



**GOBIERNO DE CHILE**

**MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

**DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS**

# **APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ACTUALIZACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO NACIONAL EN LAS CUENCAS DE LA MACROZONA SUR Y PARTE NORTE DE LA MACROZONA AUSTRAL**

**INFORME FINAL**

**REALIZADO POR:**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**S.I.T. N°441**

**SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2019**

**MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

Ministro de Obras Públicas

Ingeniero Civil Industrial, Sr. Alfredo Moreno Charme

Director General de Aguas

Ingeniero Comercial, Sr. Óscar Cristi Marfil

Jefa (S) División Estudios y Planificación

Ingeniera Civil, M.Sc. Andrea Osses Vargas

Inspector Fiscal

Ingeniera Agrícola, M.Sc. Pamela García Serrano

Inspector Fiscal (s)

Cartógrafo, Sr. Guillermo Tapia Molina

**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**JEFA DE PROYECTO**

Ingeniera Civil, Sra. Ximena Vargas Mesa

**ESPECIALISTAS**

Coordinador Técnico y especialista en Variabilidad Climática

Ingeniero Civil, M.Sc. Miguel Lagos Zúñiga

Especialista en Hidrología

Ingeniero Civil, Ph.D. Sr. Pablo Mendoza Zúñiga

Especialista en Meteorología

Ingeniero Civil Químico, Ph.D. Sr. Roberto Rondanelli Rojas

Especialista en Hidrogeología

Geóloga, Ph.D. Sra. Dolorinda Daniele

Especialista en SIG e Ingeniero de Proyecto

Ingeniero Civil, Sr. Tomás Gómez Zavala

**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**EQUIPO DE PROFESIONALES**

Ingeniero Civil, M.Sc. Javier Cepeda Abad  
Ingeniero Civil, M.Sc. Nicolás Vásquez Placencia  
Geólogo, Sr. Cristóbal Méndez Morgado  
Geógrafo, MSc. Alexis Caro Paredes

**EQUIPO DE ASESORES**

Asesor en Meteorología y Variabilidad Climática  
Ph.D. en Ciencias Atmosféricas. Sr. Juan Pablo Boisier Echeñique

Asesora en Hidrología  
Ingeniera Civil, Ph.D. Camila Álvarez Garretón

## **Agradecimientos**

**Powered@NLHPC:** Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02).

**Para citar este estudio, se recomienda hacerlo de la siguiente manera:**

**DGA (2019). APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ACTUALIZACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO NACIONAL EN LA MACROZONA 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.**

**Nota:** Se presentan definiciones metodológicas finales y los resultados del balance hídrico a escala de cuencas hidrográficas DARH (Departamento de Administración de Recursos Hídricos) para el periodo 1985-2015.

Es importante considerar que pese a que se realizan comparaciones entre el Balance 1987 y el presente estudio, es necesario tomar en cuenta que existen elementos metodológicos en la obtención de valores medios anuales en cada una de las cuencas analizadas que cambian entre ambos estudios, lo que dificulta la interpretación de los resultados, pues la diferencia puede deberse tanto a modificaciones metodológicas tanto como a variaciones reales del balance.

# CONTENIDO

Resumen de Anexos .....	ix
Índice de Figuras .....	x
Índice de Tablas .....	xiii
Glosario xiv	
<b>1 Introducción.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 Objetivo General.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>18</b>
<b>1.3 Estructura y consideraciones de este informe .....</b>	<b>18</b>
<b>2 Revisión y ajuste de la metodología para la estimación del balance hídrico .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1 Revisión de metodologías para la estimación de balance hídrico .....</b>	<b>20</b>
2.1.1 Revisión metodológica estudio DGA (1987) .....	20
2.1.2 Revisión metodológica estudio DGA (2017) .....	20
2.1.3 Revisión metodológica estudio DGA (2018) .....	23
<b>2.2 Discusión de resultados en cuencas piloto.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3 Ajustes metodológicos propuestos .....</b>	<b>28</b>
2.3.1 Potenciales mejoras en la estimación del balance hídrico .....	28
2.3.2 Modificaciones en la modelación hidrológica .....	28
2.3.3 Regionalización de parámetros.....	31
<b>3 Información complementaria .....</b>	<b>34</b>
<b>3.1 Revisión de antecedentes.....</b>	<b>34</b>
<b>3.2 Información Hidrogeológica.....</b>	<b>42</b>
<b>4 Forzantes Meteorológicas.....</b>	<b>51</b>
<b>4.1 Fuentes de información base .....</b>	<b>51</b>
4.1.1 Registros meteorológicos.....	51
4.1.2 Reanálisis climáticos .....	51
4.1.3 Productos de percepción remota .....	54
4.1.4 Producto grillado CR2MET .....	55
<b>4.2 Actualizaciones de información .....</b>	<b>57</b>
4.2.1 Reanálisis atmosférico ERA5 .....	58
4.2.2 Actualización del producto CR2MET.....	58
<b>4.3 Información utilizada .....</b>	<b>60</b>
4.3.1 Precipitación .....	60
4.3.2 Temperatura .....	69
4.3.3 Viento.....	75
4.3.4 Humedad Relativa.....	76

4.4	<b>Cambio Climático</b> .....	<b>79</b>
4.4.1	Introducción de metodología de escalamiento .....	81
4.4.2	Precipitación .....	83
4.4.3	Temperatura .....	89
<b>5</b>	<b>Identificación de cuencas en régimen natural para la estimación del balance hídrico</b> .....	<b>96</b>
5.1	Identificación y delimitación de cuencas .....	96
5.2	Caracterización de cuencas .....	96
5.3	Cuencas en régimen natural .....	100
5.4	Conclusiones capítulo V .....	100
<b>6</b>	<b>Estimación del balance hídrico para las cuencas en régimen natural de las macrozonas sur y parte norte de la zona austral</b> .....	<b>101</b>
6.1	Análisis de sensibilidad de parámetros .....	101
6.2	Resultados de la modelación hidrológica .....	103
6.2.1	Resultados en cuencas con lagos según metodología propuesta .....	103
6.2.2	Estimación del Aporte Glaciar .....	105
6.2.3	Resultados en cuencas calibradas.....	111
6.2.4	Validación cruzada de la regionalización de parámetros .....	117
6.3	Conclusiones capítulo VI.....	120
<b>7</b>	<b>Estimación del Balance Hídrico para la zona de estudio</b> .....	<b>121</b>
7.1	Balance Hídrico para la zona de estudio .....	121
7.2	Balance Hídrico en cuencas DARH .....	126
7.3	Comparación con Balance de 1987.....	130
7.4	Balance Hídrico bajo cambio climático .....	143
7.5	Conclusiones capítulo VII .....	147
<b>8</b>	<b>Proyecto SIG</b> .....	<b>148</b>
8.1	Antecedentes del proyectos SIG .....	148
8.2	Resumen de variables a presentar .....	149
8.2.1	Forzantes meteorológicas.....	150
8.2.2	Resultados de Modelo VIC.....	150
8.3	Formatos disponibles .....	151
8.4	Estructura de directorios .....	152
<b>9</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>156</b>
9.1	Recomendaciones .....	158
	<b>Referencias</b> .....	<b>159</b>

## RESUMEN DE ANEXOS

Este estudio consta además de un resumen ejecutivo y un cuerpo de anexos, cuyo resumen de contenido se presenta a continuación:

Título del Anexo	Resumen de contenidos
Anexo A: Modelo VIC	Se presentan las ecuaciones del modelo hidrológico VIC y las necesarias para comprender el proceso de modelación hidrológica.
Anexo B: Detalles Recopilación de Antecedentes	Se presentan los cuadros resumen de todos los estudios revisados como base para el desarrollo de este estudio.
Anexo C: Recarga	Se presenta la recarga estimada para cada una de las cuencas con control fluviométrico de la zona de estudio para contrastar con la recarga simulada por VIC.
Anexo D: Resultados del proceso de Calibración	Anexo Digital que muestra el desarrollo del proceso de calibración en las 78 cuencas en régimen natural.
Anexo E: Estimación de los aportes glaciares	Anexo digital que muestra los aportes de cada uno de los glaciares modelados.
Anexo F: Resultados de regionalización	Anexo digital que muestra los resultados de regionalización de parámetros a cuencas en régimen no natural o sin control fluviométrico.
Anexo G: Cambio Climático	Anexo digital que muestra los resultados resumidos de las simulaciones bajo condiciones de cambio climático.

## <sup>1</sup>Índice de Figuras

Figura 2.1: Resumen metodológico propuesto en el estudio DGA (2017) .....	22
Figura 2.2: Resumen de los ajustes metodológicos propuestos en el estudio DGA (2018). .....	24
Figura 2.3. Ubicación geográfica de la cuenca definida por la estación fluviométrica río Cautín en Rari-Ruca. ....	25
Figura 2.4: Curva de variación estacional del caudal observado (negro) y calibrado (rojo) para la cuenca.....	26
Figura 2.5: Curva de variación estacional y fracción acumulada promedio durante el periodo 1985/1986 – 2014/2015 para la precipitación (panel a), escorrentía (panel b) y evapotranspiración (panel c) en la cuenca del río Imperial. Fuente DGA (2017). ....	27
Figura 2.6 Representación de los principales procesos para obtener el caudal efluente según la metodología propuesta.....	29
Figura 2.7: Ejemplo de procedimiento de regionalización de parámetros mediante clasificación de píxeles. Extraído de DGA (2018). .....	32
Figura 3.1: Distribución de la conductividad hidráulica estimada a partir de la información de tipo de suelos otorgada por CIREN. Los montos son utilizados de forma referencial en el modelo VIC. ....	43
Figura 3.2: Mapa de ubicación de las estaciones fluviométricas en régimen natural consideradas. ....	46
Figura 4.1. Ubicación de estaciones de precipitación operadas por distintas instituciones comprendidas en la zona de estudio.....	53
Figura 4.2. Ejemplo de estimaciones de ERA-Interim. En la figura se presenta el valor de precipitación media diaria para el periodo 1989-1998. Fuente: ECMWF.....	54
Figura 4.3. Ejemplo del campo de temperatura superficial de MODIS. En la figura se presenta el valor medio estimado para las temperaturas diurnas en el periodo entre el 20 y 27 de julio de 2017. Fuente: NASA. ....	55
Figura 4.4: Comparación de climatologías de precipitación de registradas en estaciones meteorológicas y estimada por el producto CR2MET (v1.4.2) en el periodo 1979-2016. ....	57
Figura 4.5. Climatologías de precipitación media anual de los productos de precipitación CR2MET v1.4.2 (panel izquierdo), v2.0 (panel central) y diferencia entre ambos productos (panel derecho). ....	59
Figura 4.6: Esquema metodológico de generación del producto regional de precipitaciones. Fuente: Modificado de DGA (2017) .....	61
Figura 4.7: Precipitación anual media para el periodo 1979-2016 obtenido de la red de estaciones DMC-DGA (panel izquierdo) y del producto CR2MET (derecha). ....	62
Figura 4.8: Comparación entre estimación de precipitación media diaria del producto CR2METv2.0 y registros observados en estaciones de INIA y AGROMET ubicados dentro del área de estudio (n = 80).....	64
Figura 4.9. Series de precipitación (promedios mensuales) y climatologías, obtenido de registros locales .....	66
Figura 4.10: Coeficiente de determinación y sesgo medio calculado para estación donde se tiene información, comparando los valores observados con los obtenidos en validación cruzada. ....	67
Figura 4.11: Comparación de las estimaciones de Precipitación mensual promedio en ubicaciones.....	68
Figura 4.12: Promedios anuales de temperatura diaria mínima (paneles de la izquierda) y máxima (paneles del lado derecho) en el periodo 1979-2016 obtenido de la red de estaciones DMC-DGA y del producto CR2MET.....	71
Figura 4.13: Series de temperatura diaria máxima (promedios mensuales) y climatologías, obtenido. ....	72
Figura 4.14: Gráficos de validación del producto de temperatura máxima (paneles superiores) .....	73
Figura 4.15. Comparación entre valores observados y estimados por CR2MET-CV de valores medios anuales de temperaturas máximas y mínimas, separados a nivel mensual. ....	74

---

<sup>1</sup> Para efectos de espacio, se muestran solo los títulos completos de aquellas figuras que ocupan 2 líneas, el resto de ellas son truncadas a una sola línea.

Figura 4.16: Magnitud del viento media en distintos meses para el periodo 1985-2015 obtenida del procesamiento de los valores obtenidos desde ERA5. ....	76
Figura 4.17: Magnitud de la humedad relativa media en distintos meses para el periodo 1985-2015 obtenida del procesamiento de los valores obtenidos desde ERA5. ....	78
Figura 4.18: Emisiones de combustibles fósiles compatibles simuladas mediante los modelos CMIP5 .....	79
Figura 4.19: Cambios en la temperatura superficial promedio (a) y cambios en precipitación promedio. ....	80
Figura 4.20: Comparación de distintas técnicas de escalamiento para la distribución de frecuencia de .....	83
Figura 4.21: Promedios anuales climatológicos (1985-2015) para la precipitación anual. ....	85
Figura 4.22: Cambios de precipitación anual media, proyectado hacia 2030-2060 con respecto al periodo 1985-2015. Para cada modelo evaluado, se presentan las diferencias con respecto al periodo base 1985-2015.....	87
Figura 4.23: Cambio relativo en precipitación media anual proyectado para el periodo futuro (2030-2060).....	88
Figura 4.24: Promedios anuales climatológicos (1985-2015) de la temperatura diurna máxima.....	90
Figura 4.25 Promedios anuales climatológicos (1985-2015) de la temperatura diurna mínima. ....	91
Figura 4.26. Cambios proyectados en la media anual de temperatura diurnas máximas por los cuatro GCMs hacia 2030-2060, respecto al periodo 1985-2015. ....	93
Figura 4.27: Cambios proyectados en la media anual de temperatura diurnas mínimas por los cuatro GCMs hacia 2030-2060, respecto al periodo 1985-2015 .....	93
Figura 4.28: Cambios proyectados en el percentil 90% de temperatura máxima en verano.....	94
Figura 4.29: Cambios proyectados en el percentil 10% de temperatura mínima en invierno .....	95
Figura 5.1: Identificación de cuencas de la zona de estudio para el presente proyecto. ....	99
Figura 6.1 Índice de sensibilidad de orden 1 obtenido con el método DELSA para distintas funciones objetivo. Cada <i>boxplot</i> sintetiza los resultados de 78 cuencas.....	102
Figura 6.2 Ubicación espacial de las cuencas en estudio.....	104
Figura 6.3: Serie temporal de caudales simulados (rojo) y observados (negro) en la cuenca del río Curaco. ....	105
Figura 6.4: Estimación del caudal proveniente del glaciar Sierra Nevada (Región de la Araucanía). ....	107
Figura 6.5: Estimación del área glacial mediante imágenes Landsat (puntos azules y negros).....	108
Figura 6.6: Aporte medio del caudal glacial a la escorrentía total (tamaño del círculo) en cuencas. ....	109
Figura 6.7: (Panel superior) Mapa de índice KGE calibrado y el valor de NSE correspondiente para las 78 cuencas en régimen natural. (Panel Inferior) Histogramas con los valores de KGE y NSE respectivos. ....	112
Figura 6.8: Probabilidad acumulada de los criterios de eficiencia en las 78 cuencas calibradas. ....	113
Figura 6.9: Comparación entre las recargas obtenidas con las metodologías propuestas (MoMLRr y RORA) y la estimación mediante el modelo VIC. ....	114
Figura 6.10: Curvas de probabilidad acumulada para el índice KGE y el coeficiente $\beta = Q_{mod}/Q_{obs}$ para las cuencas en régimen natural.....	118
Figura 6.11: Variación de los índices KGE (panel superior) y $\beta = Q_{mod}/Q_{obs}$ (panel inferior) para las cuencas en régimen natural .....	119
Figura 7.1: Ejemplo de traspaso de parámetros en cuencas anidadas.....	122
Figura 7.2: Grupos de cuencas calibradas que donan parámetros a sus pixeles (panel izquierdo) y aquellas .....	123
Figura 7.3: Montos medios anuales de evapotranspiración natural (no incluye efecto del riego), escorrentía y precipitación considerando el período abr-1985 a mar-2015. ....	124
Figura 7.4: Estimación de la evapotranspiración potencial, la demanda evapotranspirativa en las zonas de.....	125
Figura 7.5: Balance adimensional y análisis de Budyko para las áreas definidas en el Atlas de Agua (DGA, 2015d). La Evapotranspiración potencial adoptada es la ETP reportada por VIC.....	127
Figura 7.6: Histograma del ráster de diferencias entre precipitaciones anuales promedio de los periodos climatológicos (1985-2015) y (1950-1980). ....	131

