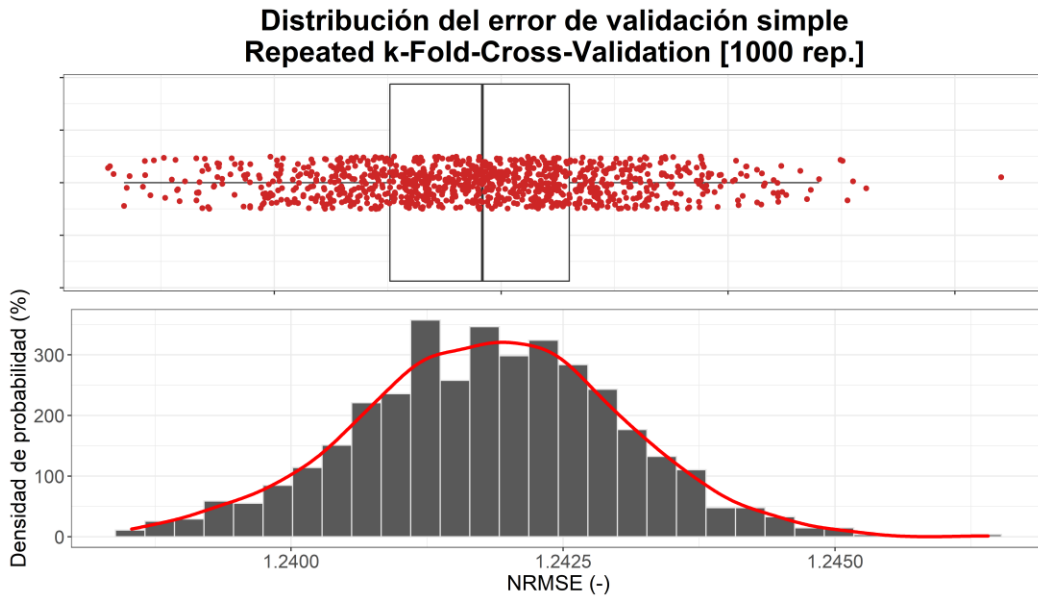


Figura 5.2: Distribución del error de la validación del modelo usando 1000 simulaciones, Lago Ranco.

## 5.2. Modelación en cuencas aguas arriba a lagos

La cuenca aguas arriba del lago Pihueico, Río Huahum en la Frontera, fue modelada usando los parámetros de modelación hidrológica de la cuenca que la contiene, Río Fuy en Desagüe Lago Pihueico, con los que se obtuvo un KGE igual a 0,5. Las series de tiempo usadas para el cálculo del KGE se muestran en la Figura 5.3 a continuación:

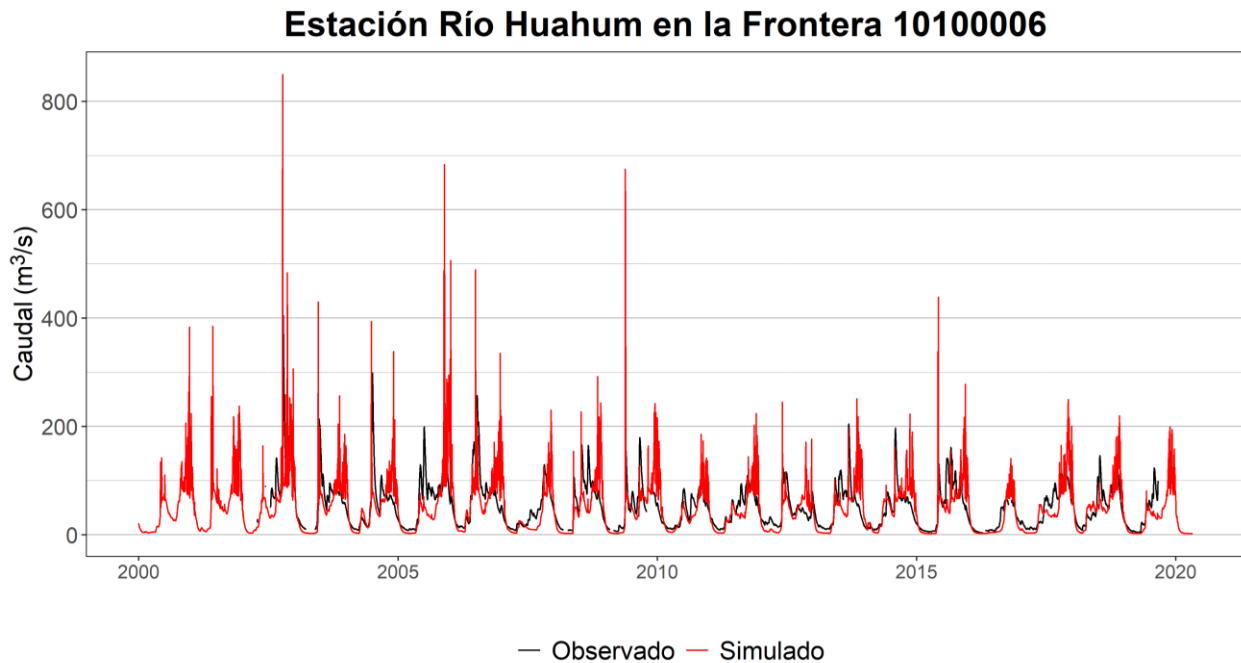


Figura 5.3: Series de tiempo caudal observado y simulado periodo 2002-2019, KGE = 0,5, Río Huahum en la Frontera (10600001).

Se observa una sobreestimación del caudal en los *peaks*, sobre todo en el segundo *peak* de cada año, correspondiente al caudal de deshielo, lo cual puede deberse a un exceso de nieve simulada. Como el

índice tiene un valor intermedio, se decide continuar a la modelación del lago sin ninguna modificación en su configuración.

Por otra parte, dos de las cuencas aguas arriba del lago Ranco son modeladas con parámetros calibrados para estas mismas, obteniendo un KGE de 0,46 para 10305001 Río Caunahue Camino a Llifén y de 0,64 para 10304001 Río Calcurrupe en Desembocadura, siendo esta última la de mayor superficie. La tercera cuenca, 10306001 Río Nilahue en Mayay, fue modelada con los parámetros de la subcuenca más cercana, correspondiente a 10304001. Esta última decisión se adopta luego de descartar los parámetros de la cuenca mayor, Río Bueno en Bueno por el bajo desempeño del modelo. Aun así, se obtiene un KGE de sólo 0,35. A modo de ejemplo, en la Figura 5.4 se muestra la curva de caudal observado y simulado para la cuenca Río Caunahue Camino a Llifén, la cual, como se indicó anteriormente, exhibe un bajo desempeño.

A diferencia de lo que ocurre en la cuenca del Río Huahum, la Figura 5.4 muestra que en la cuenca Río Caunahue Camino a Llifén el caudal está siendo subestimado por el modelo, específicamente en los *peaks* de la serie, los cuales están dados por eventos de precipitación. Esta subestimación se repite para las otras dos cuencas aguas arriba, con mayor o menor magnitud (reflejado en el KGE).

En línea con el párrafo anterior, la comparación entre el producto de precipitación del CR2MET y las estaciones meteorológicas de la zona de estudio (ver Anexo B) reflejan una subestimación de la precipitación en todos los meses del año. Por esta razón, se opta por aumentar la magnitud de esta forzante en un 20%, con lo que se logra obtener, como se muestra en la Tabla 5.1, un KGE clasificado como intermedio para las tres cuencas tributarias al lago Ranco.

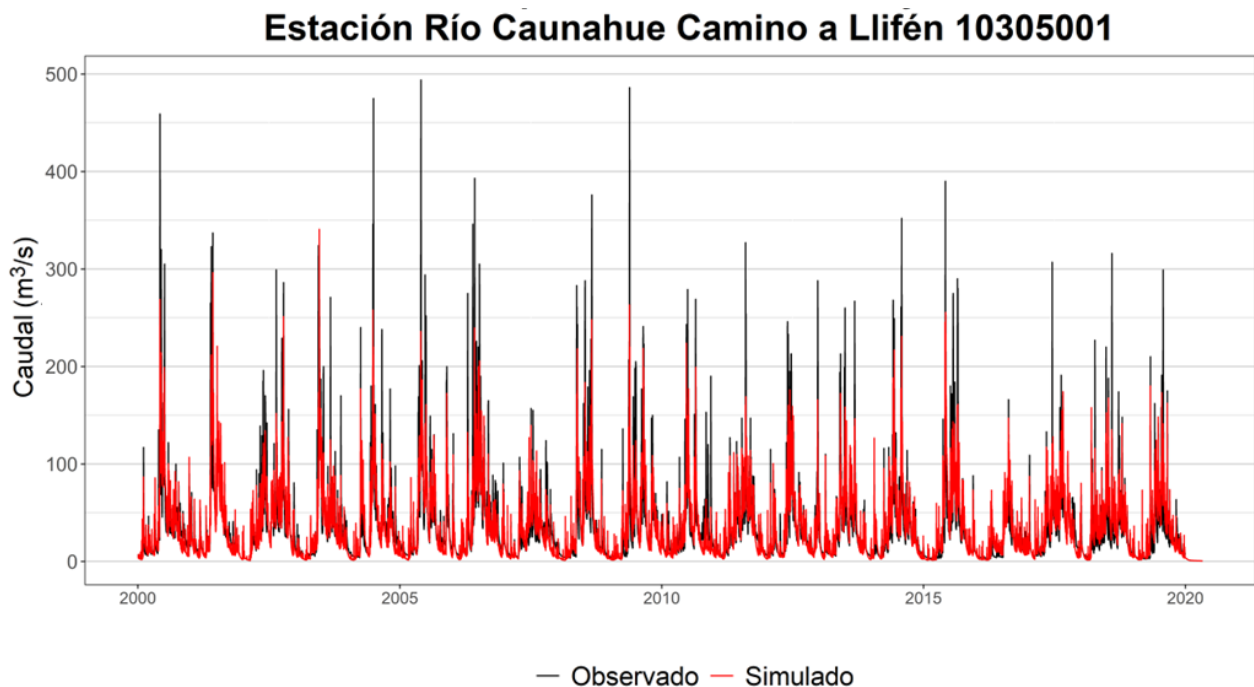


Figura 5.4: Series de tiempo caudal observado y simulado en el periodo 2000-2019, KGE = 0,67, Río Caunahue Camino a Llifén (10305001).

Tabla 5.1: Valores de KGE cuencas aguas arriba lagos.

	10100002	10304001	10305001	10306001
KGE, precipitación sin modificaciones	0,5	0,35	0,46	0,64
KGE, precipitación aumentada en un 20%	-	0,53	0,67	0,78

### 5.3. Modelación de lagos

Ambos lagos se modelan para los perfiles de 5, 10, 20, 25 y 50 nodos (ver sección 4.1.2) con el objetivo de conocer la variación en el desempeño del modelo según la discretización del perfil de profundidad y para posteriormente usar el mejor resultado para la evaluación de la incertidumbre del modelo. El nivel de agua inicial de la modelación se configura como la profundidad máxima de los lagos: 144 y 200 m para Pirihueico y Ranco respectivamente. El nivel de agua de vertedero se configura como el valor obtenido con el ajuste lineal  $\pm 0$ , lo que relativo a la profundidad máxima es de 143,94 y 199,99m respectivamente. El resto de los parámetros utilizados se detallan en la Tabla 4.2.

De este modo, a partir de simulaciones secuenciales diferenciadas sólo por la discretización del perfil de profundidad, se obtienen los valores de KGE resumidos en la Tabla 5.2. Se incluyen también los valores de los tres componentes del KGE: la correlación lineal  $r$ , la tendencia  $\beta$  y la variabilidad  $\alpha$ .

Tabla 5.2: Valores de KGE y sus componentes para cada perfil de lago. En verde el perfil con mejor KGE.