Figura 7.7: Climatología de precipitaciones anuales promedio para los estudios DGA (1987) y proyecto actual (paneles a y b) y diferencia de precipitaciones (panel c).....	132
Figura 7.8: Histograma del ráster de diferencias entre temperaturas medias anuales de los periodos climatológicos (1985-2015) y (1950-1980). .....	134
Figura 7.9: Climatología de temperatura media anual para los estudios DGA (1987) y proyecto actual (paneles a) y b) y diferencia de temperaturas.....	135
Figura 7.10: Esquema de superposición entre cuencas DARH y cuencas BNA. Para efectos de visualización, se suprimen de la leyenda algunas cuencas Costeras.....	136
Figura 7.11 Comparación principales componentes del balance hídrico en zona de estudio para las cuencas donde se encontró equivalencia entre códigos BNA y DARH .....	142
Figura 7.12: Balance de masa adimensional para las cuencas DARH-CIREN bajo cambio climático. ....	144
Figura 7.13: Variación de la precipitación, escorrentía y evapotranspiración para cada uno.....	145
Figura 7.14: Variación promedio entre los cuatro GCMs seleccionados para los flujos de precipitación.....	146
Figura 8.1: Pasos metodológicos para la creación del proyecto SIG propuesto. Fuente: DGA (2017) .....	149
Figura 8.2: Estructura del árbol de directorios del proyecto SIG para la macrozona Sur y parte norte de la .....	154

## Índice de Tablas

Tabla 2.1: Resumen del balance hídrico en cuencas piloto en el estudio DGA (2017) .....	23
Tabla 3.1: Estudios DGA por mandato de la Dirección General de Aguas .....	34
Tabla 3.2: Estudios científicos revisados en función de lo solicitado por la Dirección General de Aguas. ....	38
Tabla 3.3: Ficha ejemplo revisión de antecedentes.....	41
Tabla 3.4: Estimaciones de recarga de agua subterránea en las cuencas en régimen natural de las macrozonas Sur y parte norte de la Austral.....	44
Tabla 3.5: Porcentaje de diferencia en las estimaciones de recargas ocupando los métodos MoMLRr y RORA. Los valores destacados con rojo indican diferencias mayores al 60%. ....	47
Tabla 3.6: Estimación de recargas para las cuencas del sur de Chile (DGA, 2014) .....	49
Tabla 4.1. Modificaciones incorporadas en el método de estimación de precipitaciones.....	61
Tabla 4.2. Descripción de las diferentes etapas que se desarrollan para generar el producto de temperaturas actualizadas. Fuente: DGA, 2018. ....	69
Tabla 4.3. Modelos global de clima seleccionados para representar las proyecciones de cambio climático en el presente estudio. ....	81
Tabla 6.1 Parámetros e calibración seleccionados en base al análisis de sensibilidad .....	101
Tabla 6.2 Información geomorfológica de la cuenca del río Curaco en Colico y Huahum en la frontera. ....	103
Tabla 6.3 Criterios de eficiencia asociados a las distintas metodologías utilizadas en el proceso de calibración.....	104
Tabla 6.4: Estaciones fluviométricas calibradas y con presencia de cuerpos de hielo. ....	110
Tabla 6.5: Resultados de caudal y recarga para las cuencas calibradas. ....	114
Tabla 6.6: Detalle de cuencas con presencia de lagos.....	117
Tabla 7.1: Principales flujos hidrológicos para las cuencas definidas en el Atlas del Agua según el criterio de regionalización .....	128
Tabla 7.2: Estadísticos de mapas de precipitación media anual ( $P_{ma}$ ) y de mapa de diferencias de la Figura 7.6, restringidas solo al área de estudio. ....	130
Tabla 7.3: Estadísticos de mapas de temperatura media anual ( $T_{ma}$ ) y de mapa de diferencias de la Figura 7.8 ...	133
Tabla 7.4: Equivalencia entre cuencas DARH y cuencas BNA y sus respectivas superficies. ....	137
Tabla 7.5: Variaciones de distintas componentes del balance hídrico entre los periodos DGA periodo actual (1985-2015) y periodo pasado (1955-1985).....	141

## GLOSARIO

<b>Almacenamiento</b>	: Capacidad máxima de volumen de agua que puede ser retenida o extraída de un cuerpo de agua.
<b>Balance Hídrico</b>	: Relación entre las entradas naturales o artificiales de recurso hídrico, almacenamiento y salidas naturales o artificiales en una unidad de análisis (ej. cuenca), en un intervalo de tiempo definido.
<b>DEM</b>	: Modelo de Elevación Digital ( <i>Digital Elevation Model</i> )
<b>Escorrentía</b>	: Agua que escurre superficialmente por una unidad de área, se expresa usualmente en milímetros en un intervalo de tiempo dado. Este escurrimiento puede existir tanto a nivel de laderas como en cursos de agua natural. El agua que escurre por el área de análisis puede tener origen de precipitación, exceso de saturación de suelo o derretimiento de nieve y glaciares.
<b>ET</b>	: Evapotranspiración real. Corresponde a la cantidad de agua que una superficie devuelve a la atmósfera como evaporación, transpiración vegetal y sublimación.
<b>ETo</b>	: Evapotranspiración de cultivo de referencia.
<b>ETP</b>	: Evapotranspiración potencial.
<b>fSCA</b>	: Cobertura nival fraccional ( <i>fractional Snow Covered Area</i> ). Corresponde a la fracción de un área que está cubierta por nieve.
<b>Forzantes</b>	: Corresponde a un conjunto de variables que condicionan el comportamiento de un sistema, dadas sus propiedades. Ejemplos de ello son la precipitación y temperatura, que condicionan la respuesta de una cuenca, que dependiendo de sus atributos generará distintos procesos de escurrimiento (escorrentía superficial, recarga, etc.).
<b>GCM ó MCG</b>	: Modelos de circulación general de la atmósfera, utilizados para realizar simulaciones climáticas globales bajo distintos escenarios.
<b>MODIS</b>	: Espectro-radiómetro de resolución moderada ( <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i> ).
<b>NDSI</b>	: Índice de la diferencia de nieve normalizado. ( <i>Normalized Difference Snow Index</i> ).

- Reanálisis climático** : Simulación atmosférica computacional que incorpora observaciones terrestres de distintas fuentes de información
- Recarga Real** : Proceso natural o artificial por la cual se produce la entrada de agua a la zona saturada, donde comienza a formar parte de las reservas de agua subterránea.
- Recarga Potencial** : Equivalente a la recarga real, pero el agua infiltrada puede o no llegar a la zona saturada.
- SWE** : Equivalente en agua de nieve (*Snow Water Equivalent*).

# 1 INTRODUCCIÓN

La comprensión de la oferta natural del recurso hídrico en una cuenca hidrográfica está dada por el balance entre los aportes naturales, los almacenamientos y los flujos de salida de dicha hoyo en un periodo de tiempo. Dada la creciente demanda hídrica para abastecer distintos sectores de la población, y un clima cambiante producto de forzantes naturales y antropogénicas (Huntington, 2006; IPCC, 2013, Milly et al. 2005), es necesario que cualquier estimación de balance hídrico esté orientada a mejorar, en primera instancia, la comprensión de procesos físicos para condiciones climáticas históricas (Blöschl and Montanari, 2010).

Los avances computacionales de las últimas décadas, junto a nuevas técnicas de medición (Kinar and Pomeroy, 2015; McCabe et al., 2017), han permitido a la comunidad científica avanzar no sólo en la comprensión del ciclo hidrológico, sino que también en su capacidad de generar proyecciones a distintas escalas espacio-temporales. En este sentido, el desarrollo de modelos hidrológicos ha tenido un rol fundamental, comenzando por la propuesta de Freeze y Harlan (1969), quienes plantearon preguntas que aún son relevantes para la comunidad y han inspirado la evolución (y revolución) de modelos numéricos con base física (Clark et al., 2015; Essery and Pomeroy, 2004; Niu et al., 2011; Oleson et al., 2010; Pomeroy et al., 2007; Wigmosta et al., 1994).

Un desafío relevante en modelación hidrológica consiste en evaluar la fidelidad de la representación de procesos físicos simulados respecto a lo que realmente ocurre. El uso de índices permiten identificar la representación del funcionamiento real en una cuenca específica en base a simulaciones (e.g., Hrachowitz et al., 2014; Mizukami et al., 2016; Pokhrel et al., 2012, Yilmaz et al., 2008). El contraste entre observaciones y simulaciones (por ejemplo, caudales, humedad del suelo, equivalente en agua de nieve), permite informar qué componentes del modelo (conceptualizaciones, parámetros) deben ser modificados para mejorar el realismo de una simulación. El proceso de ajuste de parámetros, conocido como calibración, es clave para la posterior generación de predicciones de caudales en la cuenca de interés.

Para llevar a cabo el proceso de calibración de parámetros en la modelación hidrológica, es necesario contar con información fidedigna de las variables de estado más importantes en cada cuenca (equivalente de agua de nieve, humedad del suelo, etc.) y de flujos (principalmente evapotranspiración y caudal). Buscando que las observaciones y simulaciones sean lo más cercanas entre sí, a través de algún algoritmo de optimización que busque minimizar la discrepancia entre ambas.

En el contexto de Chile, se ha evidenciado una creciente instrumentación de cuencas que permite incorporar información esencial para realizar una modelación hidrológica adecuada tanto a escala puntual como a escala de cuenca, sin embargo, aún persisten importantes brechas a ser subsanadas entre las distintas cuencas y procesos como fue reportado en el estudio DGA (2017).

Debido a la falta de información fluviométrica en gran parte del territorio nacional, y a que la información disponible generalmente está sujeta a intervención humana, no es trivial calibrar modelos

hidrológicos que representen el comportamiento natural de una cuenca. Con el fin de abordar éste y otros desafíos, la Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas (IAHS, por sus siglas en inglés) lanzó la iniciativa ‘Predicción en Cuencas No Controladas’ (*Predictions in Ungauged Basins*, PUB), que operó durante el periodo 2003-2012 (ver principales hitos en Hrachowitz *et al.*, 2013). PUB buscó alejarse de metodologías tradicionales que dependen de modelos calibrados con datos fluviométricos, optando por técnicas nuevas para predecir caudales en cuencas no controladas a partir de la comprensión entre similitudes física, climática e hidrológica (i.e., enfoque Darwiniano).

Un concepto clave en dichas metodologías es el de regionalización, que busca transferir variables observadas, modelos y/o parámetros hidrológicos desde zonas monitoreadas utilizando principios de similitud (e.g., Parajka *et al.*, 2013). Estudios recientes han demostrado el potencial de utilizar técnicas de regionalización basadas en similitud para transferir parámetros de modelos hidrológicos, y posteriormente caudales en cuencas sin control fluviométrico (Beck *et al.*, 2016; Singh, Archfield, & Wagener, 2014).

En el año 2016 la Dirección General de Aguas, licita el estudio “Actualización del Balance Hídrico Nacional”, que fue ejecutado por la Universidad de Chile en conjunto con la Pontificia Universidad Católica de Chile (DGA, 2017). En este estudio se propone realizar una estimación del balance hídrico en base a modelación hidrológica de base física para 5 cuencas piloto del país: Loa, Choapa, Maipo, Imperial y Aysén. Posteriormente, en el año 2018 se aplica esta metodología para las macrozonas Norte y Centro. En este último estudio, se exploran distintas técnicas de regionalización en cuencas no controladas y con alto índice de intervención, marcando un hito sin precedentes en el país.

En este informe se comparan los resultados del balance hídrico vigente (DGA, 1987) con aquellos obtenidos en el presente estudio para el período histórico para las cuencas DARH. Es necesario tomar en cuenta que existen elementos metodológicos como en la obtención de valores medios anuales en cada una de las cuencas analizadas que cambian entre ambos estudios, lo que dificulta la interpretación de los resultados, pues la diferencia puede deberse tanto a modificaciones metodológicas como a variaciones reales en el balance. Los resultados del presente estudio han de ser interpretados como la oferta natural que deberían tener los ríos a distintas escalas temporales (presentadas a nivel promedio anual) de modo que, si en el balance DGA (1987) no se descontaron los usos de agua, la comparación directa no puede realizarse debido a estas importantes diferencias metodológicas.

## **1.1 OBJETIVO GENERAL**

El objetivo general de este estudio es determinar el balance hídrico en cuencas hidrográficas que se encuentren ubicadas entre la región del Biobío y parte norte de la región de Aysén. Específicamente, las cuencas en estudio corresponden a las ubicadas entre la cuenca del río Itata (Código BNA 081) al norte, y las cuencas costeras e Islas entre río Palena y Río Aysén<sup>2</sup> (código BNA 1101) y cuenca Archipiélagos de las Guaitecas y de los Chonos (código BNA 1102), al sur.

---

<sup>2</sup> Este polígono incluye la cuenca del río Cisnes, el cual abarca prácticamente la totalidad del polígono. Para simplificar la referencia, se llamará el polígono BNA 1101 cómo “río Cisnes”.

Para cumplir el objetivo principal, se utiliza la metodología desarrollada en el estudio denominado “Actualización del Balance Hídrico Nacional” DGA (2017), y las modificaciones y mejoras desarrolladas en el estudio denominado “Aplicación de La Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de la Macrozona Norte y Centro” (DGA, 2018).

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos para la aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en la zona de estudio son los siguientes:

1. Recopilar datos hidrometeorológicos complementarios a los obtenidos en el estudio anterior (DGA, 2018). Esta recopilación se aplica a las cuencas de las macrozonas sur y parte norte de la austral antes mencionadas, y tiene por objeto mejorar la estimación del balance.
2. Realizar una estimación del balance hídrico a nivel de cuenca en función de las condiciones geográficas, climáticas y datos hidrometeorológicos disponibles. Para esto, se debe utilizar la metodología desarrollada en el estudio denominado “Actualización del Balance Hídrico Nacional” (DGA, 2017), la cual debe ser adaptada para las cuencas consideradas en el presente estudio.
3. Realizar estimaciones del balance hídrico a nivel de cuenca en función de proyecciones climáticas de las variables de entrada, considerando como horizonte los años 2030, 2040 y 2050.
4. Elaborar un proyecto SIG (Sistema de Información Geográfica) que permita la presentación y despliegue de las distintas componentes del balance, con su distribución espacial y temporal.

## 1.3 ESTRUCTURA Y CONSIDERACIONES DE ESTE INFORME

El cuerpo de este informe se organiza en nueve capítulos. En el Capítulo 2 se muestra la revisión metodológica de los distintos balances hídricos realizados por la DGA, discusión de resultados y ajustes metodológicos propuestos. En el Capítulo 3 se muestra la recopilación bibliográfica de interés para este estudio, así como otras fuentes de información complementaria.

En el Capítulo 4 se muestran las forzantes meteorológicas utilizadas en este estudio, mientras que el Capítulo 5 se presenta la identificación de cuencas, su caracterización e individualización de aquellas que presentan régimen natural. En algunas de las cuencas sin un grado de intervención antrópica importante, se aplica la metodología propuesta y se cuantifica el balance hídrico en el Capítulo 6.

El Capítulo 7 muestra la estimación del balance hídrico en toda la zona de estudio a nivel de cuencas DARH (Departamento de Administración de Recursos Hídricos), presentando además cambios en el balance en función del estudio DGA (1987) y proyecciones de cambio climático. El Capítulo 8 muestra el prototipo del SIG desarrollado y finalmente en el Capítulo 9 se concluye sobre los principales resultados obtenidos entregando algunas recomendaciones.

**Nota:** La separación decimal está denotada por el símbolo “,” y el separador de miles en “.”. Sin embargo, algunas de las figuras son desarrolladas en lenguajes donde el significado de estos signos se invierte – dado el idioma en que fueron desarrollados – y que no es posible modificar. Así mismo, algunos de los

lenguajes tampoco reconocen los caracteres de vocal con tilde, así como la letra ñ, por lo que su omisión es deliberada y no accidental.

## 2 REVISIÓN Y AJUSTE DE LA METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO

En este numeral, se presenta la revisión metodológica de estudios previos en el marco de la actualización del balance hídrico nacional, discusión de resultados en la cuenca del río Imperial del estudio DGA (2017) y ajustes metodológicos propuestos.

### 2.1 REVISIÓN DE METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE BALANCE HÍDRICO

La estimación del balance hídrico para una cuenca hidrográfica está descrita para cada paso temporal en estudio según la Ecuación (2-1). En ésta, se establece que la variación del almacenamiento interno de una cuenca en un intervalo de tiempo ( $\Delta S/\Delta t$ ), es función de la diferencia entre la precipitación total que ingresa al sistema (P) y las pérdidas evapotranspirativas (ET) restando la escorrentía de salida de forma superficial en régimen natural (Q). Adicionalmente, existen términos que representan la escorrentía subterránea de entrada ( $G_{in}$ ) y de salida ( $G_{out}$ ), que dependiendo de las condiciones hidrogeológicas y climáticas pueden tener mayor significancia respecto a la escorrentía superficial.

En este estudio se considera una cuenca en régimen natural cuando (1) no existen derechos consuntivos asignados a interior de la cuenca, (2) la suma de los derechos consuntivos es menor al 5% del caudal medio anual registrado en la estación fluviométrica y (3) que no existan embalses dentro de la cuenca. Además, se corrobora que los derechos no consuntivos no intervengan los registros fluviométricos. Por ejemplo, se verifica que, si existen bocatomas, su restitución se encuentre aguas arriba de la estación fluviométrica que define la cuenca; o que los derechos no consuntivos no se encuentren en ejercicio. El detalle se explica en el acápite 5.3

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = P - ET - Q + G_{in} - G_{out} \quad (2-1)$$

#### 2.1.1 REVISIÓN METODOLÓGICA ESTUDIO DGA (1987)

En el estudio DGA (1987), se desarrolló una metodología para estimar las forzantes meteorológicas mediante isolíneas, construidas en base a información de precipitación y temperatura observada (necesaria para estimar ET), que consideró un patrón topográfico donde se representaban los procesos orográficos y de estructura vertical de la atmósfera. Del mismo modo, los caudales no necesariamente consideraban los usos internos del sistema, de forma que el balance hídrico se cerraba desde aguas arriba hacia aguas abajo, dejando un término de discrepancia y considerando que la variación interanual del almacenamiento es nula y que los flujos subterráneos se compensan para periodos climatológicos (30 años).

#### 2.1.2 REVISIÓN METODOLÓGICA ESTUDIO DGA (2017)

En el estudio DGA (2017), se realizó un ajuste metodológico para actualizar el balance hídrico nacional que se sintetiza en la Figura 2.1. En resumen, se realiza el mismo balance hídrico que el descrito

en la Ecuación (2-1), pero con la diferencia que se utiliza el modelo hidrológico VIC a una escala temporal de 3 horas. Lo anterior tiene ventajas por las siguientes consideraciones:

- I. Permite reproducir con mayor base física procesos de evapotranspiración, derretimiento de nieve y sublimación que ocurren a escalas temporales inferiores a la diaria, minimizando la conceptualización usualmente utilizada en la estimación de estos flujos.
- II. Se reconocen los flujos de diversos procesos físicos y permite mayor separación en los diversos términos del balance. Es decir, se pueden separar los componentes de flujos verticales: evapotranspiración, recarga y sublimación.
- III. Se toman en cuenta diversas unidades de almacenamiento, destacándose el contenido de agua en el manto nival.
- IV. Es posible analizar condiciones climáticas variables, no estando sujetos los resultados a condiciones climáticas promedio.
- V. Permite realizar análisis de variabilidad climática. Esto último es una consideración que no podría realizarse al utilizarse directamente la Ecuación (2-1), puesto que los procesos hidrológicos son altamente no lineales, de modo que una variación de precipitación no necesariamente implicará la misma variación en escurrimiento.

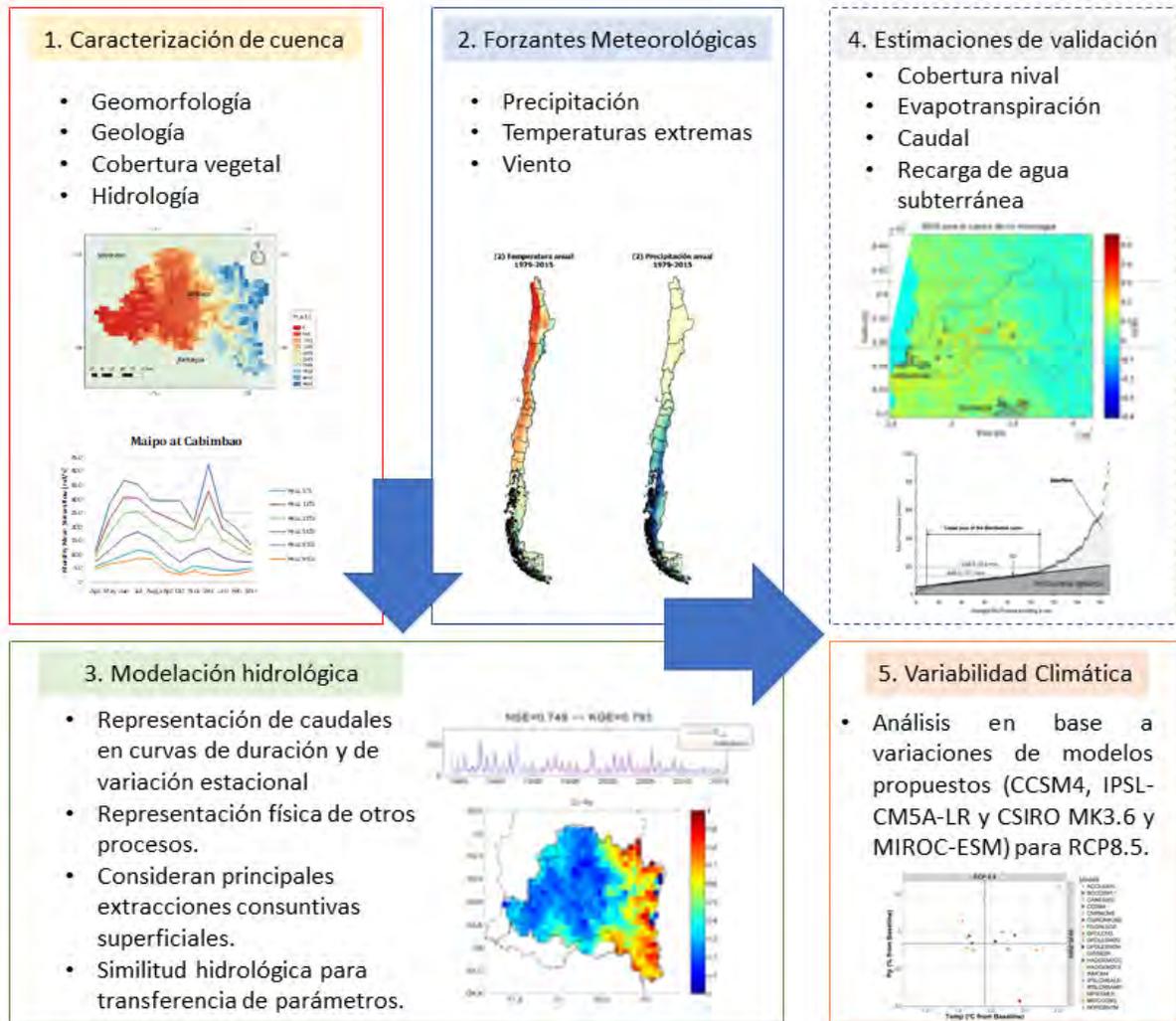


Figura 2.1: Resumen metodológico propuesto en el estudio DGA (2017)

La metodología utilizada en DGA (2017) incluye la generación de forzantes meteorológicas e hidrológicas distribuidas espacialmente a una grilla de 0,05° (latitud-longitud), considerando nuevas fuentes de información satelital, así como reanálisis climáticos. En dicho estudio, se probó la metodología en cinco cuencas piloto: Loa, Choapa, Maipo, Imperial y Aysén. La Tabla 2.1, resume los resultados obtenidos para el balance hídrico.

**Tabla 2.1: Resumen del balance hídrico en cuencas piloto en el estudio DGA (2017)**

<b>Cuenca</b>	<b>Precipitación anual promedio [mm]</b>	<b>Escorrentía media anual [mm]</b>	<b>Evapotranspiración anual promedio [mm]</b>	<b>Coefficiente de Escorrentía promedio</b>
Loa	26,5	1,4	24	0,05
Choapa	262	72	196	0,27
Maipo	603	354	250	0,59
Imperial	1.554	988	569	0,64
Aysén	2.044	1.502	541	0,73

### **2.1.3 REVISIÓN METODOLÓGICA ESTUDIO DGA (2018)**

En el estudio DGA (2018), se realizó un ajuste a la metodología planteada en el estudio DGA (2017). Específicamente, la calibración de parámetros del modelo hidrológico VIC para cuencas en régimen natural pasó de ser manual a automática mediante el método *Shuffled Complex Evolution* (Duan et al., 1993). Por otro lado, se planteó una metodología de transferencia de parámetros para los pixeles que se encuentran al interior de cuencas con alto grado de intervención, basada en la regionalización de ellos producto de la clasificación de pixeles basada en los atributos físicos/meteorológicos (Figura 2.2).

Las cuencas candidatas a ser calibradas por su condición de régimen natural deben cumplir con los siguientes criterios: (1) que la suma de los derechos consuntivos superficiales sea inferior al 5% del caudal medio anual medido por su estación fluviométrica, (2) que no existan grandes obras hidráulicas dentro de la misma, y (3) que posea registros por cinco años.

Adicionalmente, se implementó una metodología para la incorporación del aporte glaciar, considerando cada glaciar del inventario asociado al reporte DGA (2011) mediante un modelo basado en la relación área-volumen y un balance de energía con radiación simplificada. El detalle con los cálculos se encuentra en el Anexo A.

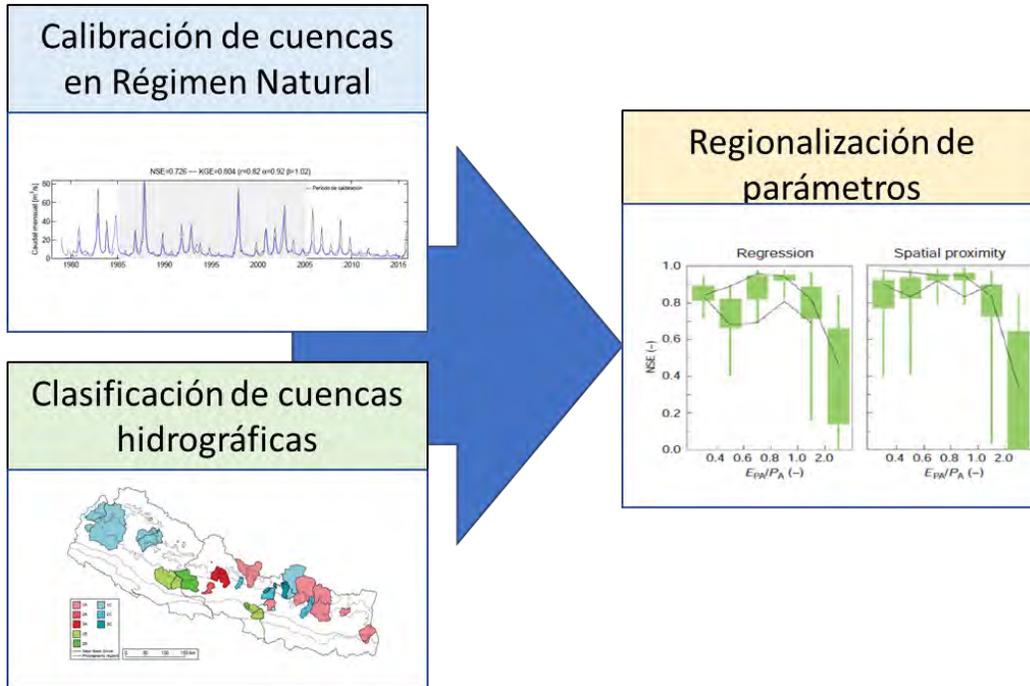


Figura 2.2: Resumen de los ajustes metodológicos propuestos en el estudio DGA (2018).

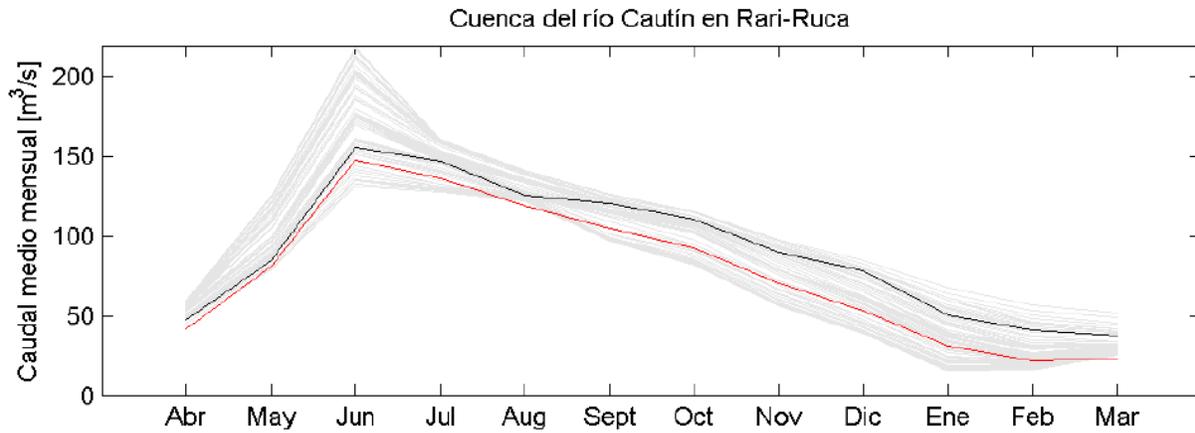
## 2.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS EN CUENCAS PILOTO

En la metodología de actualización del balance hídrico nacional (DGA, 2017), se modelaron las cuencas de los ríos Loa, Choapa, Maipo, Imperial y Aysén. De estas cinco cuencas, sólo la cuenca del río Imperial se encuentra dentro de la zona de análisis del presente estudio. La cuenca en régimen natural calibrada al interior de la cuenca del río Imperial fue la definida por la estación fluviométrica DGA río Cautín en Rari-Ruca (BNA 9123001), donde los resultados de la calibración alcanzaron índices de eficiencia para caudales medios mensuales superiores a 0,8. La ubicación geográfica de las cuencas definidas por dichas estaciones fluviométricas se muestra en la Figura 2.3.



**Figura 2.3. Ubicación geográfica de la cuenca definida por la estación fluviométrica río Cautín en Rari-Ruca.**

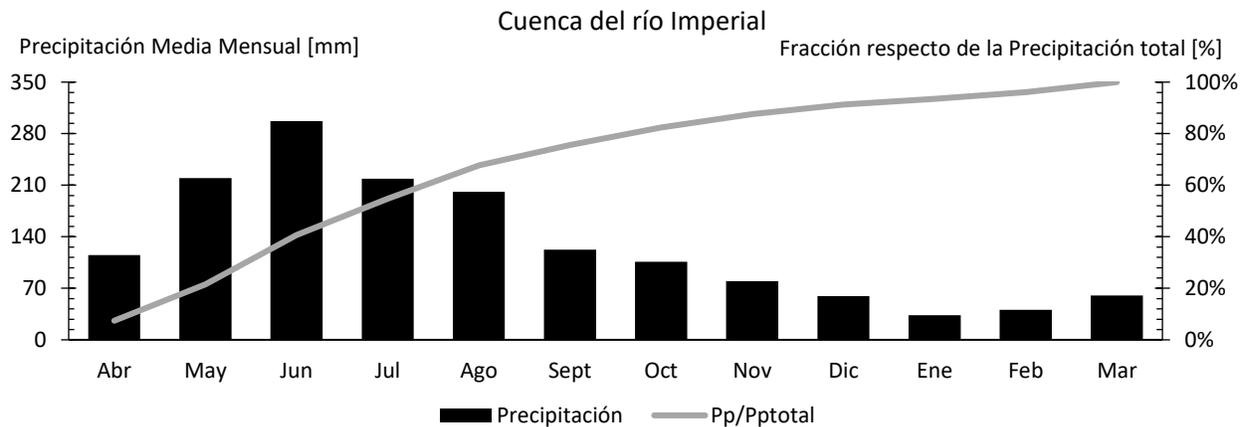
En la Figura 2.4 se observa que existe un sesgo negativo, sobre todo entre los meses de junio a marzo. Al transferir los parámetros de esta cuenca calibrada al resto de la cuenca del río Imperial, los resultados presentan sesgos importantes entre los meses de mayo y septiembre, con subestimaciones de hasta  $130 \text{ m}^3/\text{s}$  en la curva de variación estacional en las estaciones fluviométricas Cholchol en Cholchol (BNA 9116001) y Cautín en Almagro (BNA 9140001). En la misma figura, las líneas grises representan otros conjuntos alternativos de parámetros obtenidos en el proceso de calibración, los que fueron descartados en función de los evaluadores de desempeño que presentan en el proceso de calibración.



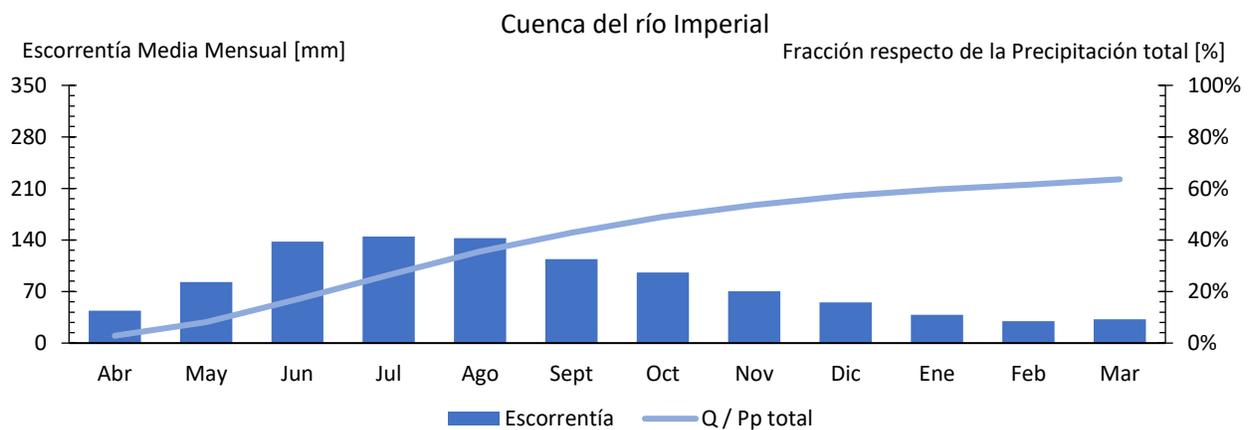
**Figura 2.4:** Curva de variación estacional del caudal observado (negro) y calibrado (rojo) para la cuenca de Cautín en Rari-Ruca. Las líneas grises corresponden a todas las simulaciones realizadas durante el proceso de calibración. Fuente DGA (2017).