Lago	Nº nodos	KGE	$r$	$\beta$	$\alpha$
Pirihueico	5	0,585	0,617	1,139	1,079
	10	0,573	0,618	1,163	1,097
	20	0,572	0,618	1,165	1,099
	25	0,569	0,618	1,171	1,104
	50	0,570	0,618	1,169	1,102
Ranco	5	0,360	0,612	0,929	0,496
	10	0,359	0,612	0,927	0,494
	20	0,363	0,613	0,931	0,498
	25	0,363	0,613	0,932	0,499
	50	0,366	0,613	0,936	0,502

Se obtiene un KGE promedio de 0,57 para el lago Pirihueico y de 0,36 para el lago Ranco. Para este último, se desprende que sufrió un descenso en su valor con respecto a lo obtenido en las estaciones aguas arriba, con lo que el modelo no pasa el umbral de desempeño aceptable ( $KGE = 0,5$ ). Por otra parte, el modelo se evalúa con un desempeño intermedio para representar el lago Pirihueico, un valor que se encuentra por sobre el valor de KGE obtenido en la estación de entrada.

En cuanto a los componentes del KGE, el  $Q_{sim}$  en el lago Pirihueico presenta una baja correlación ( $r$ ) con el  $Q_{obs}$  en el control fluviométrico, siendo esta la gran falencia del modelo, ya que los otros dos componentes, tendencia ( $\beta$ ) y variabilidad ( $\alpha$ ), presentan valores aceptables (casi ideales en el caso de  $\alpha$ ). Lo mismo se observa para el caso del lago Ranco, pero a esto se le suma una mala representación de la variabilidad del caudal medido en la estación por parte del simulado por VIC.

El número de nodos provoca poca variación en el KGE y sus componentes, de hecho, el KGE para ambos lagos muestra una diferencia sólo a partir del 2do decimal mientras que las componentes a partir del 2do o 3ro. Por lo anterior, la elección del mejor perfil para el trabajo posterior resulta poco determinante en los futuros resultados; a pesar de esto, se opta por seleccionar el perfil con mejor KGE: 5 nodos para el Lago Pihueico y 50 nodos para el Lago Ranco. Las series de tiempo de caudales para los perfiles seleccionados se muestran en la Figura 5.5 y la Figura 5.6.

En la Figura 5.5 se observa que el modelo nuevamente sobreestima el caudal en la cuenca del lago Pihueico, pero comparando con lo obtenido en la estación aguas arriba del lago (Figura 5.3), esta vez la sobreestimación sólo ocurre con el caudal de deshielo. La Figura 5.6 muestra que en la cuenca del lago Ranco sigue notándose claramente una subestimación, sin embargo, esta vez –y como cuantifica el componente  $\alpha$  del KGE (Tabla 5.2), el  $Q_{sim}$  no representa la dispersión que siguen los caudales observados.

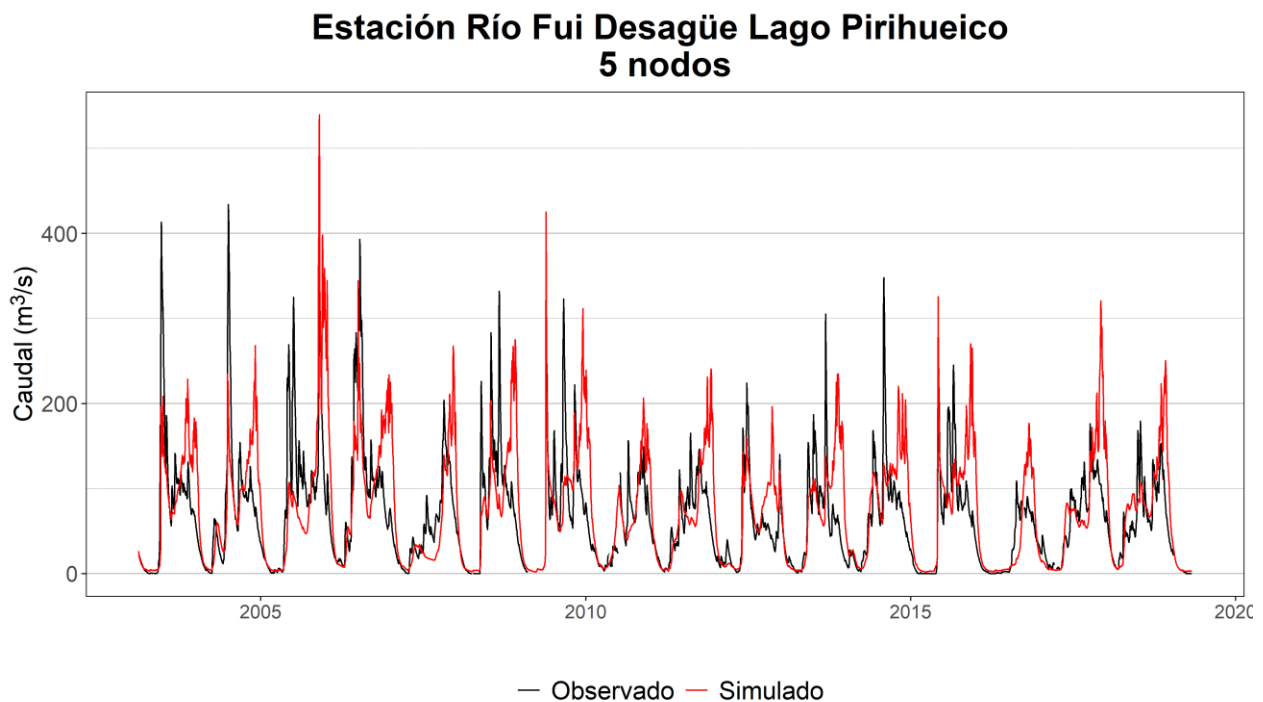


Figura 5.5: Series de tiempo caudal observado y simulado en el periodo 2003-2019, KGE = 0,44, Río Fuy en Desagüe Lago Pihueico (10100002).

## Estación Río Bueno en Bueno 50 nodos

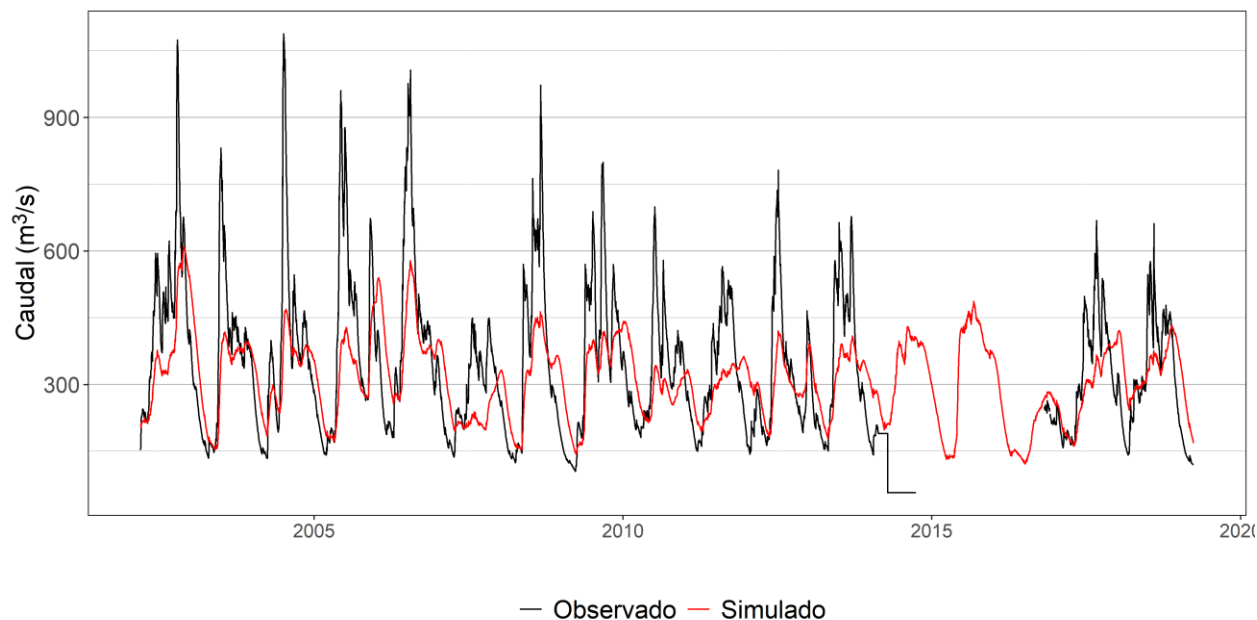


Figura 5.6: Series de tiempo caudal observado y simulado en el periodo 2002-2019, KGE = 0,36, Río Bueno en Bueno (10311001).

### 5.4. Sensibilidad en la modelación de lagos

Se evalúa la incertidumbre en la modelación de lagos mediante la variación de los parámetros nivel de agua de vertedero y ancho de desagüe en rangos especificados anteriormente (ver sección 4.2) y para 500 simulaciones. Los resultados son interpolados para construir un mapa de calor y contornos de la distribución del valor que toma el KGE del caudal simulado y el medido por los controles fluviométricos.

La Figura 5.7 muestra el mapa obtenido para el Lago Pirihueico. En esta se observa que, dentro del rango de variación de los parámetros dados al modelo, el KGE tiene un rango de 0,09 tomando valores desde 0,52 a 0,61. El máximo valor de KGE obtenido de las 500 simulaciones es de **KGE = 0,60 para  $h_{\text{vert}} = 137,590$  m y ancho = 104,331 m**, sector que se observa en el gráfico en color amarillo. Por otra parte, se desprende que los valores de  $h_{\text{vert}}$  y ancho configurados en la modelación original, se ubican en la zona de en medio, por lo que el análisis de incertidumbre expande los límites del KGE tanto hacia valores mejores como peores.

La Figura 5.8 muestra el mapa de calor para la cuenca del lago Ranco. El rango de variación del índice es de KGE = 0,14 con un mínimo de 0,29, para valores de ancho de entre 45-50 m, y un máximo de KGE = 0,43 producido para anchos mayores a 95 m aproximadamente. En específico, la simulación que maximiza el KGE tiene una configuración de  **$h_{\text{vert}} = 205,9$  m y ancho = 94,5 m**. La modelación original de la cuenca ubica su desempeño en la zona de en medio, por lo que el análisis de incertidumbre expande los límites del KGE tanto hacia valores mejores como peores. La Tabla 5.3 resume los valores de los parámetros de lagos sensibilizados que maximizan el valor del KGE para ambos sistemas de estudio.