En base a la modelación realizada, se obtiene que la escorrentía en la cuenca del río Imperial en desembocadura es de 988 [mm/año], representando cerca del 65% de la precipitación (ver Figura 2.5). En esta cuenca, se considera la metodología de incorporación de riego<sup>3</sup>, mediante la cual se estima que la evapotranspiración sube 34 mm/año con respecto al régimen natural. Al realizar una comparación entre la evapotranspiración obtenida en la modelación con el producto MODIS, se observa que en general ésta es subestimada. En cuanto a la fracción de área cubierta por nieve, se observa que ésta es bien representada tanto en los valores máximos como en la dinámica. Finalmente, en cuanto a la recarga de agua subterránea, se aprecia que la modelación entrega una subestimación del orden de un 50%, tomando como referencia los valores de recarga obtenidos por otras metodologías descritas en el mismo estudio.

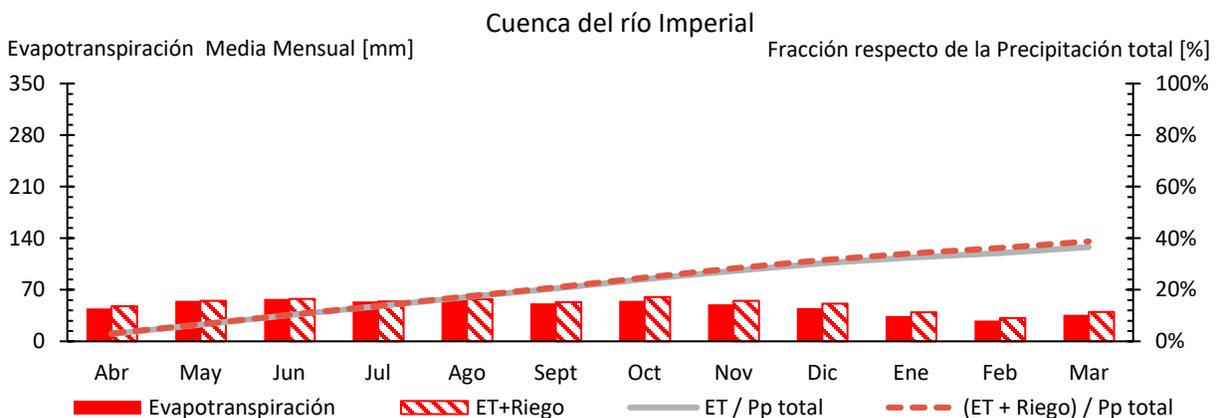
<sup>3</sup> En este estudio, se define el riego como la evapotranspiración potencial de los cultivos definidos según los usos de suelo determinados por Zhao et al. (2016), considerando que se debe entregar el 100% de este valor para que estos persistan en el tiempo.



(a) Distribución mensual de la precipitación promediada sobre la cuenca



(b) Distribución mensual de la escorrentía promediada sobre la cuenca



(c) Distribución mensual de la evapotranspiración promediada sobre la cuenca

**Figura 2.5:** Curva de variación estacional y fracción acumulada promedio durante el periodo 1985/1986 – 2014/2015 para la precipitación (panel a), escorrentía (panel b) y evapotranspiración (panel c) en la cuenca del río Imperial. Fuente DGA (2017).

## 2.3 AJUSTES METODOLÓGICOS PROPUESTOS

### 2.3.1 POTENCIALES MEJORAS EN LA ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO

Dentro de los desafíos encontrados en los estudios DGA (2017) y DGA (2018), es posible resumir mejoras o esfuerzos que permitan dar mayores luces sobre la oferta natural de los ríos de Chile. En particular, podría ser conveniente abordar los siguientes aspectos:

- Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo hidrológico, utilizando distintas métricas de evaluación. Esto permitiría comprender cómo variaciones de parámetros afectan diversos aspectos del comportamiento simulado a escala de cuenca (Mendoza et al., 2015; e.g., van Werkhoven, Wagener, Reed, & Tang, 2008).
- Análisis de incertidumbre para cuantificar explícitamente cómo los errores en las forzantes meteorológicas, estructura del modelo, parámetros y observaciones inciden en las estimaciones de balance hídrico.
- Analizar la estabilidad temporal de los parámetros de VIC u otro *land surface model* (e.g., Coron et al., 2012).
- Mejoras en la calibración individual de cuencas en régimen natural. Esto podría hacerse de varias formas:
  - i. Propuesta de nuevas funciones objetivo (e.g., Shafii & Tolson, 2015), orientadas a obtener parámetros hidrológicamente consistentes (Martinez & Gupta, 2011).
  - ii. Giro hacia algoritmos de calibración multiobjetivo, ya sea secuenciales o simultáneos.
- Incorporación de métodos de asimilación para mejorar la estimación de almacenamientos (y eventualmente parámetros).
- Comparación de resultados con otros modelos de land surface actualmente utilizados en el mundo (e.g., Noah-MP, CLM, mHM).
- Explorar el uso de estructuras de modelo flexibles (Clark et al., 2015, e.g., 2008; Niu et al., 2011), con el fin de cuantificar – de manera controlada – el efecto que tienen distintas opciones para decisiones de modelación “conflictivas” (e.g., flujo base).
- Explorar el uso de *storylines* (Clark et al., 2016) para cuantificar, de manera eficiente, los impactos de cambio climático con la incertidumbre asociada.

De los puntos anteriores, y dados los plazos del proyecto, sólo fue posible explorar el análisis de sensibilidad de parámetros del modelo VIC (Sección 6.1). Las otras sugerencias planteadas quedarán a criterio de los intereses de la DGA para futuros estudios.

### 2.3.2 MODIFICACIONES EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA

#### INCORPORACIÓN DE LAGOS

En base a las características específicas de la zona de estudio, uno de los aspectos que no se consideraban en las metodologías planteadas en los estudios DGA (2017) y DGA (2018) es la presencia de grandes cuerpos de agua. El modelo VIC contiene un módulo para lagos, el cual se basa en que una porción de píxel puede estar cubierta por un lago que recibe escorrentía producida por una fracción del resto de la celda, así como de un aporte externo, ambos ingresados antes de ejecutar el modelo. El caudal efluente

del lago se obtiene mediante la ecuación de vertedero, por lo cual se deben especificar la altura a la cual se comienza a verter y una curva de embalse dentro de los parámetros necesarios para ejecutar dicho módulo. Debido a la falta de información en la gran mayoría de los lagos en Chile, y por ser necesaria considerar una metodología aplicable a todos los lagos, se utiliza la información asociada a la curva de embalse y altura a la que comienza a verter recomendada por el modelo.

En base a la resolución espacial utilizada en el proyecto (0,05°x0,05°, que definen píxeles aproximados de 30 km<sup>2</sup>) y al tamaño de los lagos existentes en la zona de estudio (área máxima de 867 km<sup>2</sup>), los lagos están contenidos en múltiples píxeles. Por lo tanto, es necesario especificar una metodología para modelar los lagos, considerando un único píxel que abarca toda el área del lago y una calibración secuencial (ver Figura 2.6) basada en los siguientes pasos:

- i. Se obtienen la delimitación del lago presente en la cuenca, la cuenca aportante al lago y la cuenca completa sin considerar el lago.
- ii. Se calcula la fracción de área correspondiente a lago en cada píxel perteneciente a la cuenca.
- iii. Se asigna el área del lago a un único píxel. Sus forzantes meteorológicas se obtienen de promediar todas aquellas celdas que presenten área lacustre, ponderando por la fracción de área que presenta dicha cobertura. Este aporte se denominará "input vertical".
- iv. Se corre el modelo VIC en los píxeles pertenecientes a la cuenca aportante al lago, obteniendo el caudal afluente al mismo. Este aporte se denominará "input horizontal".
- v. Posteriormente, se simula el píxel representativo del lago, teniendo como aportes la precipitación representativa del píxel y el caudal afluente estimado. El caudal efluente se obtiene mediante el módulo lago de VIC, basado en la calibración de un tiempo de retardo. Este parámetro se calibra en aquellos lagos que tienen una estación fluviométrica directamente en el desagüe.
- vi. Finalmente, se simula hidrológicamente el resto de los píxeles de la cuenca y se estiman los valores de la función objetivo en la salida de la misma.



**Figura 2.6 Representación de los principales procesos para obtener el caudal efluente según la metodología propuesta.**

Esta metodología es válida de forma genérica tanto para lagos que tienen estaciones fluviométricas en el desagüe como las que poseen un lago en una parte intermedia. En ambos casos, el tiempo de retardo, que corresponde a un parámetro de calibración del modelo cuando se considera la metodología de lagos, se considera exclusivamente en el tránsito de caudal en el interior del lago. Sin

embargo, por simplicidad se consideraron sólo cuencas con estaciones fluviométricas a la salida de los lagos, ya que de esta forma se disminuye la incertidumbre asociada.

#### INCORPORACIÓN DEL APORTE GLACIAR

La metodología para estimar el aporte glaciar se basa en un balance de energía simplificado, donde la ecuación de partida considera los siguientes flujos energéticos para el manto de nieve sobre el glaciar, esta metodología ha sido testeada previamente en Chile en el estudio de Castillo (2015):

$$E_i = E_{ns} + E_{nl} + E_h + E_e + E_r + E_g - E_m \quad [W/m^2] \quad (2.1)$$

donde  $E_i$  es la variación del flujo de energía interna del manto nival,  $E_{ns}$  la energía neta de onda corta,  $E_{nl}$  la energía neta de onda larga,  $E_h$  el intercambio de calor en la interfaz nieve-aire,  $E_e$  el flujo convectivo de calor latente,  $E_r$  el intercambio de calor por eventos de precipitación,  $E_g$  el intercambio de energía entre el suelo y el manto de nieve y  $E_m$  el calor disponible para el derretimiento. Debido a la complejidad para estimar cada uno de los flujos, la ecuación (2.1) se simplifica para obtener la ecuación (2.2):

$$E_m = (1 - R_f') \cdot (E_{ns} + E_{nl}) = R_f' \cdot (E_{ns} + E_{nl}) \quad [W/m^2] \quad (2.2)$$

donde  $R_f'$  es un parámetro que se puede calibrar, mientras que los montos de  $E_{ns}$  y  $E_{nl}$  se pueden estimar. En consecuencia, el derretimiento se estima según la ecuación (2.2). El derretimiento potencial del glaciar ( $M_{ice}$ ) es una función de  $E_m$ .

Otro valor necesario para estimar el aporte glaciar es el volumen inicial del glaciar, el cual se obtiene a partir de la Ecuación (2.3):

$$V_g = c \cdot A_g^b \quad (2.3)$$

donde  $b$  y  $c$  son los coeficientes que relacionan el área ( $A_g$ ) y el volumen ( $V_g$ ). El detalle con todos los cálculos teóricos se encuentra en el Anexo A. Esta metodología de balance energético simplificado, presentada por Baraer (2012), implica estimar el área inicial en el año 1979 y el factor  $R_f'$  tal manera que el área modelada y observada (según el Inventario Oficial) sean la misma para el año de observación. En particular, en este proyecto se proponen las siguientes modificaciones respecto a la metodología anterior:

1. El parámetro  $b$  típicamente se considera constante e igual a 1,36. En este proyecto, se propone modificarlo según el valor del área del glaciar, como se plantea en la ecuación (2.4).

$$b = \begin{cases} 1,27 & \text{si } A_g < 30 \text{ km}^2 \\ 1,36 & \text{si } A_g > 30 \text{ km}^2 \end{cases} \quad (2.4)$$

2. Se permite que la nieve remanente sobre el glaciar al final del año hidrológico se incorpore al volumen de hielo. Esto implica que, en años muy lluviosos, donde no toda la nieve sobre el glaciar se derrite, el glaciar aumente de volumen.

### 2.3.3 REGIONALIZACIÓN DE PARÁMETROS

#### ASIGNACIÓN POR SIMILITUD

Para obtener los principales flujos hidrológicos en el territorio no afecto a calibración, es necesario transferir parámetros desde cuencas calibradas a zonas donde (i) no existen registros fluviométricos, (ii) no existe información fluviométrica suficiente (o confiable) para realizar una calibración y (iii) zonas con registros fluviométricos que se encuentran intervenidos. Este procedimiento se basa en una agrupación de pixeles según atributos físicos y climáticos (paso 1 en Figura 2.7), y en una posterior asignación de parámetros de cuencas calibradas hacia las clases de pixeles encontradas (paso 2 en Figura 2.7) el cual permite asignar cuencas calibradas a una clase de pixeles. Posteriormente, como una clase de pixeles puede contener varias cuencas calibradas, cada pixel recibe los parámetros de la cuenca perteneciente a esa clase de pixeles que sea “más” similar según algún índice de disimilitud (Beck *et al.*,2016), el cual corresponde al paso 3 de la Figura 2.7.

En resumen, los criterios mediante los cuales se transfieren parámetros son:

#### SIMILITUD

- Proximidad espacial: un pixel sin calibrar recibe los parámetros del pixel calibrado más cercano espacialmente.
- Similitud física: Se utiliza el índice propuesto por Beck *et al.* (2016) para establecer disimilitud. Un pixel sin calibrar recibe los parámetros de la cuenca más similar según atributos geomorfológicos.
- Similitud climática: Usando el índice propuesto por Beck *et al.* (2016), se asignan los parámetros a cada pixel que no fue calibrado según la cuenca calibrada más similar según atributos climáticos.
- Similitud física y climática: Se asignan los parámetros considerando la cuenca más similar considerando en conjunto atributos físicos y climáticos.

Luego de este proceso, se generan cuatro mapas con asignación de parámetros cuenca-pixel. Es decir, se reporta para cada pixel la cuenca calibrada que le dona parámetros del modelo hidrológico VIC mediante cada uno de los cuatro criterios de similitud.

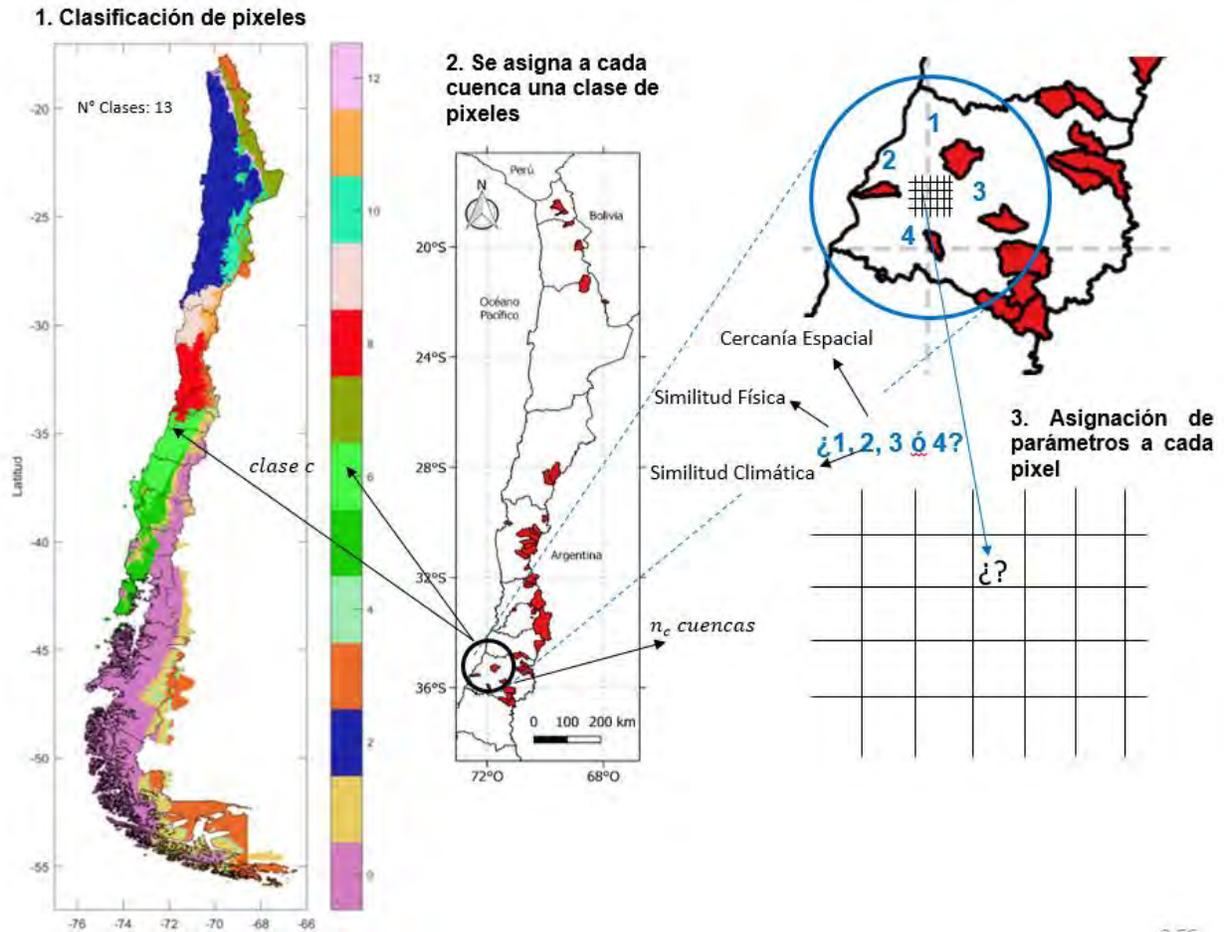


Figura 2.7: Ejemplo de procedimiento de regionalización de parámetros mediante clasificación de píxeles. Extraído de DGA (2018).

#### CON CLASIFICACIÓN DE PÍXELES Y ASIGNACIÓN POR SIMILITUD

En esta etapa, primero se obtienen grupos similares de píxeles (paso 1 de la Figura 2.7) mediante el software Autoclass-C<sup>4</sup> y, a cada grupo de píxeles, se le asignan cuencas calibradas mediante la metodología de Análisis de Discriminantes Lineales (LDA, por sus siglas en inglés, correspondiente al paso 2 de la Figura 2.7). En consecuencia, existen dos casos: (i) que un grupo de píxeles no tenga ninguna cuenca calibrada asignada o (ii) que haya más de una cuenca para cada grupo de píxeles. En el primer caso, la asignación de cuencas donantes de parámetros se establece mediante el índice de Beck *et al.* (2016) considerando todas las cuencas calibradas. En el segundo caso, la asignación es mediante el mismo índice, pero considerando sólo las cuencas que pertenecen al mismo grupo de píxeles según LDA (paso 3 de la Figura 2.7). Para la clasificación de píxeles, se consideran los siguientes criterios:

- Según atributos físicos: Uso de suelos, elevación media de la cuenca, porcentaje de arcilla, pendiente de la curva hipsométrica, entre otros.

<sup>4</sup> <https://ti.arc.nasa.gov/tech/rse/synthesis-projects-applications/autoclass/autoclass-c/>

- Según atributos climáticos: Equivalente a la clasificación física, salvo que los píxeles se agrupan según atributos climáticos, tales como la fracción de días con precipitación sólida, la estacionalidad de la precipitación respecto a la temperatura y el índice de aridez.
- Según atributos físicos y climáticos: Esta opción se incorpora, pero se generan demasiados grupos de píxeles, siendo insuficientes las cuencas calibradas para tantos grupos. Esta clasificación de píxeles se descarta por dicho motivo.

Luego de esta etapa, se generan cuatro mapas para cada criterio de clasificación de píxeles, siendo ocho en total. El resultante equivale a 12 mapas de asignación de parámetros (4 de similitud más 8 que incorporan agrupación de píxeles). Para encontrar aquel que arroje resultados cercanos (dentro de lo posible) a los valores calibrados, se lleva a cabo una validación cruzada, que consiste en estimar parámetros para cuencas controladas mediante alguno de los criterios expuestos y compararlas con las observaciones. El criterio seleccionado para la regionalización “óptima”, puede ser distinto al seleccionado en el estudio DGA (2018), puesto que las características climáticas y geomorfológicas de la zona de este estudio son distintas a las macrozonas norte y centro.

Por otro lado, el set de cuencas donantes también influye en la regionalización de parámetros. En consecuencia, si en la macrozona Norte-Centro se escogió un criterio mediante similitud físico-climática (por ejemplo), en la zona sur podría ser más apropiado un criterio de clasificación de píxeles según atributos climáticos y asignación por cercanía. El criterio final seleccionado para la macrozona Sur y parte norte de la macrozona Austral se encuentra en el acápite 6.2.4.

En el Anexo F se muestran los mapas con todos los criterios seleccionados para la regionalización de parámetros, tanto para la regionalización como para la validación cruzada. En esta etapa, para el set de cuencas donantes sólo se incorporan cuencas calibradas que se encuentren entre la región de Ñuble y la cuenca del río Cisnes.

### 3 INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

En el presente capítulo, se muestra la revisión de estudios previos, destacando los resultados más relevantes para el presente proyecto y levantamiento de información complementaria que puede aportar a la estimación del balance hídrico, donde se incluyen fuentes meteorológicas e hidrogeológicas.

#### 3.1 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

La recopilación de antecedentes se centró en la búsqueda de informes, estudios, tesis y artículos científicos disponibles tanto en organismos públicos como privados, incluyendo también estudios de Universidades y Centros de Investigación (nacionales e internacionales) que hubiesen generado estudios y artículos relevantes para las macrozonas Sur y Austral. Para cada estudio revisado, se genera una ficha que contiene una breve reseña, incluyendo un recuadro con información de localización (región, provincia, cuenca).

Entre la bibliografía considerada, se incluye la revisión de los estudios según solicitud de las bases del contrato que se detallan en la Tabla 3.1 y los estudios científicos señalados en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.1: Estudios DGA por mandato de la Dirección General de Aguas.**

Código ID (Año)	Nombre Estudio	Resultados Relevantes
DGA 1 (2015c)	Análisis y Modelación Hidrológica del río Palena	Curva área-volumen del lago Risopatrón. Sensores para medir el nivel de agua del lago y estimación de curva de descarga
DGA 2 (2008b)	Levantamiento de parámetros para la modelación hidrológica de cuencas pluviales no controladas en la VII y VIII región	Calibración de 18 cuencas pluviales en régimen natural, buscando regionalizar los parámetros, lo que no fue posible.
DGA 3 (2013c)	Modelación Hidrogeológica Cuenca Itata Bajo	Se estima que la profundidad hasta la roca madre es de 100 m. La modelación se realizó con información entre agosto y septiembre de 2013 a nivel de subcuenca (24 en total), obteniendo valores de recarga entre 0 y 65 l/s. En invierno, el sistema presenta entradas de 2.311 l/s, siendo la recarga lateral el componente principal. Casi todo este caudal de entrada vuelve al sistema superficial, y solo 133 l/s saldrían hacia el mar de forma subterránea
DGA 4 (2008c)	Dinámica de cobertura nival entre las cuencas de los ríos Copiapó y Petrohué utilizando imágenes satelitales	Se obtiene la cobertura nival entre las cuencas de los ríos Copiapó y el río Petrohué, desde abril del año 2000 hasta el 31 de marzo de 2007. La cobertura se obtiene a partir del cálculo del índice NDSI (Normalized Difference Snow Index) que permite identificar rápidamente cobertura nival. Cuantificar la

Código ID (Año)	Nombre Estudio	Resultados Relevantes
		nieve por rangos de altitud y exposición, tras un procesamiento de modelos de elevación digital. Los resultados muestran la estimación de cobertura para las zonas norte, centro y sur considerando un año normal. Los patrones de cobertura según orientación y altura resultan poco significativos.
DGA 5 (2012a)	Modelación del Balance de Masa y descarga de agua en glaciares de Chile Central	El balance de masa en el año 2012 (hasta el 10 de diciembre) fue de una acumulación neta de 3 Mm <sup>3</sup> para el glaciar San Francisco y 17,8 Mm <sup>3</sup> para el Pirámide.
DGA 6 (2008d)	Balance Glaciológico del Glaciar Nef, campo de Hielo Norte, y catastro de glaciares de algunas cuencas de la zona central y sur del país	Durante el período 27/05/2008-13/10/2008, el glaciar Nef tuvo un balance de masa promedio de 2,4 m.e.a. Se realiza una modelación hidrológica mediante HYDRA a escala temporal mensual y escala espacial de 0,5°.
DGA 7 (2008e)	Investigaciones y escorrentía de deshielo en la cuenca alta del río Aconcagua. Aplicación de modelos de simulación nival y de pronóstico de volúmenes de deshielo	Se utilizan los modelos FTXZ, SNOW-17 y MSND para generar el pronóstico de deshielo. En base al modelo de base física MSND, se revisan variables de estado y flujos, como manto nival y flujos de deshielo.
DGA 8 (2011b)	Investigación de los aportes nivoglaciares en algunas cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo y Rapel; y estimación de los efectos del cambio climático.	Se obtiene una productividad en el período de deshielo para cuencas entre el Aconcagua y Tinguiririca, basada en el porcentaje de área glaciar
DGA 9 (2011c)	Variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas	Se comprueba una tendencia generalizada de retroceso frontal y reducción de áreas glaciares, siendo éstas mayores en las zonas Sur y Austral
DGA 10 (2012b)	Caracterización y monitoreo de glaciares rocosos en la cuenca del río Elqui y balance de masa del glaciar Tapado	Balance geodésico del glaciar tapado entre 11/2011-04/2012 de -0,98 m.a.e. (compuesto por una acumulación de 0,157 y una ablación de -1,138 m.a.e.). Contrastando con información del año 2012, se obtiene una disminución de -4,4 m.a.e./2 años.
DGA 11 (2012c)	Variaciones recientes de glaciares en respuesta al cambio climático características glaciológicas de los glaciares san Rafael, Nef y Colonia, campo de hielo norte	Se obtiene el espesor medio de los glaciares San Rafael, Colonia y Nef para el año 2012 (501, 454 y 429 metros, respectivamente), con estimación de volúmenes de 17,1 km <sup>3</sup> para el glaciar Colonia y 8,6 km <sup>3</sup> para el Nef.

Código ID (Año)	Nombre Estudio	Resultados Relevantes
DGA 12 (2015b)	Modelación del Balance de Masa y descarga de agua en glaciares del Norte Chico Chile Central	Se presenta la información de los glaciares Tapado, rocosos Tapado, Llano de las liebres, San Francisco, Pirámide, Bello y Yeso entre los años hidrológicos 2013-2015 y de octubre a diciembre de 2015
DGA 13 (2013b)	Implementación Nivel 2 Estrategia Nacional de Glaciares: Mediciones Glaciológicas Terrestres en Chile Central, Zona Sur y Patagonia	En base a balizas instaladas, se obtiene una ablación promedio entre el 28 de marzo y 30 de abril del 2013 de 0,2 cm.a <sup>5</sup> /día para el glaciar Bello y 0,1 cm.a./día para el glaciar Yeso. También existe información en base a análisis de imágenes LIDAR.
DGA 14 (2016a)	Estudio Hidrogeológico, región de la Araucanía	Estimación de recarga mediante el modelo ExtendSim: Imperial (20,6 m <sup>3</sup> /s); Toltén (30,7 m <sup>3</sup> /s); Budi (0,56 m <sup>3</sup> /s); Costeras B-T (0,28 m <sup>3</sup> /s), y; Queule (1,94 m <sup>3</sup> /s). La conductividad hidráulica en la capa 1 oscila entre un rango de 0,125 y 25 m/día, en la capa 2 entre 0,01 y 25 m/día, y en la capa 3 oscila entre 0,1 y 100 m/día.
DGA 15 (2014a)	Estimación Preliminar de las Recargas de aguas subterráneas y Determinación de los Sectores Hidrogeológicos de aprovechamiento común en las cuencas de las regiones del Maule, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos	El cálculo de las recargas se realiza mediante las precipitaciones medias, obtenidas por las isoyetas del balance hídrico de Chile de 1987 y por un factor de infiltración (2% Cordillera de la Costa, 5% Depresión Intermedia y 1% Cordillera Principal).
DGA 16 (2015c)	Análisis y modelación hidrológica cuenca del Río Cisnes	Se caracterizó la geometría de la Laguna Escondida con las relaciones nivel del lago, superficie y volumen
DGA 17 (2008a)	Levantamiento de parámetros para la modelación de cuencas pluviales no controladas en la IX región de la Araucanía.	Se realiza un control de calidad de datos de cuencas y forzantes. Recopilan información de suelo como conductividad hidráulica. Se concluye de este trabajo que el modelo resulta insuficiente en sus capacidades para representar adecuadamente los caudales

<sup>5</sup> Algunas unidades típicas utilizadas en glaciología que se presentan en esta tabla son:  
m.a.e = metros de agua equivalente.  
cm.a = centímetros de agua;

Código ID (Año)	Nombre Estudio	Resultados Relevantes
DGA 18 (2016b)	Análisis efecto en el régimen hídrico por cambio en patrones meteorológicos	Se analiza la disponibilidad de recurso hídrico mediante el cruce de la oferta y demanda de agua en cuencas priorizadas por macrozona. Mediante el test de diferencias de medias, se determinó que al comparar el periodo 1960 – 1986 frente al de 1987 – 2014, en la mayoría de las estaciones analizadas se observan aumentos del orden de 0,5 y 1°C en la temperatura media anual.
DGA 19 (2014b)	Redefinición de la clasificación red hidrogeográfica a nivel Nacional	Se actualiza la delimitación de cuencas (101), subcuencas (491) y sub-subcuencas (1.481) en base a criterios hidrográficos, considerando para esto el modelo de elevación digital ASTER GDEM V.2.
DGA 20 (1983)	Balance Hidrológico Nacional: X Región. Informe Final.	Se realiza el balance hidrológico a escala de cuenca entre las provincias de Ranco y Palena, basado en la metodología señalada por UNESCO, 1982, obteniendo las isotermas, isoyetas e isolíneas de escurrentía y evapotranspiración de referencia. La metodología considera la información hidrometeorológica existente entre 1950 y 1980.

Tabla 3.2: Estudios científicos revisados en función de lo solicitado por la Dirección General de Aguas.

Código ID (Año)	Nombre Estudio	Resultados Relevantes
Cient 1 (2015)	Orographic effects of the subtropical and extratropical Andes on upwind precipitating clouds	Se identifica que las variaciones interanuales en montos de precipitación en cordillera se deben a aumentos tanto en la intensidad como frecuencia de las lluvias
Cient 2 (2017)	Temporal and spatial evaluation of satellite-based rainfall estimates across the complex topographical and climatic gradients of Chile	Presenta siete productos satelitales diferentes que incluyen precipitación diaria, en distintos periodos temporales y según distintas metodologías. Los resultados indican que estos productos tienen un mejor desempeño en las zonas centro y sur de Chile, en particular en las zonas de elevaciones bajas a medias. Como conclusión, el producto satelital que mejor se ajusta al territorio nacional es PGFv3.
Cient 3 (2012)	Balance hídrico mensual de una cuenca Patagónica de Chile: Aplicación de un modelo parsimonioso	La escorrentía anual se estima mediante transposición de caudales, $ET_0$ se estima mediante Hargreaves. Déficit de precipitaciones 42,4% al balance DGA (1987). Diferencias en escorrentía es de 45,9%. Coeficiente de escorrentía DGA (1987) 0,61 y del estudio 0,57. Se cree que Isoyetas antiguas sobreestiman precipitación.
Cient 4 (2001)	Contribución al estudio del Balance Hídrico de una cuenca de uso múltiple en el centro-sur de Chile: La cuenca del río Laja	Se utiliza la misma ecuación del balance DGA (1987). La ET se calcula mediante Turc en zonas con vegetación natural, Blaney & Criddle en zonas con riego y con la fórmula de Langbein para cuerpos de agua. La evapotranspiración real corresponde a montos que van desde un 25% a un 57% de la precipitación. El error en el balance varía entre un 6 y un 36%.

Código ID (Año)	Nombre Estudio	Resultados Relevantes
Cient 5 (2015)	Physically Based Mountain Hydrological Modeling Using Reanalysis Data in Patagonia	Se modela la cuenca del río Baker mediante el modelo hidrológico CRHM, usando como forzantes la serie de datos extraída desde el reanálisis ERA-Interim. Las observaciones no reflejan bien la hidrología del lugar pues se encuentran en sectores con cotas bajas y al este de la cordillera, por lo que los grandes eventos de precipitación no son capturados adecuadamente. La capacidad de CRHM para reproducir los caudales aumenta de 0,3 a 0,7 si se considera la información de reanálisis en vez de las estaciones meteorológicas. La evapotranspiración asciende a un 7,2% de la precipitación, mientras que la sublimación y la evaporación desde el agua interceptada representan menos del 1%.
Cient 6 (2007)	The cold regions hydrological model (CRHM): a platform for basin process representation and model structure on physical evidence	Plantean un modelo hidrológico de base física que utiliza la unidad de respuesta hidrológica.
Cient 7 (2005)	Efectos hidrológicos de los usos eléctricos y agrícola en la cuenca del Río Laja	Los principales resultados muestran que el riego extrae aproximadamente el 24% del caudal del río Laja, con un máximo mensual de 50%. Además, la generación eléctrica provoca que el nivel de la laguna Laja se encuentre 27 (m) más bajo que su nivel en régimen natural
Cient 8 (2016)	Seasonal hydrography and surface outflow in a fjord with a deep sill: The Reloncaví fjord, Chile	El estudio presenta una caracterización de la meteorología y principales flujos de agua y concentraciones en el fiordo de Reloncaví. Los resultados son relevantes desde el punto de vista oceanográfico, pero su utilidad es bastante limitada para los objetivos de la actualización del Balance Hídrico.