### Mapa de calor KGE Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico - 5 nodos

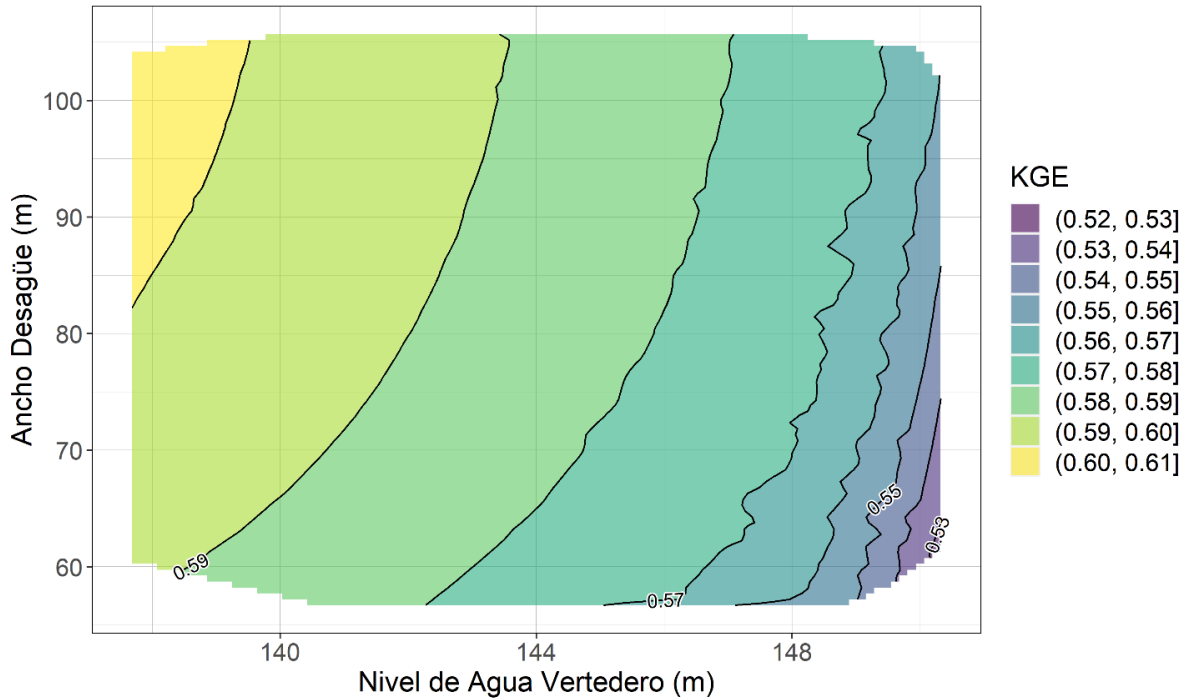


Figura 5.7: Gráfico de variación de KGE según parámetros del lago Pirihueico en el periodo 2003-2019, Río Fuy en Desagüe Lago Pirihueico (10100002).

### Mapa de calor KGE Río Bueno en Bueno - 50 nodos

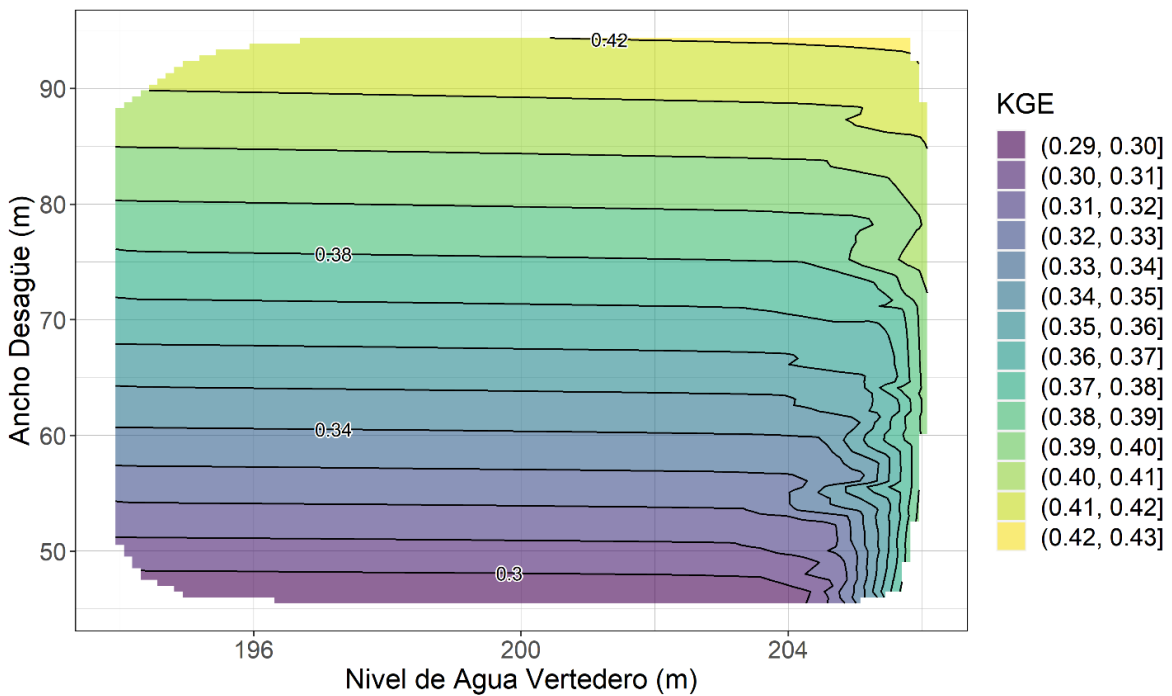


Figura 5.8: Gráfico de variación de KGE según parámetros del lago Ranco en el periodo 2002-2019, Río Bueno en Bueno (10311001).

Tabla 5.3: Valores parámetros del análisis de sensibilidad que maximizan el KGE.

	Nivel de agua de vertedero (m)		Ancho de desagüe (m)	
	KGE original	KGE maximizado	KGE original	KGE maximizado
<b>Lago Pihueico (5 nodos)</b>	143,94	137,6	81,2	104,3
<b>Lago Ranco (50 nodos)</b>	199,99	205,9	69,9	94,5

## 5.5. Evaluación de la dinámica hidrológica de lagos

Usando los resultados obtenidos de la simulación con mejor desempeño de las 500 simulaciones, se compara el nivel de agua simulado con las observaciones limnimétricas registradas por la DGA (Figura 3.14) relativizadas a la cota del limnómetro. La Figura 5.9 muestran los gráficos de serie de tiempo y variación estacional de las series de nivel de agua para el lago Pihueico (cota lago: 603 msnm). Asimismo, en la Figura 5.10 se muestran estos gráficos para el lago Ranco (cota lago: 72 msnm).

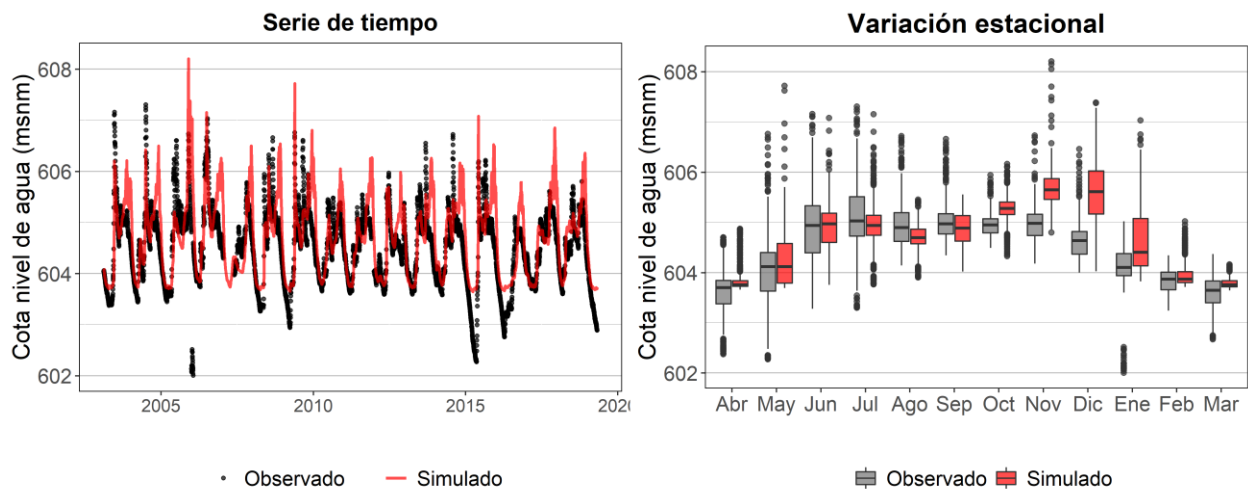


Figura 5.9: Serie de tiempo y variación estacional del nivel de agua del lago Pihueico en el periodo 2003-2019.

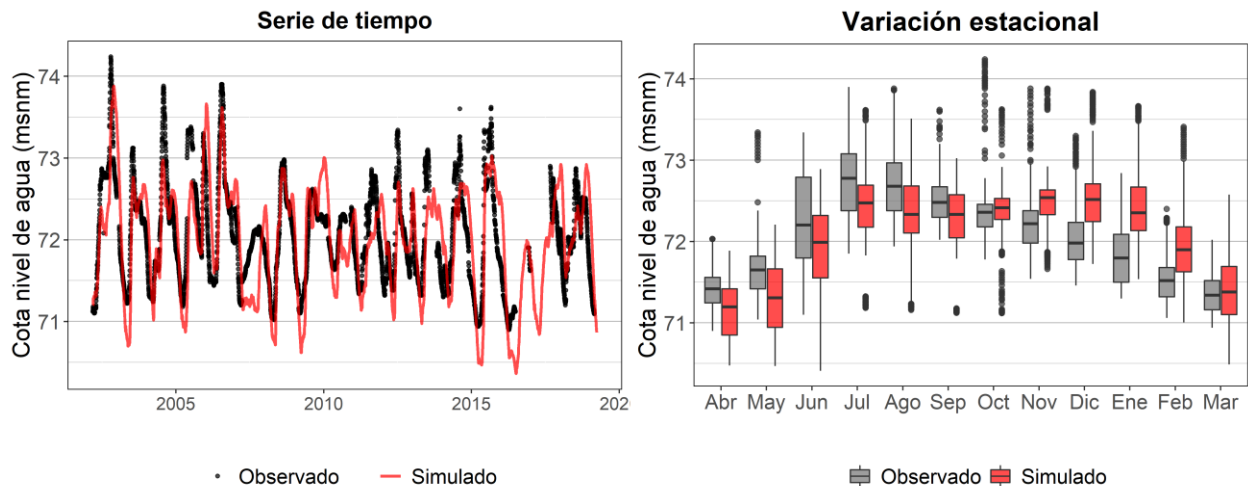


Figura 5.10: Serie de tiempo y variación estacional del nivel de agua del lago Ranco en el periodo 2002-2019.

La Figura 5.1 muestra los gráficos de dispersión de las variables observadas y simuladas para ambos gráficos. Finalmente, la Tabla 5.4 resume los valores que toman los indicadores estadísticos RMSE, KGE y componentes del KGE obtenidos de la comparación de ambas series para los lagos de estudio.

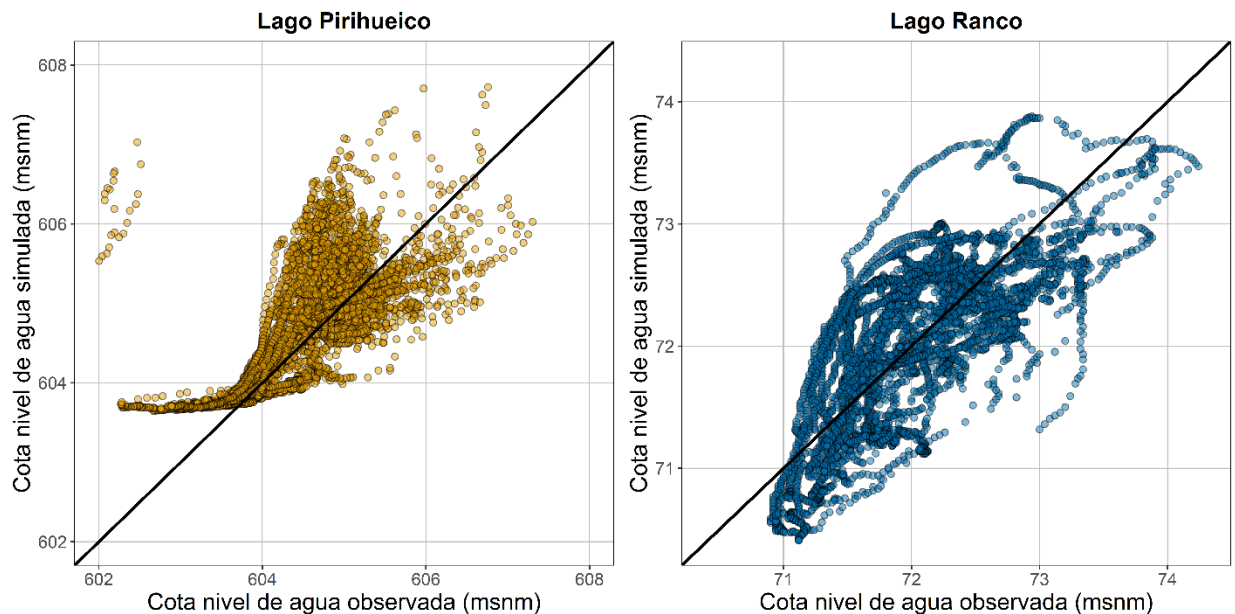


Figura 5.11: Gráficos de dispersión del nivel de agua observado vs. simulado para el lago Pirihueico (periodo 2003-2019) y lago Ranco (periodo 2002-2019). La línea negra corresponde a la recta de pendiente 1 e intersección 0.

Tabla 5.4: Indicadores estadísticos nivel de agua simulada vs. observada para los lagos de estudio.

Indicador	Lago Pirihueico	Lago Ranco
RMSE	0,59	0,47
KGE	0,73	0,72
$r$	0,73	0,73
$\beta$	1,00	1,00
$\alpha$	1,00	1,08

El área superficial simulada del lago Ranco se contrasta con la base de datos Pre SWOT y el producto NDWI de Landsat 5 y 8, los cuales también se comparan entre ellos (Figura 5.12). Mientras que para el lago Pirihueico, la serie simulada se compara sólo con este último (Figura 5.13). La Tabla 5.5 resume los valores obtenidos para RMSE, KGE y sus componentes, y la Tabla 5.6 los valores de los umbrales de NDWI y NDVI.

Tabla 5.5: Indicadores estadísticos área superficial simulada vs. otras fuentes de información.

Indicador	Lago Pirihueico (simulado - NDWI)	Lago Ranco (simulado - NDWI)	Lago Ranco (simulado - Pre SWOT)	Lago Ranco (Pre SWOT - NDWI)
RMSE	54,39	140,06	36,85	150,16
KGE	-0,46	-0,54	-0,58	-0,13
$r$	0,00	-0,17	-0,23	0,21
$\beta$	0,62	0,89	1,06	0,83
$\alpha$	0,00	0,00	0,01	0,20

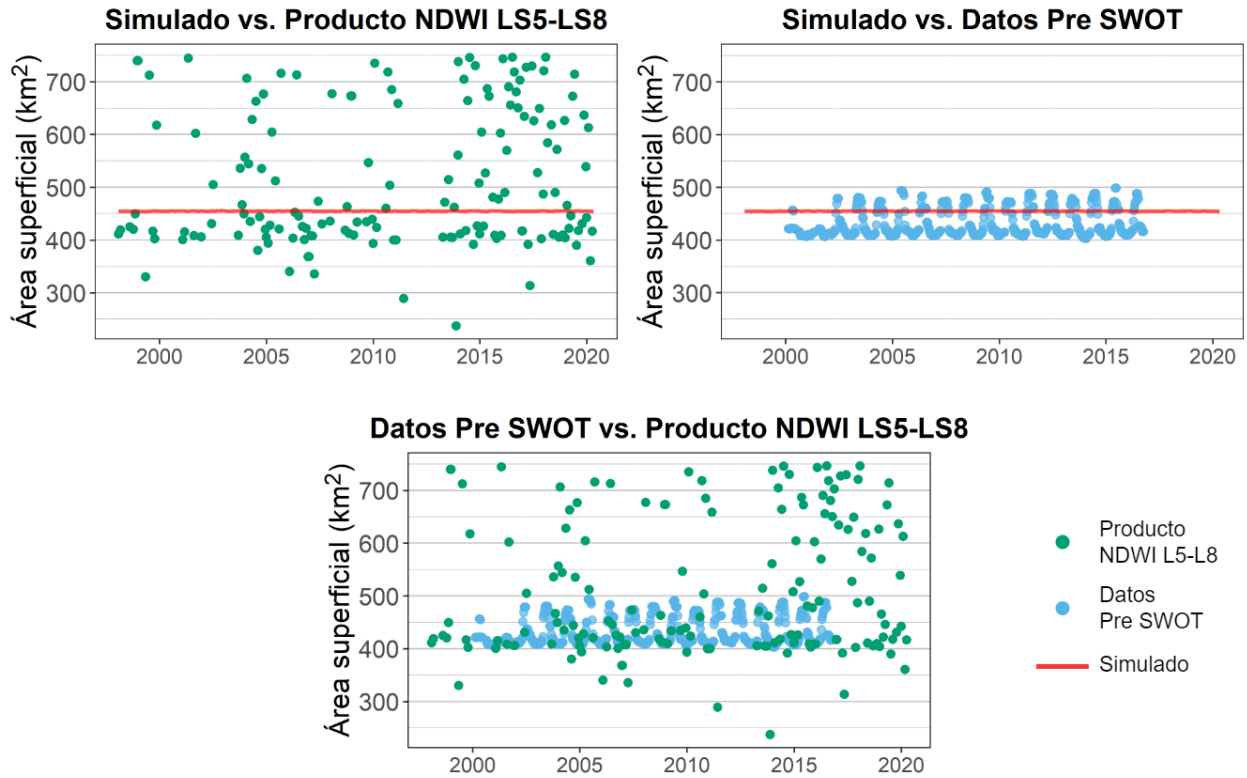


Figura 5.12: Series de tiempo área superficial lago simulada, de base de datos Pre SWOT y del producto NDWI de Landsat 5 y 8, periodo 1998-2019, lago Rancho.

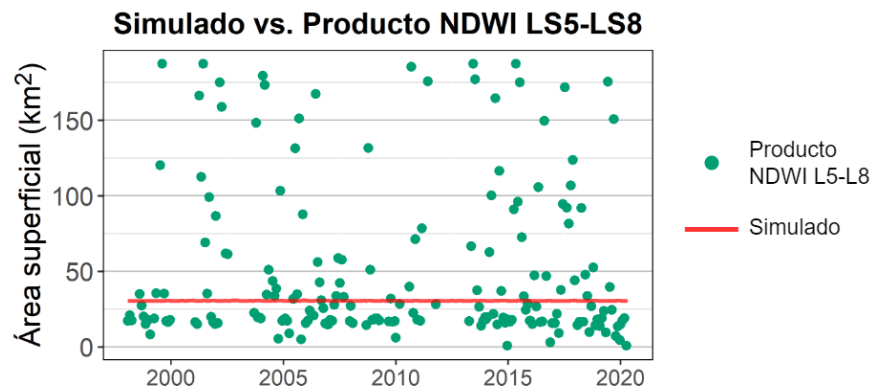


Figura 5.13: Series de tiempo área superficial lago simulada y del producto NDWI de Landsat 5 y 8, periodo 1998-2019, lago Pihueico.

Tabla 5.6: Umbrales de NDWI y NDVI utilizados en el procesamiento de los productos de Landsat 5 y 8.

Índice	Lago Pihueico	Lago Rancho
NDWI	0,0425	0,0425
NDVI	0,07	0,2

# Capítulo 6: Discusiones

La modelación de las cuencas aguas arriba del lago Ranco obtuvieron un bajo desempeño de acuerdo a lo reflejado en el índice KGE (Tabla 5.1). Sin embargo, las series de tiempo de estas cuencas (Figura 5.4) muestran que, en específico, el modelo no logra representar los *peaks* de caudal producidos por eventos de precipitación y deshielo. Por esto, se sugiere una modificación de la forzante de precipitación del producto CR2MET v2.5 que se condice con los resultados obtenidos del análisis de este producto (Anexo B), del que se desprende que la precipitación de CR2MET v2.5 está subestimada en casi todos los meses del año con respecto a las estaciones meteorológicas emplazadas en la cuenca en que se anida el lago Ranco. Lo anterior también sucede en las estaciones meteorológicas cercanas al lago Pihueico, sin embargo, la modificación de la forzante de precipitación decidió realizarse solamente en el caso de que el KGE obtenido no fuese aceptable (la estación de entrada del lago Pihueico, Río Huahum en La frontera tuvo un  $KGE = 0,5$ ) y hasta que la magnitud de la variable lograra un KGE aceptable.

Dos cuencas de entrada no cuentan con parámetros calibrados para las mismas: Río Huahum en la Frontera, donde fueron utilizados los de la cuenca que la contiene (Río Fuy en Desagüe Lago Pihueico), y Río Nilahue en Mayay, donde se utilizaron los de la cuenca de entrada más próxima debido a que los parámetros de la cuenca mayor (Río Bueno en Bueno) resultan en un peor desempeño del modelo en comparación. A lo anterior se suma que la calibración de los parámetros hidrológicos de las cuencas de entrada realizadas en el estudio DGA (2022) se realizó en base al conjunto de parámetros calibrados con los registros fluviométricos asociados al punto de salida de la cuenca que las contiene, no a la cuenca misma. Por lo anterior, se observa un potencial de mejora en esta materia.

La selección de las cuencas de estudio estuvo fomentada por la presencia de estaciones fluviométricas aguas arriba del lago. Si bien la modelación de las cuencas asociadas a estas estaciones permitió realizar modificaciones que mejoraron el desempeño del modelo, esto se pudo haber realizado simplemente con el análisis de las forzantes y las estaciones meteorológicas. Por lo anterior, lo realizado en el presente estudio puede aplicarse sin problemas a lagos que presentan control fluviométrico sólo en su salida (22 lagos en el país).

La cuenca en que se anida el lago Pihueico obtiene un desempeño aceptable, mientras que la del lago Ranco un desempeño deficiente (Tabla 5.2). Considerando que el lago Ranco representa casi un 11% de la superficie de su cuenca vs. el 2% que ocupa el lago Pihueico en la suya, se podría pensar que el desempeño aceptable del modelo en este último se debe a que los parámetros utilizados se emplazan en una condición muy similar a la que fueron calibrados. Sin embargo, se deben considerar dos factores: i) la cuenca Río Fuy en Desagüe Lago Pihueico presenta otro lago aguas arriba del lago Pihueico de área similar y, que el  $Q_{obs}$  medido por la estación fluviométrica está supeditado al efecto de escorrentía tardía del lago, y ii) no se puede afirmar que los parámetros representen el efecto del lago, el desempeño aceptable del modelo puede haber ocurrido por múltiples razones, entre ellas, una mera coincidencia.

Es interesante notar la poca variación que provoca el número de nodos en el KGE y sus componentes. De hecho, el KGE para ambos lagos muestra una diferencia sólo a partir del 2do decimal, y las componentes a partir del 2do o 3ro. Lo anterior se acentúa más en el lago Ranco, con una diferencia de 0,008 entre el máximo y el mínimo. A esto se suma que no existe una similitud en los valores obtenidos entre ambos lagos (e.g. aumenta/disminuye valor del KGE con el número de nodos), por lo que no es posible concluir al respecto. Con esto, el número de nodos es poco determinante en la modelación de lagos en VIC y, se podría generalizar que la morfología de un lago no afecta mayormente en su balance másico.

La inclusión del lago en la modelación produce una baja de rendimiento en los parámetros calibrados, puesto que los valores de KGE resultantes (Tabla 5.2) son menores con respecto a los obtenidos en la modelación sin lagos (Tabla 3.5) realizada por el estudio DGA (2022). Se deduce que los parámetros calibrados por dicho estudio reducen su rendimiento con la presencia de lago, lo que implica a su vez, que el efecto del lago en la hidrología de la cuenca (retardo en la escorrentía por almacenamiento, altos valores de evaporación, etc.) fue compensado en la modelación del estudio por los parámetros de la misma resultando, potencialmente, en valores sesgados y poco realistas. Queda propuesto calibrar los parámetros de modelación considerando la presencia de lagos, puesto que se puede asegurar que se obtendrán mejores resultados.