Código ID (Año)	Nombre Estudio	Resultados Relevantes
Cient 9 (2016)	Streamflow variability in the Chilean Temperate-Mediterranean climate transition (35°S–42°S) during the last 400 years inferred from tree-ring records.	Se reconstruyen caudales en base a muestras de anillos de árboles en la cuenca del río Biobío entre los años 1500 y 2000.
Cient 10 (2009)	Análisis geo-estadístico para describir la distribución espacial de la precipitación de una cuenca patagónica.	Se generan campos de precipitación a escala mensual en la zona norte de la XI región de Aysén, utilizando técnicas geo-estadísticas, en base a información rellenada de estaciones disponibles.

La forma de presentar la revisión bibliográfica sigue el formato de la Tabla 3.3, donde se destacan los puntos clave, el resumen y localización geográfica, entre otros aspectos. En esta tabla se muestra, a modo de ejemplo, la revisión del estudio DGA (2013), dejándose las otras fichas en el Anexo B. Todos los antecedentes recopilados son utilizados, en la medida que sean homologables, como potenciales medidas de verificación de los procesos hidrológicos modelados.

Tabla 3.3: Ficha ejemplo revisión de antecedentes

<b>Tipo de Información</b>	Estudio DGA		
<b>Título</b>	Dinámica de cobertura nival entre las cuencas de los ríos Copiapó y Petrohué utilizando imágenes satelitales		
<b>Año</b>	2008	<b>Código ID</b>	DGA 4
<b>Autores</b>	DGA-MOP		
<b>Elaborado por</b>	Pontificia Universidad Católica de Chile		
<b>Ámbito Geográfico</b>	<b>Región</b>	<b>Provincia</b>	<b>Cuenca(s)</b>
	Atacama a Los Lagos	-	Copiapó a Petrohué
<b>Tipo de Antecedentes</b>	<b>Demanda y Usos de Agua</b>	<b>Calidad de Aguas</b>	<b>Otros</b>
			x
<b>Puntos clave</b>	Cobertura nival, MODIS.		
<b>Objetivos(s) de la información</b>			
Obtención de la dinámica nival entre las cuencas de los ríos Copiapó y Petrohué.			
<b>Temática y resultados de interés</b>			
<p>Se obtiene entre las cuencas de los ríos Copiapó (región de Atacama) y el río Petrohué (región de Los Lagos). La cobertura temporal abarca desde abril del año 2000 hasta el 31 de marzo de 2007 (siete años hidrológicos).</p> <p>La cobertura se obtiene a partir del cálculo del índice NDSI (Normalized Difference Snow Index) que permite identificar rápidamente cobertura nival. Se considera que un pixel está cubierto por nieve si el valor del índice NDSI es mayor a 0,4.</p> <p>Para obtener relaciones con la topografía, se descargan modelos de elevación digital con una resolución espacial de 90 m las que, después de su procesamiento, permite cuantificar la nieve por rangos de altitud y exposición.</p> <p>Los resultados muestran la estimación de cobertura para las zonas norte, centro y sur considerando un año normal. Los patrones de cobertura según orientación y altura resultan poco significativos.</p> <p>Además, se establece que: (1) la disponibilidad de imágenes disminuye drásticamente al sur de la región del Biobío, y (2) las imágenes en general tienen muchos vacíos, por lo que no se pudo construir una base de datos robusta de cobertura nival.</p>			

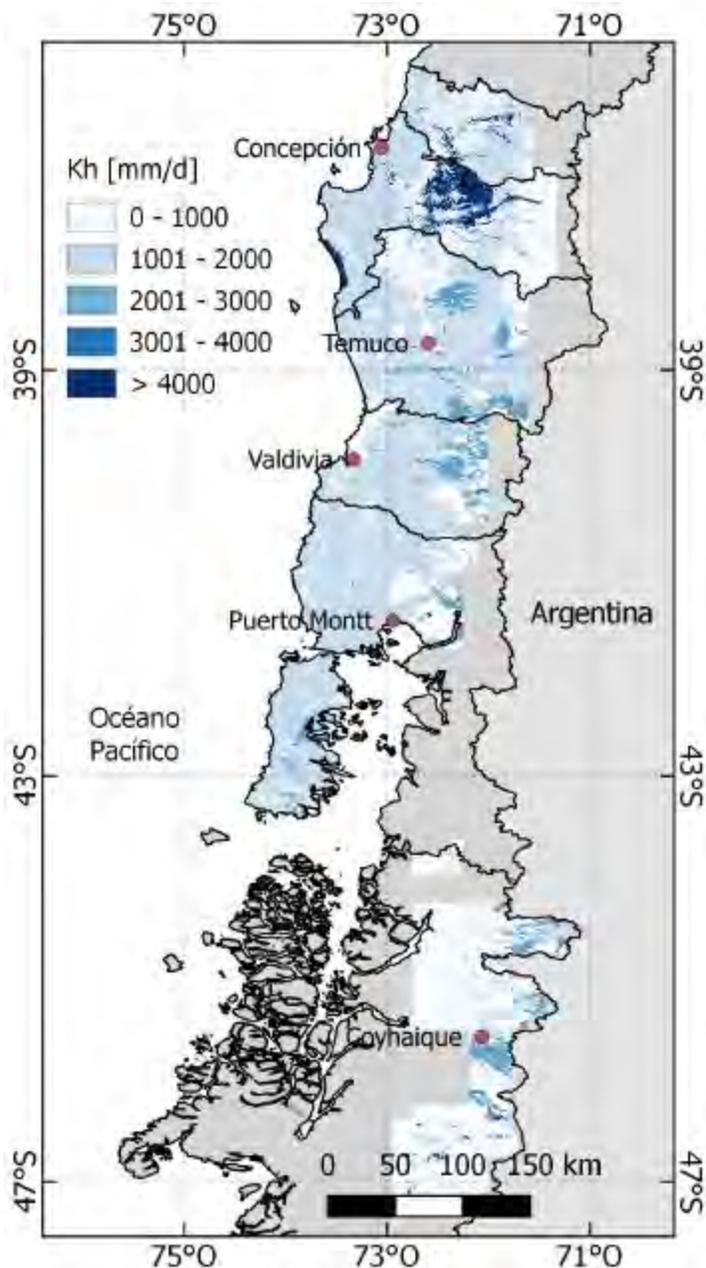
### 3.2 INFORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA

La información recopilada corresponde principalmente a mediciones diarias de caudales en las estaciones fluviométricas vigentes y con disponibilidad de datos comprendidas entre las regiones del Biobío y la parte norte de la región de Aysén (macrozonas Sur y parte norte de la Austral) e información de suelos proveniente de CIREN<sup>6</sup>, la que es utilizada para actualizar la estimación de distribución espacial a priori de la conductividad hidráulica. De la información proporcionada por CIREN (relacionada con el tipo de suelo), se puede distribuir espacialmente la conductividad hidráulica (K) en aquellas zonas con información, cuyo resultado se muestra en la Figura 3.1. En aquellas zonas donde no hay información disponible (área gris), se impone un valor de conductividad hidráulica igual a 100 mm/d proveniente de una estimación usando el Mapa Geológico Nacional, cuyos valores se obtuvieron en el estudio DGA (2018).

Cabe destacar que la zona de estudio de este estudio no es la misma que la de DGA (2018), pero dado que el Mapa Geológico Nacional abarca todo Chile, el criterio y los montos son aplicables y extensibles a la zona de estudio del presente informe.

---

<sup>6</sup> CIREN. Centro de Información de Recursos Naturales



**Figura 3.1:** Distribución de la conductividad hidráulica estimada a partir de la información de tipo de suelos otorgada por CIREN. Los montos son utilizados de forma referencial en el modelo VIC.

La información hidrológica recopilada se utilizó para realizar las estimaciones de recarga potencial mediante las dos técnicas seleccionadas en el proyecto “Actualización del Balance Hídrico Nacional”, ambas basadas en mediciones de caudal. Por otra parte, la información de niveles estáticos en pozos de agua de las macrozonas Sur y parte norte de la Austral ha evidenciado que las frecuencias de medición de los niveles de agua, en el mejor de los casos bimensual, es insuficiente para estimar tasas de recarga con poca incertidumbre (DGA, 2017).

La metodología para la estimación de la recarga potencial de aguas subterráneas es la misma propuesta en DGA (2017), probada en 61 cuencas pequeñas de las macrozonas Sur y parte norte de la macrozona Austral, donde todas ellas fueron consideradas en régimen natural. Los métodos del desplazamiento de la curva de recesión en base a Rorabaug (1964) (RORA), y el de escurrimiento promedio mínimo mensual (MoMLRr) no tienen modificaciones para este informe.

Los cálculos de recarga de agua subterránea se encuentran desarrollados en el Anexo C y se presentan en la Tabla 3.4. Adicionalmente, se muestra su ubicación geográfica aproximada en la Figura 3.2. Se dejan en blanco aquellas cuencas en que la disponibilidad de datos de caudal es insuficiente para realizar de manera correcta la estimación de la recarga potencial de aguas subterráneas con una o ambas metodologías.

**Tabla 3.4: Estimaciones de recarga de agua subterránea en las cuencas en régimen natural de las macrozonas Sur y parte norte de la Austral.**

ID	Código BNA	Estación Fluviométrica	MoMLRr [mm/año]	RORA [mm/año]
1	8104001	Río Sauces Antes Junta con Ñuble	494,2	1.415,7
2	8112001	Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco	222,8	1.601,1
3	8117004	Río Chillán en Esperanza	1.002,8	1.872,9
4	8117008	Río Quilmo en Camino a Yungay	-	-
5	8118001	Río Changaral Camino a Portezuelo	67,6	264,7
6	8124001	Río Itata en General Cruz	184,7	887,8
7	8135002	Río Itata en Balsa Nueva Aldea	150,9	616,0
8	8144001	Río Lonquén en Trehuaco	35,7	197,6
9	8220001	Río Andalién Camino a Penco	102,9	330,3
10	8307002	Río Bio Bío En Llanquén	374,4	1.160,5
11	8308000	Río Lomín en Puente La Junta	-	-
12	8313000	Río Pangue en Captación	1.039,0	2.324,9
13	8316002	Río Huequecura Aguas Arriba de Embalse Angostura	-	1.990,3
14	8317002	Río Lirquén en Cerro El Padre	175,9	1.559,2
15	8323002	Río Duqueco en Villucura	525,6	1.681,1
16	8324002	Estero Paillahue en Ex Longitudinal Sur	-	-
17	8330001	Río Mulchén en Mulchén	364,3	1.118,6
18	8332001	Río Bureo en Mulchén	431,0	1.631,7
19	8342001	Río Renaico en Longitudinal	466,5	1.655,0
20	8343001	Río Mininco en Longitudinal	244,9	998,4
21	8351001	Río Malleco en Collipulli	348,5	1.493,4
22	8356001	Río Rahue en Quebrada Culén	16,7	179,6
23	8362001	Río Nicodahue en Pichún	365,7	1.082,2
24	8366002	Estero Quilque en Los Ángeles	1.684,0	-

ID	Código BNA	Estación Fluviométrica	MoMLRr [mm/año]	RORA [mm/año]
25	8385001	Río Claro en Camino Yumbel-Estación	261,3	629,7
26	8393002	Estero Hualqui en Desembocadura	49,8	48,8
27	8430001	Río Laraquete en El Cajón	539,2	1.161,2
28	8530001	Río Carampangue en Carampangue	-	-
29	8720001	Río Lebu en Las Corrientes (en Los Álamos)	255,6	-
30	9101001	Río Purén en Tranamán	319,7	827,2
31	9101002	Río Purén en Purén	367,3	1.064,2
32	9102001	Río Lumaco en Lumaco	144,0	495,3
33	9104002	Río Dumo en Santa Ana	16,8	155,9
34	9107001	Estero Chufquén en Chufquén	88,5	661,3
35	9129002	Río Cautín en Cajón	583,9	1.372,1
36	9135001	Río Quepe en Quepe	510,7	1.439,7
37	9404001	Río Allipén en Los Laureles	1.250,4	2.243,8
38	9416001	Río Liucura en Liucura	952,2	2.577,1
39	9434001	Río Donguil en Gorbea	200,9	1.147,5
40	9436001	Río Mahuidanche en Santa Ana	463,2	1.196,3
41	10102001	Río Liquiñe en Liquiñe	1.564,4	2.751,4
42	10134001	Río Cruces en Rucaco	328,9	1.248,1
43	10137001	Río Iñaque en Máfil	306,5	980,9
44	10140001	Río Santo Domingo en Rinconada de Piedra	628,8	1.930,7
45	10142003	Río Futa en Tres Chiflones	320,8	886,1
46	10305001	Río Caunahue Camino a Llifén	780,9	2.282,1
47	10313001	Río Llollehue en La Unión	291,9	589,4
48	10322003	Río Golgol en Puente N°2	1.965,1	3.104,6
49	10327001	Río Chirre Antes Junta Río Pilmaiquén	575,9	1.430,2
50	10343002	Río Coihueco Antes Junta Río Rahue	605,7	1.419,1
51	10356001	Río Negro en Chahuilco	165,9	681,5
52	10401001	Río Tranallaguin en Carrico	168,3	638,8
53	10405001	Río Hueyusca en Ñapenco	-	-
54	10432003	Río Chico Antes Río Chamiza	421,1	1.805,2
55	10503001	Río Manso Antes Junta Río Puelo	626,5	1.873,2
56	10701002	Río Espolón en Desagüe Lago Espolón	1.624,5	3.123,4
57	10702002	Río Futaleufú en La Frontera	829,2	1.106,1
58	11020004	Río Tigre en La Frontera	720,7	1.453,8
59	11130001	Río Ventisquero en Carretera Austral	2.126,9	-
60	11143001	Río Cisnes Antes Junta Río Moro	201,1	457,4
61	11143002	Río Moro Antes Junta Río Cisnes	304,5	742,3

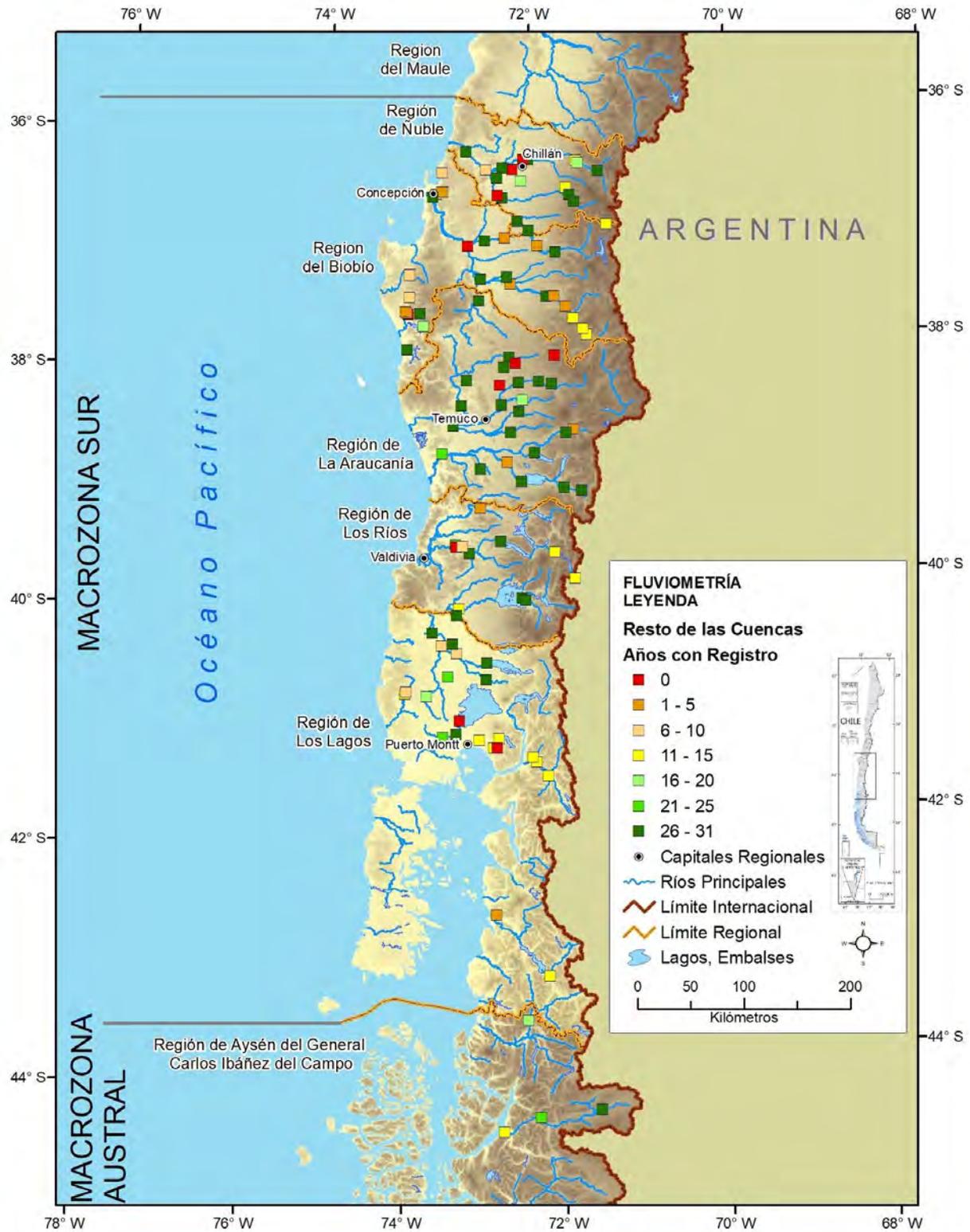


Figura 3.2: Mapa de ubicación de las estaciones fluviométricas en régimen natural consideradas.