En cuanto al análisis de sensibilización, se observa que para el lago Pirihueico (Figura 5.7) el modelo es más sensible al parámetro  $h_{vert}$  que al ancho de salida, dado que las líneas de contorno del KGE tienen una pendiente muy alta. Estas líneas se muestran menos erráticas con el aumento del índice. Por otra parte, se podría esperar maximizar el KGE al disminuir  $h_{vert}$  bajo los 139m, sin embargo, este parámetro está limitado por la profundidad del río de desagüe ya que, si  $h_{vert}$  es menor, el lago no generaría escorrentía de salida. Por lo anterior, no es hidrológicamente recomendable modificar los parámetros de lago para mejorar el desempeño del modelo, más bien, se debe seguir una metodología alternativa o complementaria a la presentada para llegar a un valor de KGE más adecuado.

El lago Ranco muestra resultados opuestos: la variación de  $h_{vert}$  juega un papel de pequeño a nulo en la sensibilidad del modelo, esto queda más claro al observar las líneas de contorno del KGE, que son casi perpendiculares al ancho del desagüe y que van tomando una pendiente negativa a infinita cuando  $h_{vert} = 205$  m aproximadamente (Figura 5.8). Como  $h_{vert}$  no tiene limitaciones para su aumento, queda propuesto observar la distribución del KGE a mayores valores del parámetro. Por el contrario, no es recomendable buscar mejores valores de KGE aumentando el ancho de desagüe dado que anchos de desagüe fuera del rango evaluado no se corresponden con la hidrografía del lugar.

Considerando los mapas de calor de ambos lagos, el único patrón o similitud que puede extraerse es que un aumento del ancho de desagüe se relaciona con el aumento del KGE, pero este aumento está limitado por la hidrografía del lugar. Además, este parámetro es de proporción directa al flujo superficial (ecuación (4.10)), pero los caudales son sobreestimados en la cuenca del lago Pirihueico y subestimados en la cuenca del lago Ranco, con lo cual se deduce que el desempeño del modelo decae producto de la escorrentía (ecuación (4.11)), que no depende del ancho de desagüe.

En los gráficos de variación del nivel de agua del lago Ranco (Figura 5.10) se encuentra la respuesta a la particular distribución que tiene el KGE en el análisis de sensibilización (Figura 5.8). En primer lugar, se observa que el modelo funciona mejor para valores altos de  $h_{vert}$ , es decir, para cuando existe menos margen de flujo o carga del vertedero. Las ecuaciones (4.10) y (4.11) muestran una proporción directa de la carga de vertedero con el caudal de salida, sin embargo, este último es subestimado, por lo que se podría inferir que el modelo funciona mejor cuando se suponen condiciones para una baja escorrentía. En segundo lugar, relativizando los niveles de agua de vertedero sensibilizados a la cota del lago, se tiene que un  $h_{vert} = 205$  m se ubica a 69 msnm, lo que se encuentra por debajo del rango de variación del nivel de agua, que tiene una cota mínima de 70 msnm aprox. (ver Figura 5.10). Por esto, el  $h_{vert}$  debiese tomar valores dentro del rango de variación del nivel de agua del lago (o uno cercano al nivel de agua mínimo) para sensibilizar al modelo, e incluso, para mejorar su desempeño.

El modelo es capaz de representar adecuadamente la variación del nivel de agua de los lagos, lo cual se cuantifica en los índices KGE y RMSE (Tabla 5.4). Para el lago Pirihueico, el modelo presenta un menor desempeño en los meses de deshielo, sobreestimando el nivel de agua (Figura 5.9). En el lago Ranco se subestiman los niveles extremos ocurridos en invierno y verano (serie de tiempo Figura 5.10) y se

observa una representación errónea de la estacionalidad (variación estacional Figura 5.10). Esto último se condice con el valor del componente  $\alpha$  del KGE el que, sin embargo, es un valor muy cercano al ideal. Lo anterior queda mucho más claro en los gráficos de dispersión de la Figura 5.11, de los que se desprende que el modelo sobrestima disminuye su desempeño al computar los niveles de agua bajo, sobrestimándolos para el lago Pihueico y a la inversa para el lago Ranco.

En cuanto al área superficial, para ambos lagos se observa que la serie simulada presenta variación casi nula a lo largo del tiempo (Figura 5.12 y Figura 5.13). Esto podría atribuirse a la topografía del lugar, sin embargo, de acuerdo con lo descrito en la sección 2.1, los lagos se caracterizan por presentar una variación estacional en el nivel de agua, lo que se traduce en una variación estacional del área superficial que no se observa en los gráficos obtenidos. A lo anterior se suman los testimonios recopilados en terreno, que mencionan un cambio en el radio de ambos lagos durante el año, con *peaks* en marzo y julio. A pesar de esto, debido a que no se cuenta con registros in situ de esta variable, no es posible ser concluyentes sobre la capacidad del modelo de representarla.

La variación estacional del área superficial sí se muestra en las curvas generadas con la base de datos Pre SWOT y con el producto NDWI de Landsat 5 y 8, sin embargo, no se puede evaluar su utilidad para estimar el espejo de agua de sistemas lacustres debido a que el área superficial simulada presenta posibles limitaciones según lo mencionado anteriormente. Además, en el caso del producto NDWI, algunos valores indican que los lagos duplican su área (con respecto al área obtenida de las cartas náuticas, ver Tabla 3.3) lo cual no es correcto. Los umbrales usados para el cálculo del área con este producto (Tabla 5.6) fueron obtenidos mediante un ajuste del índice, proceso de alta sensibilidad en que un pequeño cambio en la magnitud del umbral produce valores de área totalmente distintos. Por lo mismo, resulta importante apoyarse en el producto NDVI para descartar zonas de vegetación que, por su alto contenido de humedad, pueden ser consideradas como agua en la firma espectral del NDWI, más aun teniendo en cuenta el clima de las cuencas de estudio. Con esto, la dispersión y magnitud de la variación del área superficial pueden deberse a la sensibilidad del ajuste del índice y a la humedad del lugar.

Finalmente, es importante recalcar que sólo veintidós lagos en Chile poseen control fluviométrico en su salida. Y, si bien los lagos Ranco y Pihueico cuentan con fuentes de información suficientes para modelar en VIC, estas no están disponibles para todos los lagos del país, existiendo una falta de información satelital, y de información en general, que impide la aplicación de metodologías de enfoque en múltiples fuentes para la obtención de las variables de lagos requeridas por VIC.

# Capítulo 7: Conclusiones

En el presente trabajo se usa el modelo Variable Infiltration Capacity (VIC) y su componente de lagos para modelar las cuencas Río Bueno en Bueno y Río Fuy en Desagüe Lago Pirihueico, ambas con presencia de lagos (lago Ranco y lago Pirihueico respectivamente). El caudal simulado en la salida de las cuencas es comparado con el caudal observado por las estaciones fluviométricas mediante el índice KGE con el objetivo de evaluar el desempeño predictivo del modelo, para luego evaluar la incertidumbre en la estimación de los hidrogramas de salida mediante la sensibilización de los parámetros de lago de nivel de agua de vertedero y ancho de desagüe.

El modelo VIC logra un desempeño de bajo a aceptable en la modelación de los lagos y, con esto, los parámetros calibrados sin considerar la presencia de lagos reducen en gran medida su rendimiento. Se deduce que el efecto de los lagos en la hidrología de las cuencas es compensado por los parámetros y, por tanto, los resultados obtenidos pueden estar potencialmente sesgados y no representar la hidrología de la cuenca correctamente. Si bien en este estudio no se calibran los parámetros considerando la presencia de lagos, se deduce un gran potencial de mejora en la modelación de cuencas con lagos en VIC.

La metodología seguida permitió concluir sobre la utilidad en la precisión del cálculo de ciertos parámetros del módulo de lagos. En primer lugar, se concluye que el número de nodos es poco determinante en la modelación de lagos en VIC, por tanto, la morfología de un lago no afecta el balance másico de acuerdo con este modelo. Tampoco resulta necesario trabajar con las cuencas de entrada de lagos, sin embargo, con su uso se desprende la recomendación de ajustar las forzantes utilizadas a las estaciones meteorológicas emplazadas en la zona de estudio. Finalmente, el modelo es sensible al ancho de desagüe y a la altura de vertedero, siendo este último de difícil obtención, sin embargo, este valor puede ser fijado como el nivel de agua de la superficie (i.e. profundidad máxima del lago) en un momento cualquiera.

Por otra parte, el modelo logra un buen desempeño en la representación de la variación del nivel de agua de los lagos. Lo contrario ocurre con el área superficial puesto que la serie simulada no presenta la variación estacional mencionada en la literatura y confirmada con testimonios en terreno. Sin embargo, esta información no es suficiente para concluir al respecto, debido a que no se cuenta con mediciones in situ de esta variable y que los productos de área superficial analizados no son concluyentes.

A continuación, se profundizan las conclusiones para tres temáticas de relevancia.

## 7.1. Desempeño del modelo

La modelación arroja un KGE máximo de 0,58 para el lago Pirihueico utilizando un perfil de lago de 5 nodos, mientras que para el lago Ranco el valor máximo obtenido fue de 0,37 para un perfil de 50 nodos. Como se menciona anteriormente, el número de nodos no representa una decisión metodológica relevante para el desempeño del modelo.

En cuanto a la sensibilización del nivel de agua de vertedero y el ancho del desagüe, las distribuciones de KGE obtenidas para el lago Pirihueico muestran una baja influencia del ancho de desagüe en el desempeño de la estimación del hidrograma de salida. El mismo comportamiento es observado para el lago Ranco, pero con respecto al nivel de agua de vertedero. Esta divergencia permitió analizar de mejor



forma el comportamiento y las ecuaciones que definen el módulo de lagos concluyendo que el modelo funciona mejor cuando se suponen condiciones para una baja escurrentía y, por tanto, la altura de vertedero debiese tomar valores dentro del rango de variación del nivel de agua del lago, de forma de disminuir la carga del vertedero. Por otro parte, si bien el aumento del ancho de desagüe se relaciona con el aumento del KGE (de acuerdo con lo observado en este trabajo), no tiene influencia en la escurrentía y su potencial está limitado por la hidrografía del lugar.

El modelo es capaz de representar adecuadamente la variación del nivel de agua de los lagos, llegando a un KGE de poco más de 0,7 para ambos lagos. Se identifica que este no llega a ser ideal debido a que, a niveles de agua bajo, el modelo pierde precisión, y, en el caso del lago Rancho, el modelo presenta dificultades con la estacionalidad de la serie. Por otra parte, el modelo no representa la variación de área superficial de los lagos, sin embargo, debido a falta de información observada, no es posible determinar al respecto.

## **7.2. Generalización de la metodología**

Extender la metodología planteada de modelación de lagos en VIC a lagos semi controlados, no controlados o con poca información en general, requiere en primera instancia plantear estrategias para la obtención de los parámetros requeridos por VIC (ver Tabla 4.1). De acuerdo a los resultados obtenidos, basta conocer cinco puntos de nivel de agua y fracción de área, de los que el primero (fracción de área igual a 1) y el último (fracción de área igual a 0) pueden ser obtenidos conociendo la profundidad del lago en un cierto momento. Para ese mismo momento, se referencia el nivel de agua y área a una imagen de un producto satelital NDWI o de un radar de altimetría. Sirviéndose de la variabilidad estacional del nivel de agua en lagos, se obtiene la altimetría y área en tres momentos equidistantes al primero. Los puntos pueden interpolarse para obtener nodos mejor distribuidos.

El control fluviométrico en la entrada de los lagos es de baja a nula relevancia, por lo que lagos con control en su salida pueden modelarse en VIC siguiendo la metodología de este informe y lo recién planteado.

Lagos sin control fluviométrico en su salida pueden obtener los parámetros de modelación hidrológica mediante la calibración de la cuenca sin considerar la presencia del lago, los que debiesen incluirse de manera temporal y ser validados más adelante. El nivel de agua de vertedero puede definirse como el nivel de agua de la superficie del lago o modificarla en un rango adecuado a la hidrografía del lugar. Sin embargo, no es posible validar esta metodología sin un estadístico de ajuste de bondad, por lo cual se propone buscar una relación empírica entre los niveles de agua de vertedero de lagos controlados que sea extrapolable a otros lagos.

## **7.3. Trabajo futuro**

Se propone como trabajo a futuro realizar una calibración de los parámetros de modelación hidrológica que incluya explícitamente el efecto de los lagos en las cuencas, y comparar el desempeño en la estimación del hidrograma de salida con el obtenido en este trabajo para cuantificar así la utilidad de considerar la presencia de lagos en esta etapa de la modelación.

El presente trabajo comprueba que el módulo de lagos de VIC es implementable, al menos, mediante una modelación secuencial dividida en etapas y que, además, puede extenderse a lagos controlados sólo

aguas abajo. El principal desafío a futuro recae en aquellos lagos sin control en su salida, por lo que se espera contar con mayores fuentes de monitoreo in situ y remoto del nivel de agua para todos los lagos del país, promoviendo así su inclusión no sólo en este modelo, sino que en todo tipo de estudios hídricos. Proyectos en curso como el del satélite SWOT, lanzado a órbita en diciembre del 2022 (NASA, 2022) y que entregará variaciones del nivel de agua, área y almacenamiento de lagos, permitirán tener un mejor entendimiento de la dinámica de lagos y realzar su importancia en la hidrología de cuencas.

Finalmente, debido al rol crucial que juegan los lagos, y considerando su alta sensibilidad a las condiciones climáticas e hidrológicas, resulta fundamental considerar la presencia de lagos en el estudio de cuencas, así como aumentar el monitoreo de sus características morfológicas (nivel de agua, área superficial y volumen), para así obtener un panorama realista de la disponibilidad del recurso hídrico y de los efectos del cambio climático en este.

# Bibliografía

- Anguita, D. et al. (2012). The 'K' in K-fold Cross Validation. *European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning*. Brujas.
- Birkett, C. M. (1995). Contribution of TOPEX/POSEIDON to the global monitoring of climatically sensitive lakes. *Journal of Geophysical Research: Oceans, Volume 100, Issue C12*, 25179-25204.
- Boisier, J. P., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., & Rondanelli, R. (2018). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, (pág. 19739).
- Bowling, L., & Lettenmaier, D. (2009). Modeling the Effects of Lakes and Wetlands on the Water Balance of Arctic Environments. *Journal of Hydrometeorology*, vol. 11, issue 2, 276-295.
- Cáceres, J., Muñoz-Castro, E., & Vargas, X. (2023). *A database for VIC lake modelling in two testbed catchments in Southern Chile*. Obtenido de <https://doi.org/10.5281/zenodo.7864766>
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing, Fifth Edition*. Nueva York: The Guilford Press.
- CR2. (s.f.). *Productos grillados*. Obtenido de Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2: <https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>
- Crawford, H. H., & Linsley, R. K. (1966). Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV. *Technical Report No. 39, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford*.
- Cretau, J., Calmant, S., Abarca-del-Río, R., Kouraev, A., Bergé-Nguyen, M., & Maisongrande, P. (2011). Lakes Studies from Satellite Altimetry. In S. Vignudelli, A. G. Kostianoy, P. Cipollini, & J. Benveniste, *Coastal Altimetry* (pp. 509-533).
- Crétau, J.-F., Abarca-del-Río, R., Bergé-Nguyen, M., Arsen, A., Drolon, V., Clos, G., & Maisongrande, P. (2016). Lake Volume Monitoring from Space. *Surveys in Geophysics*, 269--305.
- Dembélé, M., Ceperley, N., Zwart, S., Salvadore, E., Mariethoz, G., & Bettina, S. (2020). Potential of satellite and reanalysis evaporation datasets for hydrological modelling under various model calibration strategies. *Advances in Water Resources vol. 143*.
- DGA. (2000). *Estudio Limnológico de los Lagos Neltume y Pirehueico, SIT N°61*. Valdivia, Chile. Elaborado por Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile: Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación.
- DGA. (2017). *Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile: Realizado por Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.
- DGA. (2018). *Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro, SIT N° 435*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios Planificación, Santiago, Chile: Realizado por Fundación para la Transferencia Tecnológica y Pontificia Universidad Católica de Chile.
- DGA. (2019a). *Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas sur y parte norte de la macrozona austral, SIT N° 441*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile: Elaborado por Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- DGA. (2019b). *Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de la parte sur de la macrozona austral e Isla de Pascua, SIT N° 444*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile: Elaborado por Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- DGA. (2020). *Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la Cuenca del Maule*. Santiago: Ministerio de Obras

Públicas.

- DGA. (2022, en prensa). *Homologación del cálculo hidrológico para la estimación de la oferta natural de agua histórica y futura en Chile. SIT N° 524. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación.* Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile: Elaborado por Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Dinka et al. (2014). Hydrologic modelling for Lake Basaka: Development and application of a conceptual water budget model. *Environmental Monitoring and Assessment* 186(9).
- Donigian, A., & Imhoff, J. (2006). *History and Evolution of Watershed Modeling Derived from the Stanford Watershed Model.* Florida.
- Gao, B.-c. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, vol. 58, issue 3, 257-266.
- Gao, H. et al. (2010). *Water Budget Record from Variable Infiltration Capacity (VIC) Model.* Seattle, Princeton.
- Gayathri, K. D., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, vol. 4, 1001-1007.
- Gupta, H. V. et al. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2), 80-91.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J. et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* Volume 146, Issue 730, 1999-2049.
- Hostetler, S., & Bartlein, P. (1990). Simulation of Lake Evaporation With Application to Modeling Lake Level Variations of Harney-Malheur Lake, Oregon. *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 10, 2603-2612.
- Jorquera, E. et al. (2012). *Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada.* Buenos Aires.
- Kling, H., Fuchs, M., & Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 264-277.
- Liang, X. et al. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 99, issue D7, 14415-14428.
- Lintz, J., & Simonett, D. S. (1976). *Remote sensing of environment.* Reading, Massachusetts.
- Mendez, J. et al. (1998). Evapotranspiration from a wetland complex on the Arctic coastal plain of Alaska. *Nord. Hydrol*, 303-330.
- Musa, Z. N. et al. (2015). *A review of applications of satellite SAR, optical, altimetry and DEM data for surface water modelling, mapping and parameter estimation.* Hydrol. Earth Syst. Sci., 19, 3755-3769, 2015.
- NASA. (17 de diciembre de 2022). *NASA Launches International Mission to Survey Earth's Water.* Obtenido de SWOT: <https://swot.jpl.nasa.gov/news/81/nasa-launches-international-mission-to-survey-earths-water/>
- NASA. (s.f.). *MODIS Land Surface Temperature and Emissivity (MOD11).* Obtenido de Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer MODIS: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod11.php>
- Pandi, D., Saravanan, K., & Kuppasamy, M. (2021). Hydrological models: a review. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, vol. 12, 223-242.
- Pascual, A. et al. (2019). *Dataset from PRE-SWOT multi-platform experiment.* Dataset. <http://dx.doi.org/10.20350/digitalCSIC/8640>.
- Quinn, F. H. (2002). Secular changes in Great Lakes water level seasonal cycles. *Journal of Great Lakes Research*, 451-465.
- Scott, R. W., & Huff, F. (1996). Impacts of the Great Lakes on regional climate conditions. *Journal of Great*

- Lakes Research*, 22(4), 845--863.
- Sepúlveda, U. M., Mendoza, P. A., Mizukami, N., & Newman, A. J. (2022). Revisiting parameter sensitivities in the variable infiltration capacity model across a hydroclimatic gradient. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(13), 3419-3445.
- Setegn et al. (2010). SWAT model application and prediction uncertainty analysis in the Lake Tana Basin, Ethiopia. *Hydrol. Process.* 24, 357– 367.
- Velpuri, N. et al. (2012). *A multi-source satellite data approach for modelling Lake Turkana water level: calibration and validation using satellite altimetry data*. Hydrology and Earth System Sciences.
- Wantzen, K. M., Junk, W. J., & Rothhaupt, K.-O. (2008). An extension of the floodpulse concept (FPC) for lakes. *Developments in Hydrobiology*, vol 204, 151–170.
- White, L. P. (1977). *Aerial Photography and Remote Sensing for Soil Survey*. Oxford: Oxford University Press.
- Wilson, M., Durand, M., Jung, H., & Alsdorf, D. (2015). Swath-altimetry measurements of the main stem Amazon River: measurement errors and hydraulic implications. *Hydrology Earth System Sciences*, vol. 19, 1943–1959.
- Wirth, J. et al. (2015). Assessment of the Accuracy of Google Earth Imagery for Use as a Tool in Accident Reconstruction. *SAE Technical Paper 2015-01-1435*.
- Zajac, Z., Revilla-Romero, B., Salamon, P., Burek, P., Hirpa, F. A., & Beck, H. (2017). The impact of lake and reservoir parameterization on global streamflow simulation. *Journal of hydrology*, 552--568.
- Zoltai, S. C. (1979). An outline of the wetland regions of Canada. *Ecological Land Classification Series*, Vol. 12, 1-8.

# Anexos

## Anexo A: Selección de la zona de estudio

El presente Anexo describe el razonamiento seguido para seleccionar las cuencas hidrográficas con emplazamiento de un sistema lacustre que se estudian en este trabajo. Las cuencas deben cumplir con los siguientes requerimientos: (1) poseer control fluviométrico en la salida e, idealmente, en su(s) entrada(s) principal(es), (2) presentar caudales de régimen natural, y (3) disponer de información suficiente para obtener los parámetros de lagos necesarios para la modelación en VIC.

Con respecto al requerimiento (1), de acuerdo con el mapa vectorial “Masas de agua: polígonos de lagos, laguna, hielos y otros” de la Mapoteca de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile ([https://www.bcn.cl/siit/mapas\\_vectoriales/](https://www.bcn.cl/siit/mapas_vectoriales/)), existen un total de 356 lagos a lo largo del país, de los cuales 18 están controlados sólo en la salida y 4 tanto en la salida como en sus entradas principales. Lo anterior, se pudo verificar mediante la revisión manual de los controles fluviométricos disponibles en lagos en el explorador de cuencas de la base de datos CAMELS-CL (<https://camels.cr2.cl/>).

Debido a que también se espera validar el desempeño del modelo en las cuencas aportantes al lago, se priorizan los cuerpos lacustres controlados en entrada y salida que, ordenados de norte a sur, corresponden al lago **Melado** (de origen artificial, Región del Maule), lago **Pirihueico**, lago **Ranco** (Región de Los Ríos) y lago **Tagua-Tagua** (Región de Los Lagos). La Figura A.1 muestra la ubicación de los lagos y las respectivas estaciones fluviométricas que los controlan, mientras que la Tabla A.1 detalla las características de estas estaciones.

Es importante mencionar que estos sistemas lacustres están controlados sólo en sus principales entradas y salidas. En los cuatro casos existen drenajes menores que no presentan control fluviométrico (ver Figura ) pero que, dado que poseen un área aportante menor en relación a la superficie total de la cuenca, se desprecian para efectos del proceso de verificación de la modelación. Para evidenciar lo planteado anteriormente, se cuantifican los ríos y esteros no considerados de acuerdo con el mapa vectorial “Red hidrográfica: polilíneas de los drenes de todo Chile” de la BCN:

- 12 quebradas aproximadamente para el lago Melado, las que se incorporan al río Melado antes de la entrada al lago o directamente al lago.
- 4 ríos sin control para el caso del lago Pirihueico, además de 1 estero y 1 arroyo.
- 5 ríos y aproximadamente 4 esteros para el lago Ranco. Unos cuantos esteros se suman al caudal del río Bueno aguas abajo del lago, sin embargo, como se explica más adelante, estos sí se consideran en la modelación.
- 7 drenajes, entre quebradas y esteros, sin control fluviométrico en el caso del lago Tagua-Tagua.