Para identificar con precisión las variaciones en los cálculos de recarga en las estaciones fluviométricas de control, se calculó un porcentaje de variación de un método con respecto al otro ocupando la siguiente ecuación:

$$x\% = (1 - MoMLRr/RORA) * 100$$

Las variaciones entre ambas estimaciones se presentan en la Tabla 3.5, donde se puede observar que los resultados obtenidos con RORA tienden, en general, a ser mayores con respecto a los resultados obtenidos con el método MoMLRr. Se destacan aquellas cuencas con valores de Porcentaje MoMLRr vs RORA mayores al 60%, aunque sin ser mayor a un orden de magnitud de diferencia. Los mayores valores de este porcentaje se observan en la parte Norte del área de estudio (Regiones de Ñuble y Biobío) mientras que la diferencia parece decrecer hacia el Sur. Esto puede ser producto de las diferencias metodológicas usadas para la estimación, ya que MoMLRr representa la descarga de agua subterránea al caudal durante periodos de recarga nula, la cual puede ser usada como un indicador relativo de la cantidad de agua que existe en el sistema durante períodos de tiempo anterior al período de recarga nula. En cambio, RORA se basa en el supuesto de que la recarga de agua ocurre durante eventos discretos que son más o menos concurrentes con los máximos de caudal. Por ello, a pesar de que ambas usen el mismo registro de caudales para los cálculos, cada una ocupa partes distintas de éste y por eso no necesariamente las estimaciones de ambas técnicas son concordantes.

**Tabla 3.5: Porcentaje de diferencia en las estimaciones de recargas ocupando los métodos MoMLRr y RORA. Los valores destacados con rojo indican diferencias mayores al 60%.**

ID	Estación Fluviométrica	MoMLRr [mm/año]	RORA [mm/año]	Porcentaje MoMLRr vs RORA
1	Río Sauces Antes Junta con Ñuble	494,2	1.415,7	65,1
2	Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco	222,8	1.601,1	86,1
3	Río Chillán en Esperanza	1.002,8	1.872,9	46,5
5	Río Changaral Camino a Portezuelo	67,6	264,7	74,5
6	Río Itata en General Cruz	184,7	887,8	79,2
7	Río Itata en Balsa Nueva Aldea	150,9	616,0	75,5
8	Río Lonquén en Trehuaco	35,7	197,6	81,9
9	Río Andalién Camino a Penco	102,9	330,3	68,8
10	Río Bio Bío En Llanquén	374,4	1.160,5	67,7
12	Río Pangué en Captación	1.039,0	2.324,9	55,3
14	Río Lirquén en Cerro El Padre	175,9	1.559,2	88,7
15	Río Duqueuco en Villucura	525,6	1.681,1	68,7
17	Río Mulchén en Mulchén	364,3	1.118,6	67,4
18	Río Bureo en Mulchén	431,0	1.631,7	73,6
19	Río Renaico en Longitudinal	466,5	1.655,0	71,8

ID	Estación Fluviométrica	MoMLRr [mm/año]	RORA [mm/año]	Porcentaje MoMLRr vs RORA
20	Río Mininco en Longitudinal	244,9	998,4	75,5
21	Río Malleco en Collipulli	348,5	1.493,4	76,7
22	Río Rahue en Quebrada Culén	16,7	179,6	90,7
23	Río Nicodahue en Pichún	365,7	1.082,2	66,2
25	Río Claro en Camino Yumbel-Estación	261,3	629,7	58,5
26	Estero Hualqui en Desembocadura	49,8	48,8	-2,1
27	Río Laraquete en El Cajón	539,2	1.161,2	53,6
30	Río Purén en Tranamán	319,7	827,2	61,4
31	Río Purén en Purén	367,3	1.064,2	65,5
32	Río Lumaco en Lumaco	144,0	495,3	70,9
33	Río Dumo en Santa Ana	16,8	155,9	89,2
34	Estero Chufquén en Chufquén	88,5	661,3	86,6
35	Río Cautín en Cajón	583,9	1.372,1	57,4
36	Río Quepe en Quepe	510,7	1.439,7	64,5
37	Río Allipén en Los Laureles	1.250,4	2.243,8	44,3
38	Río Liucura en Liucura	952,2	2.577,1	63,1
39	Río Donguil en Gorbea	200,9	1.147,5	82,5
40	Río Mahuidanche en Santa Ana	463,2	1.196,3	61,3
41	Río Liquiñe en Liquiñe	1.564,4	2.751,4	43,1
42	Río Cruces en Rucaco	328,9	1.248,1	73,6
43	Río Ñaqué en Máfil	306,5	980,9	68,8
44	Río Santo Domingo en Rinconada de Piedra	628,8	1.930,7	67,4
45	Río Futa en Tres Chiflones	320,8	886,1	63,8
46	Río Caunahue Camino a Llifén	780,9	2.282,1	65,8
47	Río Llollehue en La Unión	291,9	589,4	50,5
48	Río Golgol en Puente N°2	1.965,1	3.104,6	36,7
49	Río Chirre Antes Junta Río Pilmaiquén	575,9	1.430,2	59,7
50	Río Coihueco Antes Junta Río Rahue	605,7	1.419,1	57,3
51	Río Negro en Chahuilco	165,9	681,5	75,7
52	Río Tranallaguín en Carrico	168,3	638,8	73,7
54	Río Chico Antes Río Chamiza	421,1	1.805,2	76,7
55	Río Manso Antes Junta Río Puelo	626,5	1.873,2	66,6
56	Río Espolón en Desagüe Lago Espolón	1.624,5	3.123,4	48,0
57	Río Futaleufú en La Frontera	829,2	1.106,1	25,0
58	Río Tigre en La Frontera	720,7	1.453,8	50,4
60	Río Cisnes Antes Junta Río Moro	201,1	457,4	56,0
61	Río Moro Antes Junta Río Cisnes	304,5	742,3	59,0

Estudios previos de recargas en el área de estudio que utilizan otras metodologías muestran valores de recarga notablemente menores. En DGA (2014), se realiza una estimación de recargas basado en las precipitaciones y coeficientes de infiltración para las cuencas entre la VIII Región del Biobío y la X Región de Los Lagos, y sus resultados se muestran en la Tabla 3.6. Los valores de recarga no superan los 200 mm/año en ninguna cuenca, lo cual se debe tanto a las diferencias en las metodologías como también a que las cuencas definidas tienen un área mayor, lo que influye en la interpolación de los valores de las precipitaciones.

Por los motivos anteriormente expuestos, no es posible realizar una comparación entre el estudio DGA (2014) y las obtenidas por las metodologías planteadas en el presente estudio pues se difiere tanto en superficie considerada, como en distintas fuentes de información meteorológica que se traduce en estas diferencias.

**Tabla 3.6: Estimación de recargas para las cuencas del sur de Chile (DGA, 2014)**

<b>Nombre Cuenca</b>	<b>Recargas [mm/año]</b>	<b>Nombre Cuenca</b>	<b>Recargas [mm/año]</b>
Biobío Inferior	21,7	Río Calle Calle	120,3
Biobío Superior	153,8	Río Cruces	97,8
Biobío Medio	88,8	Valdivia Alto	49,9
Chanco Alto	38,5	Valdivia Inferior	40,8
Cobquecura	18,2	Valdivia Superior	186,4
Itata Inferior	45,1	Ancud	108,9
Itata Superior	77,0	Bahía Mansa	58,6
Laguna del Laja	24,8	Castro	98,3
Lanahue	37,3	Chepu	148,8
Lebu	43,6	Cochamó	90,8
Lleulleu	33,8	Comau	53,2
Nahuelbuta	39,2	Hornopirén	91,5
Ñuble Alto	25,9	Huequi	92,5
Pingüeral	24,3	Huillinco	44,8
Quiapo	25,1	Lago Chapo	81,6
Río Andalién	26,0	Lago Llanquihue	100,5
Río Laja	55,0	Llico	47,6
Tavoleo	23,6	Petrohué	41,6
Alto Bío Bio	23,6	Piuchén	58,3
Cautín	113,9	Puelo	37,2
Cholchol	54,3	Quellón	39,2
Imperial Bajo	19,4	Rahue	88,9
Lago Budi	19,7	Reñihue	54,0
Purén	23,1	Río Blanco	86,1

<b>Nombre Cuenca</b>	<b>Recargas [mm/año]</b>	<b>Nombre Cuenca</b>	<b>Recargas [mm/año]</b>
Río Renaico	102,1	Río Canef	70,8
Río Vergara	65,8	Río Chaitén	84,3
Ríos Colpi Quillén	67,6	Río Corcovado	77,9
Toltén Alto	165,9	Río Daye	70,8
Toltén Bajo	28,1	Río Futaleufú	37,5
Toltén Medio	87,2	Río Huellas	72,8
Bueno Inferior	43,2	Río Maullín	90,8
Bueno Superior	34,7	Río Palena	66,1
Colún	46,0	Río Puritauquén	78,7
Loncoyén	37,7	Río Tictoc	78,7
Mehuín	31,5	Río Yelcho	56,8
Río Bueno	86,0	Vodudahue	55,9

## 4 FORZANTES METEOROLÓGICAS

En el proyecto Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017), se realizó un levantamiento general de la información meteorológica disponible, productos atmosféricos e información hidrogeológica relevante para la zona de estudio. Para este proyecto, se utilizan las mismas fuentes de información, actualizadas a la fecha actual en la medida de lo posible. Si bien las simulaciones se presentan en un periodo consecuente a lo desarrollado en DGA (2018), una mayor cantidad de observaciones fuera de este periodo puede ser beneficiosa en el desarrollo de fuentes de información para el periodo en estudio (1985-2015).

### 4.1 FUENTES DE INFORMACIÓN BASE

En lo referente a meteorología, DGA (2018) identifica cuatro grandes fuentes de información que se aplicaron como insumo de entrada para el desarrollo de la información meteorológica. Estas fuentes también son válidas para el presente dominio de estudio, y se describen brevemente a continuación.

#### 4.1.1 REGISTROS METEOROLÓGICOS

Se cuenta con información de registro de variables meteorológicas, como precipitación, temperatura, humedad relativa y viento, en estaciones operadas por distintas instituciones, entre las que destacan la Dirección General de Aguas, la Dirección Meteorológica de Chile, el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) y AGROMET. Los registros de mayor extensión se utilizan tanto para el desarrollo del producto grillado CR2MET como para la evaluación de estimaciones realizadas por reanálisis atmosféricos y en la detección de sesgos sistemáticos, mientras que aquellas fuentes de información más recientes sirven como base para el proceso de validación.

La longitud de los registros varía entre las distintas fuentes, siendo las operadas por DGA y DMC las de mayor extensión, en general. Los registros de INIA son más recientes y en general tienen un promedio de menos de 10 años de información. La Figura 4.1 muestra un mapa ejemplificando la red de medición de estaciones de precipitación dentro de la zona de estudio.

#### 4.1.2 REANÁLISIS CLIMÁTICOS

Son productos desarrollados por centros de investigación de renombre mundial, usualmente asociados a universidades y/o centros de investigación, que buscan replicar el clima histórico a través del planteamiento de modelos del sistema climático calibrados a escala global. De particular interés resultan los productos desarrollados por el ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, por sus siglas en inglés), denominados ERA-Interim (Dee et al, 2011) y su versión más reciente, ERA5 (C3S, 2017).

Estos productos son una gran herramienta para estimar forzantes meteorológicas, ya que presentan la ventaja de tener información continua, en el tiempo (desde 1979) y en la zona de estudio. Espacialmente, los reanálisis estiman un valor medio para cada cuadrícula de una grilla que cubre el planeta. Temporalmente, el producto ERA-Interim tiene un paso de tiempo tri-horario y abarca desde el

1 de enero de 1979, y disponible hasta la fecha actual con un desfase de tres meses<sup>7</sup>. Además, debido a que representan el sistema climático global completo, entregan estimaciones de otras variables que resultan difíciles de medir, como por ejemplo precipitación convectiva o flujo de vapor de agua.

Un ejemplo de los resultados que se obtienen de este producto de reanálisis se presenta en la Figura 4.2, donde se muestra el promedio de precipitación media diaria para el periodo 1989-1998, en todo el globo terrestre. Si bien se observa que la cobertura espacial es completa a nivel global, la grilla en que se desarrolla no permite representar adecuadamente los fenómenos locales del territorio nacional. A pesar de todos los esfuerzos que se realizan para representar adecuadamente el sistema climático, estos productos presentan la desventaja de no contar con una resolución espacial que les permita representar adecuadamente algunos procesos que ocurren a escalas menores. En particular, el producto ERA-Interim tiene una resolución nativa de 80 kilómetros. Esta resolución, en el caso de Chile, no resulta suficiente, ya que implica que, en un plano horizontal, es posible que sólo dos puntos de grilla estarían contenidos en el territorio nacional.

La falta de una mayor resolución espacial implica que procesos fundamentales en el ciclo hidrológico del área de estudio, como la precipitación orográfica y/o convectiva en sectores montañosos, no quedan bien representados. Dicho esto, el uso de este tipo de productos queda limitado en primera instancia a servir como valores referenciales.

---

<sup>7</sup> La información de ERA-Interim, así como de otras versiones anteriores de este mismo producto pueden descargarse desde: <<https://apps.ecmwf.int/datasets/>>

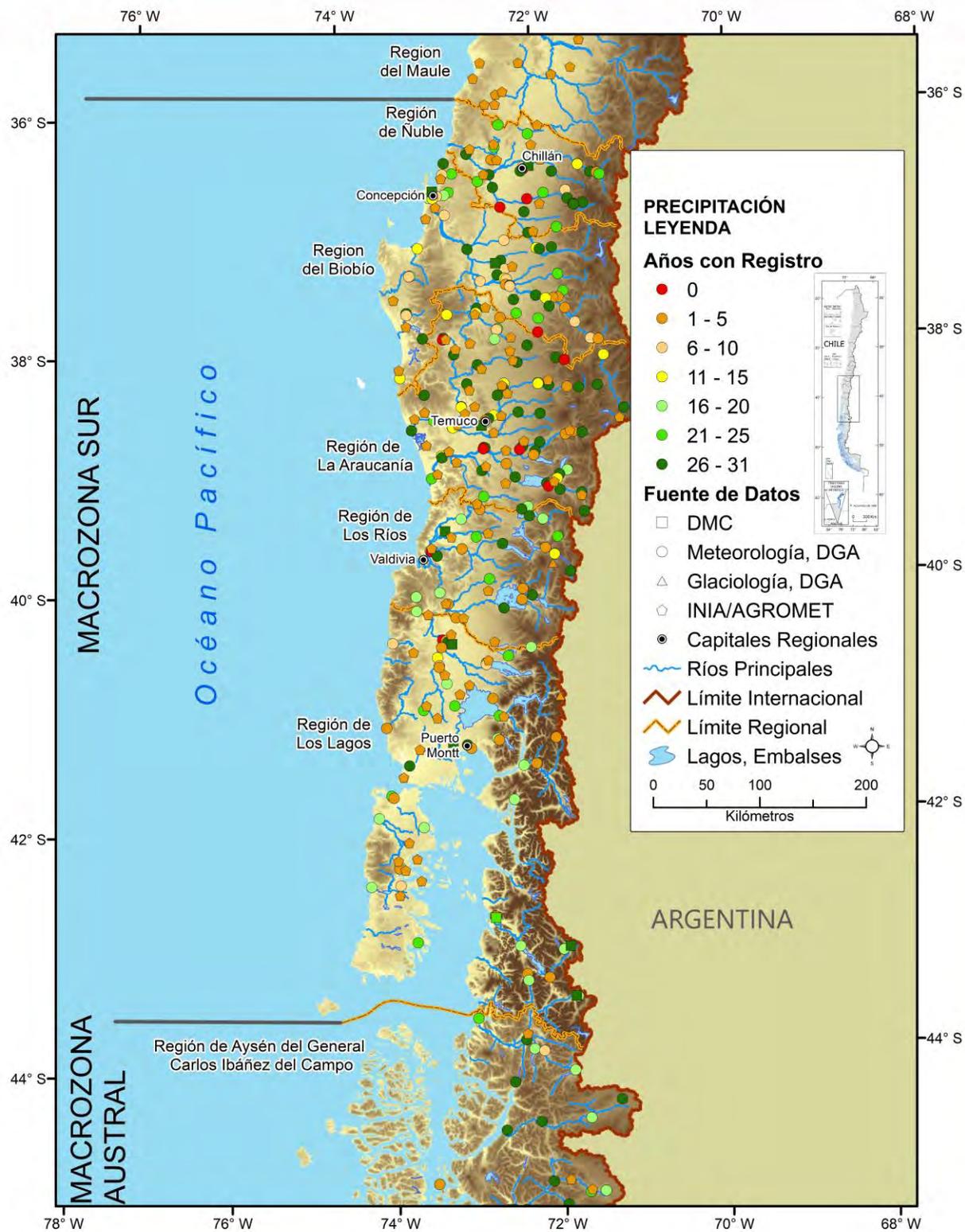


Figura 4.1. Ubicación de estaciones de precipitación operadas por distintas instituciones comprendidas en la zona de estudio.