## MAPA DE GEOLOCALIZACIÓN DE LAGOS CON CONTROL FLUVIOMÉTRICO Región del Maule a Región de Los Lagos - Chile

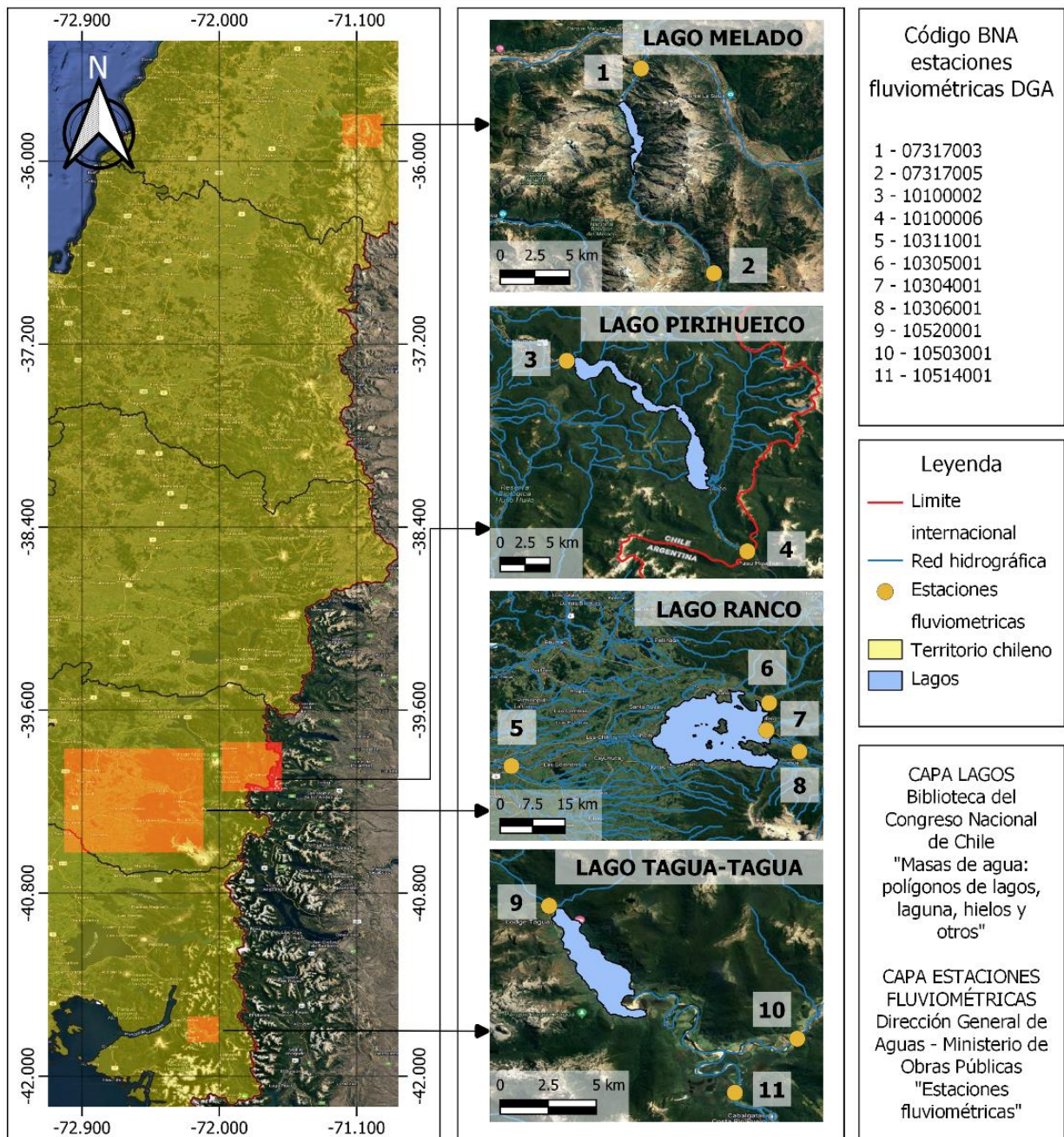


Figura A.1: Mapa de geocalización de los cuatro lagos con control fluviométrico en entrada y salida.

Tabla A.1: Características de las estaciones fluviométricas de entrada y salida de lagos controlados.

ID	Código BNA	Entrada/Salida	Nombre estación	Ubicación	Años con información
1	7317003	Salida	Río Melado En Zona De Presa	Río Melado, Lat. -35,75, Lon. -71,09	2003-2020
2	7317005	Entrada	Río Melado En El Salto	Río Melado, Lat. -35,88, Lon. -71,02	2003-2020

ID	Código BNA	Entrada/ Salida	Nombre estación	Ubicación	Años con información
3	10100002	Salida	Río Fuy En Desagüe Lago Pirihueico	Río Fuy, Lat. -39,87, Lon. -71,89	2003-2019
4	10100006	Entrada	Río Huahum En La Frontera	Río Huahum, Lat. -40,1, Lon. -71,68	2002-2019
5	10311001	Salida	Río Bueno En Bueno	Río Bueno, Lat. -40,32, Lon. -72,97	2002-2019
6	10305001	Entrada	Río Caunahue Camino A Llifén	Río Caunahue, Lat. -40,15, Lon. -72,25	1997-2019
7	10304001	Entrada	Río Calcurrupe En Desembocadura	Río Calcurrupe, Lat. -40,25, Lon. -72,27	1986-2019
8	10306001	Entrada	Río Nilahue En Mayay	Río Nilahue, Lat. -40,27, Lon. -72,23	1987-2020
9	10520001	Salida	Río Puelo En Desagüe Lago Tagua Tagua	Río Puelo, Lat. -41,64, Lon. -72,17	2002-2019
10	10503001	Entrada	Río Manso Antes Junta Río Puelo	Río Manso, Lat. -41,72, Lon. -72,01	2001-2017
11	10514001	Entrada	Río Puelo Antes Junta Con Manso	Río Puelo, Lat. -41,76, Lon. -72,05	2001-2020

FUENTE: Explorador de cuencas CAMELS-CL.

Con respecto al requerimiento (2), el lago Melado corresponde a un sistema lacustre de origen artificial construido para la generación de energía eléctrica. De acuerdo con el Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la Cuenca del Maule (DGA, 2020), el cajón del Río Melado presenta focos de “presión antrópica” e incluso se propone un plan de restauración ambiental. Debido a lo anterior, se decide no continuar con el estudio de este lago puesto que su origen e intervención antrópica pueden provocar una mala representación del sistema por parte del modelo.

Finalmente, utilizando distintas plataformas de búsqueda de productos satelitales (e.g. Earthdata Search <https://search.earthdata.nasa.gov/>, Copernicus Open Access Hub <https://scihub.copernicus.eu/>, EarthExplorer USGS <https://earthexplorer.usgs.gov/>, ASF Data Search <https://search.asf.alaska.edu/>), se revisa si los satélites mencionados en la sección 2.3 describen una órbita que transita por los lagos preseleccionados. Además, se busca información adicional en instituciones nacionales que trabajan en el procesamiento de información geoespacial (e.g. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile SHOA, Servicio Aerofotogramétrico de la Fuerza Aérea de Chile SAF, Instituto Geográfico Militar IGM) así como en la Red Hidrométrica Nacional de la DGA.

Se halla que la misión SRTM posee elevaciones sólo para el lago Ranco tomadas el año 2000. Lo anterior se repite con el proyecto Pre SWOT, el cual posee bases de datos de altura, área y almacenamiento de agua sólo para el Lago Ranco para el periodo 2000-2020. En cuanto a los satélites Terra y Aqua, con su sensor MODIS, orbitan por los tres lagos en cuestión, contando así con imágenes diarias del índice NDWI para el periodo 2000-2023. Mismo es el caso de los satélites Landsat 5 y 7, que juntos cubren un periodo de 1995 a 2022 con imágenes cada 32 días del índice NDWI. El resto de los satélites mencionados en la sección 2.3 no orbita por ninguno de los lagos en cuestión.

Por otra parte, sólo los lagos Pirihueico y Ranco cuentan con cartas náuticas, desarrolladas por el SHOA en los años 2005 y 2002 respectivamente. Estos dos lagos cuentan también con registros limnimétricos diarios asociados a estaciones administradas por la DGA. Se cuenta así con la hidrografía y mediciones



del nivel de agua de estos lagos. A continuación, la Tabla A.2 resume la información con la que se cuenta por lago.

*Tabla A.2: Resumen información disponible para lagos preseleccionados.*

<b>Datos</b>	<b>Lago Pirihueico</b>	<b>Lago Ranco</b>	<b>Lago Tagua-Tagua</b>
DEM misión SRTM		✓	
Base de datos Pre SWOT		✓	
Producto MODIS Terra y Aqua Diario NDWI	✓	✓	✓
Producto Landsat 5 y 8 c/32 días NDWI	✓	✓	✓
Cartas náuticas del SHOA	✓	✓	
Registros limnimétricos DGA	✓	✓	

El lago Tagua-Tagua carece de información hidrográfica y limnimétrica la cual es esencial para realizar la modelación del sistema lacustre en VIC, debido a que es utilizada para estimar inputs del modelo como el perfil del lago y otros parámetros de este. No así los lagos Pirihueico y Ranco que cuentan con ambos tipos de información. Tomando en consideración el requerimiento (3) para seleccionar la zona de estudio, el lago Tagua-Tagua es descartado por falta de información. Así, este estudio se enfoca en los **lagos Pirihueico y Ranco**.

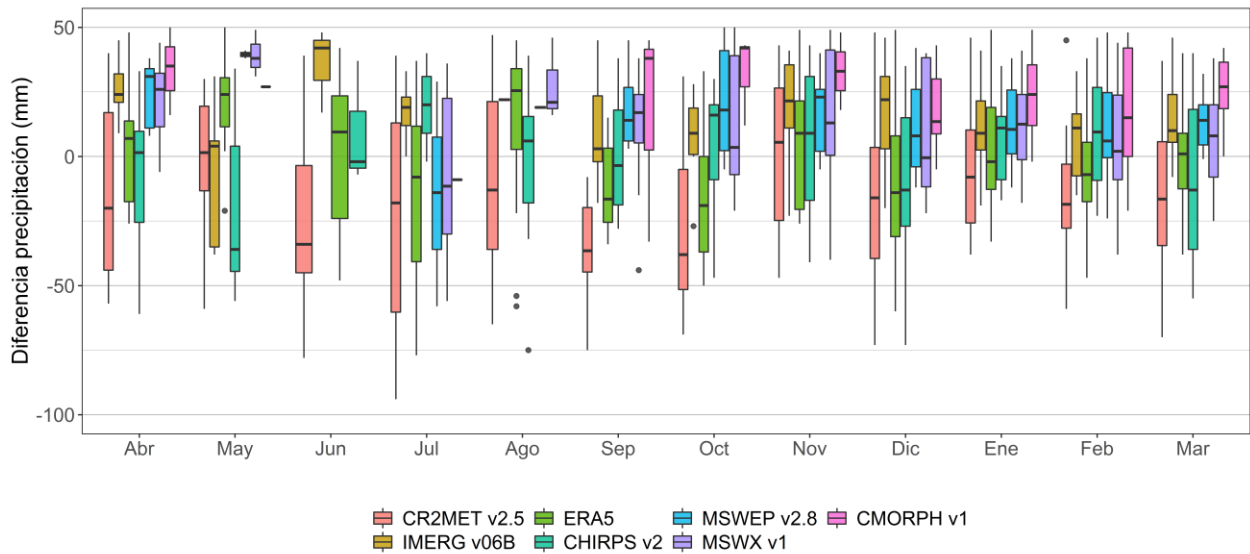
## **Anexo B: Producto CR2MET v2.5 y su comparación respecto a otros productos de precipitación disponibles en la literatura**

A modo de conocer el desempeño de CR2MET v2.5 en la zona de interés y, adicionalmente, contrastarlo con otros productos de precipitación disponibles en la literatura, se comparan las estimaciones de precipitación anual y mensual respecto a las estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de estudio. Las estaciones utilizadas corresponden a las estaciones meteorológicas detalladas en la Tabla 3.4 que posean una extensión temporal mayor a 20 años. Así, se trabaja con dos estaciones para cada cuenca de estudio.

Los datos de precipitación mensual, tanto de la estación como de los productos, son descargados desde el explorador de precipitaciones Mawün; los datos utilizados se encuentran disponibles a través del repositorio Zenodo (Cáceres, et al., 2023). Con estos datos, se calcula la diferencia de precipitación mensual entre la estación y cada producto, la que se agrega mensualmente para el periodo de mayor continuidad de información, correspondiente a 1998-2019.

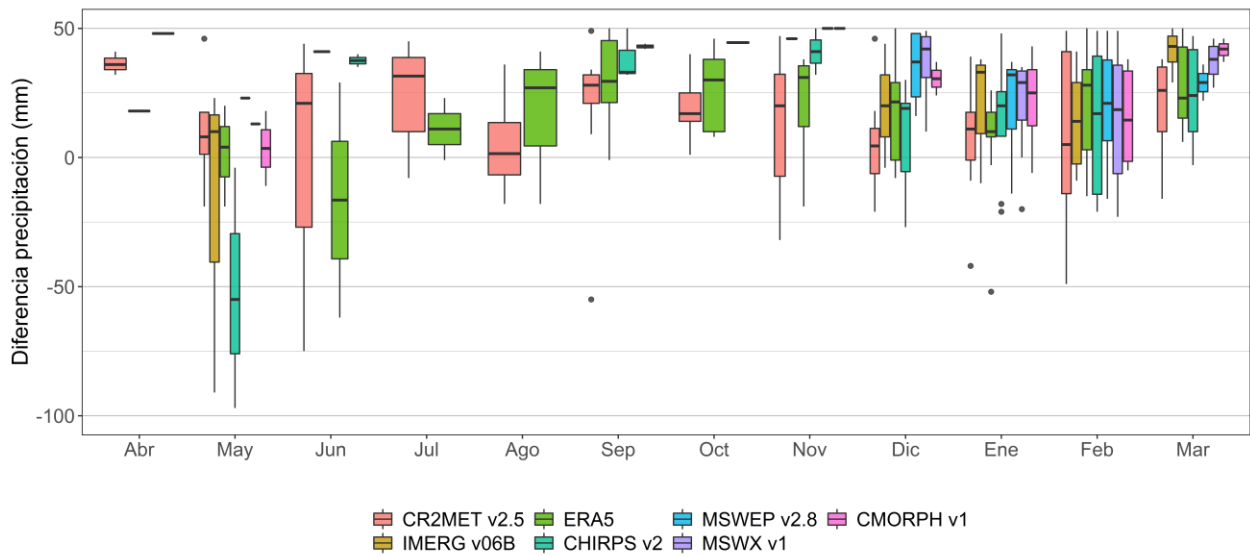
Las Figuras B.1 y B.2 muestran los gráficos de las estaciones meteorológicas de la cuenca Río Fuy en Desagüe Lago Pirihueico, mientras que las Figuras B.3 y B.4 corresponden a los gráficos de las estaciones meteorológicas de la cuenca Río Bueno en Bueno:

**Diferencia precipitación mensual Pirihueico en Pirihueico (10100004) y Productos de Precipitación  
Periodo 1998 - 2019**



*Figura B.1: Gráfico diferencia con productos de precipitación, estación Pirihueico en Pirihueico (10100004).*

**Diferencia precipitación mensual Pirihueico en Pto. Fuy (10100005) y Productos de Precipitación  
Periodo 1998 - 2019**



*Figura B.2: Gráfico diferencia con productos de precipitación, estación Pirihueico en Puerto Fuy (10100005).*

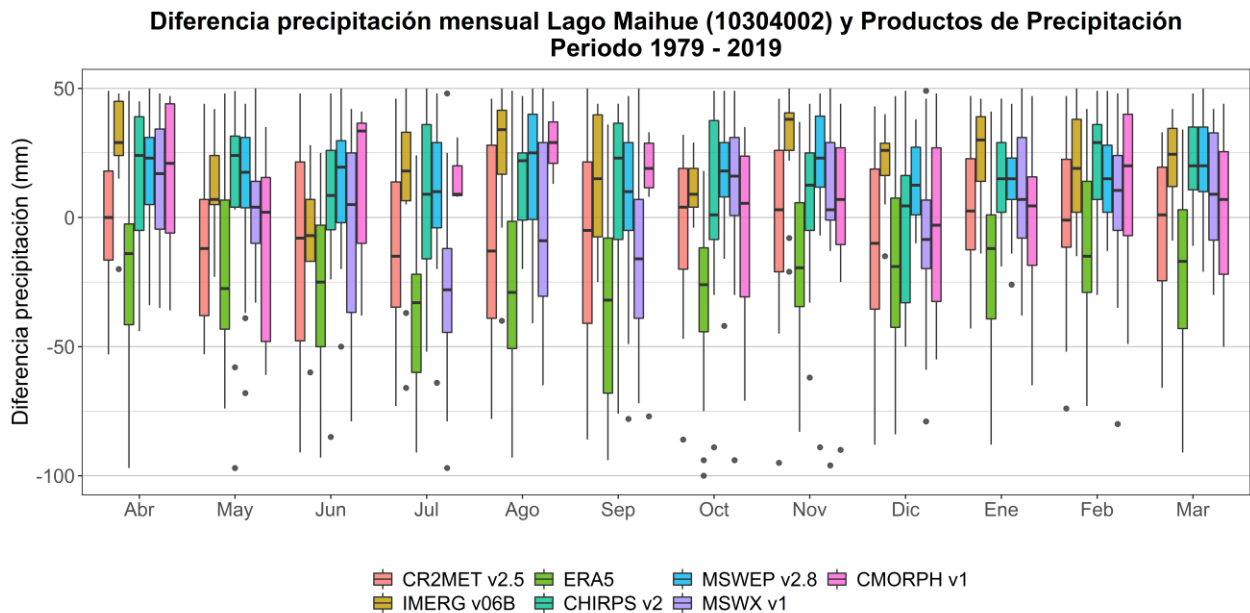


Figura B.3: Gráfico diferencia con productos de precipitación, estación Lago Maihue (10304002).

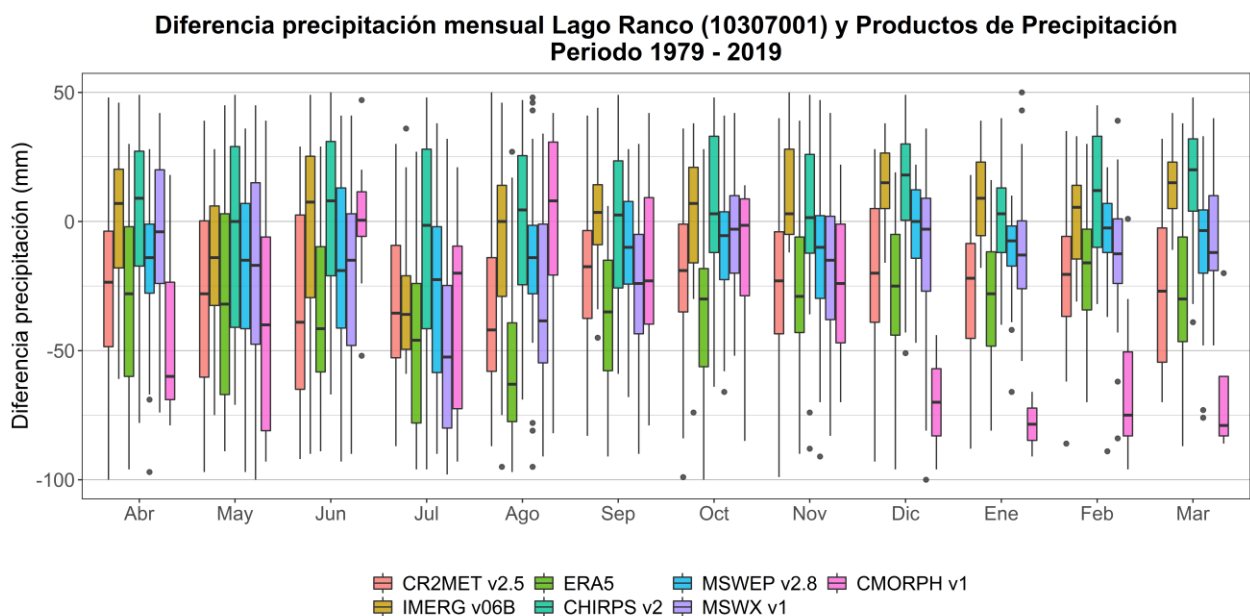


Figura B.4: Gráfico diferencia con productos de precipitación, estación Lago Ranco (10307001).

## Anexo C: Valores parámetros de modelación hidrológica

En la Tabla C.3 se detallan los valores que toma cada parámetro de modelación hidrológica en VIC para cuatro de las cuencas estudiadas, los que fueron calibrados por el estudio DGA (2022) y utilizados en el presente trabajo para la modelación en VIC.

Tabla C.3: Valores utilizados de los parámetros de modelación hidrológica de VIC.

	Nombre parámetro	Unidad	Valor por cuenca			
			Río Fuy en Desagüe Lago Pirihueico	Río Bueno en Bueno	Río Calcarrupe en Desembocadura	Río Caunahue Camino a Llifén
<b>Variables de caracterización de las capas de suelo</b>	Parámetro b de la curva de infiltración	-	0,00002	0,15	0,83	0,7
	Fracción de velocidad máxima del flujo base donde se vuelve no lineal	fracción	0,03	0,72	1	0,89
	Velocidad máxima de flujo base	mm/día	7,75	47,74	272,65	224,7
	Fracción de humedad de suelo máxima donde el flujo base es no lineal	fracción	0,86	0,04	0,03	0,23
	Conductividad hidráulica saturada	mm/día	36,45	21,04	464,08	5,65
	Exponente $\eta$ de la ecuación de Campbell	-	14,87	3	3,08	6,66
	Multiplicador espesor capa de suelo 1	m	0,02	0,36	0,01	0,03
	Multiplicador espesor capa de suelo 2	m	0,96	0,85	1,42	0,63
	Multiplicador espesor capa de suelo 3	m	0,52	5,3	0,65	5,73
	Rugosidad de la capa superficial de nieve	m	0,01	0,0001	0,0001	0,002
<b>Parámetros de fase de precipitación y derretimiento de nieve</b>	Temperatura máxima de precipitación sólida	°C	3,71	4,73	2,89	-0,56
	Temperatura mínima de precipitación líquida	°C	1,71	2,73	0,89	-2,56
	Parámetro A ecuación de decaimiento del albedo de acumulación	-	0,4	0,99	0,98	0,98
	Parámetro A ecuación de decaimiento del albedo de deshielo	-	0,92	0,9	0,99	0,71
	Parámetro B ecuación de decaimiento del albedo de acumulación	-	0,34	0,49	0,11	0,19
	Parámetro B ecuación de decaimiento del albedo de deshielo	-	0,1	0,52	0,13	0,14
	Nuevo albedo	fracción	0,88	0,93	0,66	0,82