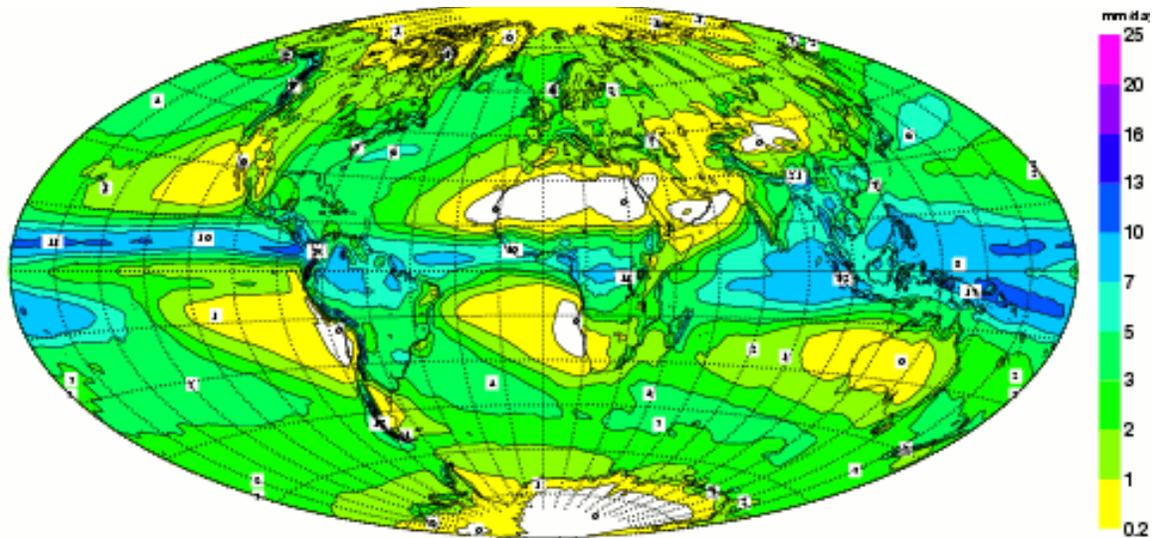


Figura 4.2. Ejemplo de estimaciones de ERA-Interim. En la figura se presenta el valor de precipitación media diaria para el periodo 1989-1998. Fuente: ECMWF

#### 4.1.3 PRODUCTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

La utilización de productos de percepción remota, en particular de temperatura superficial, resulta fundamental para obtener una buena representación espacial de esta variable. Productos satelitales como MODIS entregan estimaciones de valores de temperatura de suelo diurna y nocturna, incluso a una resolución espacial de grillas de 1 kilómetro, con frecuencia diaria, en base a mediciones de radiación de onda larga. Sin embargo, esta forma de medición no presenta continuidad temporal, debido a que es necesario que no exista cubierta de nubosidad para poder registrar esta información. Esto genera que este tipo de productos presente una continuidad temporal interrumpida. Para más detalle, se sugiere revisar DGA (2018). Un ejemplo de la información que se obtiene desde el producto MODIS se muestra en la Figura 4.3, donde se muestra el promedio semanal de temperatura superficial del suelo captado por el satélite, habiéndose procesado estos datos de forma tal que se tiene continuidad sobre todo el dominio espacial.

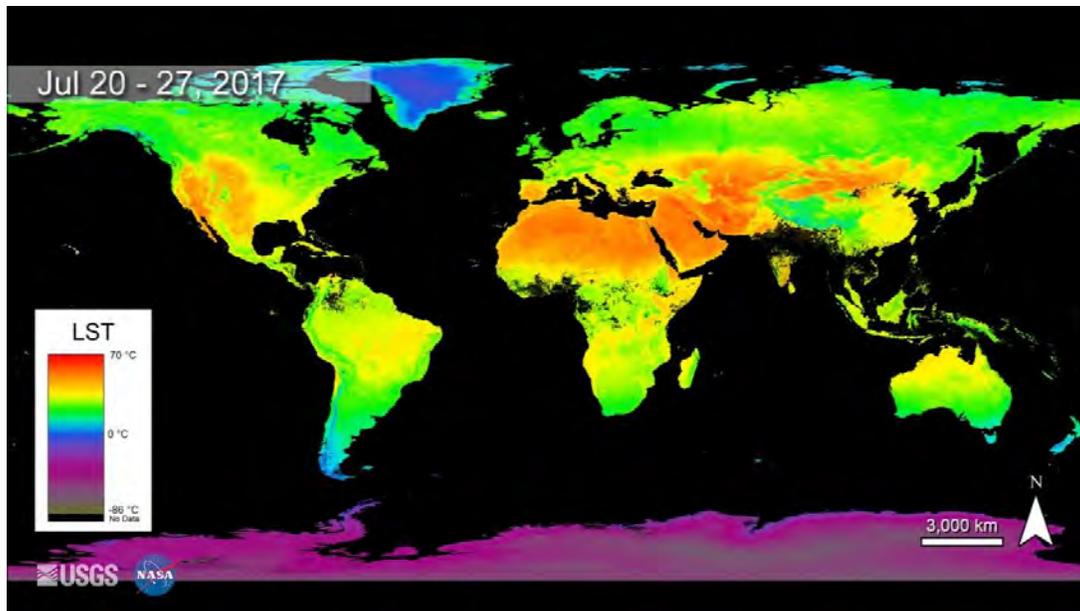


Figura 4.3. Ejemplo del campo de temperatura superficial de MODIS. En la figura se presenta el valor medio estimado para las temperaturas diurnas en el periodo entre el 20 y 27 de julio de 2017. Fuente: NASA.

#### 4.1.4 PRODUCTO GRILLADO CR2MET

El producto CR2MET es el resultado de un esfuerzo desarrollado inicialmente en el marco del proyecto DGA (2017) y, posteriormente perfeccionado en DGA (2018). CR2MET entrega información de precipitación y temperaturas medias con una resolución temporal de tres horas, y a una resolución espacial de  $0,05^\circ \times 0,05^\circ$  (latitud – longitud), para el periodo 1979-2016.

En síntesis, este producto corresponde a un modelo de regresión lineal múltiple que utiliza predictores derivados de información de reanálisis y productos de percepción remota, para calibrar ecuaciones de regresión que permitan aproximar los registros disponibles. Estas relaciones son posteriormente utilizadas para extrapolar y obtener información en todo el dominio de interés, abarcando también una longitud de registro equivalente a la disponible para los predictores provenientes de reanálisis (1979-2016). Para mayor detalle sobre el desarrollo de este producto, se sugiere revisar DGA (2018).

El producto CR2MET se puede mejorar en la medida que la información de observaciones sea extendida, o bien, si se cuenta con alguna actualización del producto de reanálisis utilizado como base. Sin embargo, en el caso de añadir observaciones en nuevos puntos, estas deben presentar una longitud de registro mínima, así como también pasar un control de calidad. La longitud de registro mínima es un factor que se puede modificar, pero que se recomienda no sea inferior a 200 registros, en cada mes que

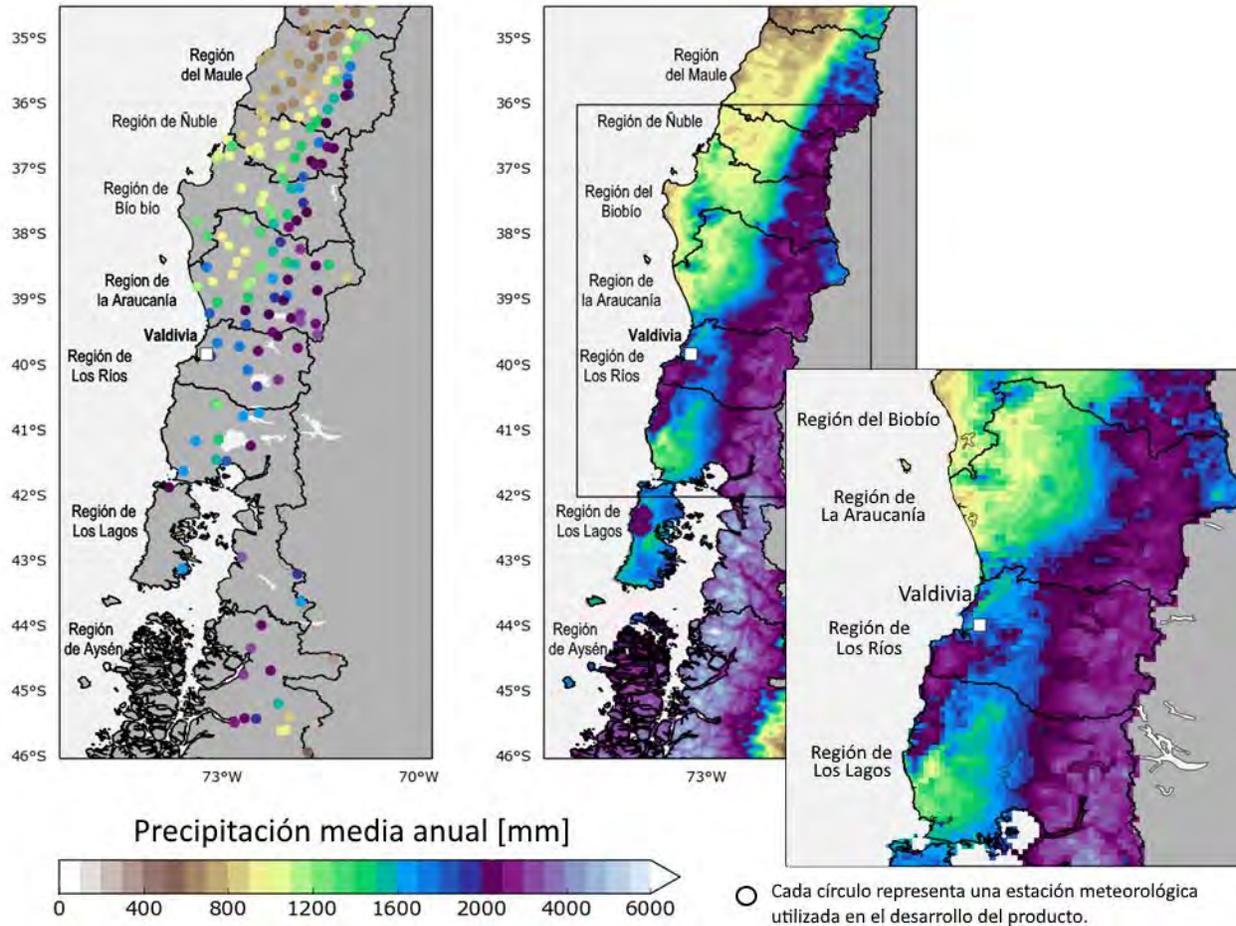
se esté calibrando <sup>8</sup>. En el caso de querer utilizar otro reanálisis como base, debe cumplirse necesariamente que éste modele todo el periodo original del producto (1979- 2016).

La información meteorológica del producto grillado CR2MET constituye un buen punto de partida, confirmado por los buenos resultados presentados en DGA (2017) y DGA (2018). La Figura 4.4 muestra una comparación entre la climatología de los valores medios anuales de precipitación observados en estaciones de registro administradas por la Dirección General de Aguas (DGA) y por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). De esta figura, se aprecia que el producto CR2MET logra replicar adecuadamente la variabilidad espacial de la precipitación. Se observa el gradiente latitudinal de aumento de precipitación, así como también los efectos inducidos por el relieve en la generación de precipitación orográfica.

Al realizar un acercamiento a la zona de las regiones de Los Ríos y de Los Lagos (Figura 4.4), se replican adecuadamente las condiciones de alta pluviosidad del sector de Valdivia, así como los efectos orográficos de la cordillera. Análogamente, el producto de temperaturas también presenta un buen desempeño, por lo cual se procede a ocupar esta base de datos como insumo para la modelación hidrológica.

---

<sup>8</sup> Es importante recordar que los modelos de regresión lineal son calibrados separadamente por cada mes, de forma que se represente adecuadamente la estacionalidad. Adicionalmente, si bien el modelo de cada banda de latitud se aplica solo sobre el área definida por ella, para el planteamiento de cada modelo se requiere de un cierto número mínimo de estaciones que cumplan con las condiciones mínimas. En función de esto, si es que inicialmente en la banda de latitud no se tienen la cantidad mínima de estaciones requerida para calibrar un modelo, la región sobre la que se seleccionan estaciones es extendida simétricamente hacia el norte y el sur, gradualmente, en aumentos de 1 grado de latitud. Este proceso se repite iterativamente hasta que se cuenta con la cantidad mínima de estaciones que se exigen como base para calibrar un modelo. Este número de estaciones es también un parámetro del producto CR2MET.



**Figura 4.4:** Comparación de climatologías de precipitación de registradas en estaciones meteorológicas y estimada por el producto CR2MET (v1.4.2) en el periodo 1979-2016.

Las versiones disponibles de forma previa al iniciar este estudio corresponden a:

- a. Producto de temperatura: versión 1.3.
- b. Producto de precipitación: versión 1.4.2.

## 4.2 ACTUALIZACIONES DE INFORMACIÓN

Durante el periodo de desarrollo de este estudio, ha sido posible obtener información actualizada de algunas de las fuentes que se describen en la sección anterior. Estas actualizaciones se basan en que, a principios de 2019, el ECMWF<sup>9</sup> liberó a disposición del público general un nuevo set de datos de reanálisis climatológico, denominado ERA5, con información disponible para todo el periodo de tiempo en estudio (1979-2015). Se presentan a continuación más detalles de esto, y los beneficios asociados a la utilización de este nuevo set de datos.

<sup>9</sup> Siglas en inglés para la institución *European Center for Medium Range Weather Forecasts*

#### **4.2.1 REANÁLISIS ATMOSFÉRICO ERA5**

El producto ERA5 representa la nueva generación en productos de reanálisis atmosféricos desarrollados por el ECMWF, siendo la quinta generación de este tipo de productos desarrollado por este centro (C3S, 2017). Su predecesor, ERA-Interim, ha sido un elemento clave para el desarrollo de forzantes meteorológicas dentro de las etapas previas del Balance Hídrico, ya sea como insumo para desarrollar otros productos meteorológicos (CR2MET), o directamente como información de entrada, en el caso de algunas variables (viento o humedad relativa).

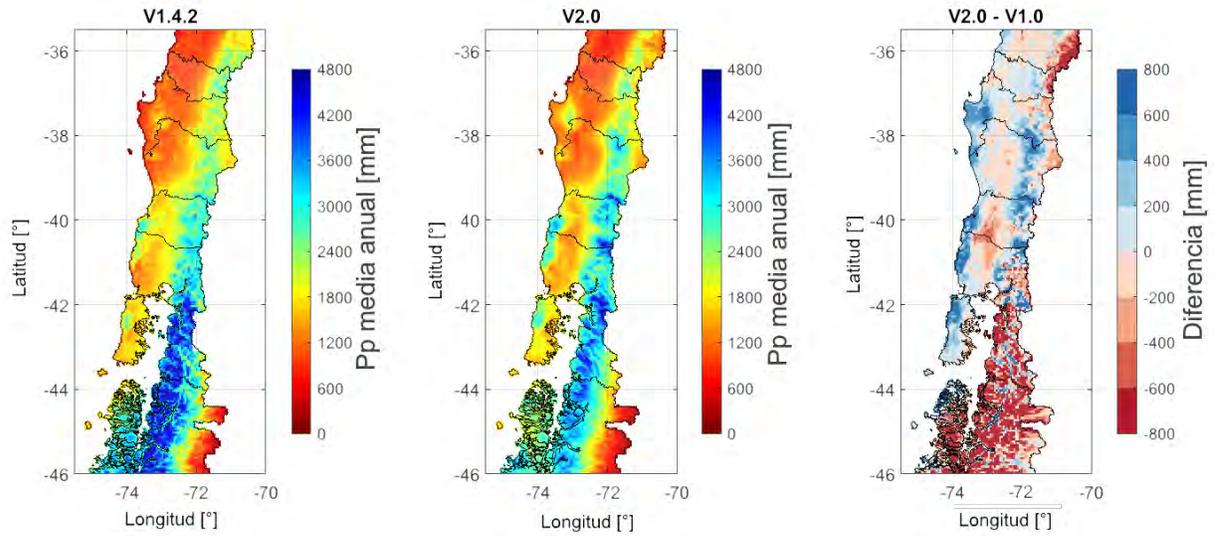
Este nuevo reanálisis fue desarrollado a una resolución espacial de 30 km, y resuelve la atmósfera usando 137 niveles desde la superficie hasta una altura de 80 kilómetros. Esto permite que este producto logre una mejor representación de diversos procesos que se dan a escala local, que en versiones anteriores no eran representados necesariamente.

Este reanálisis está disponible a una resolución temporal horaria entre 1979 y con un desfase de tres meses hasta el tiempo presente. Entre otras mejoras, presenta información de la variación de calidad en el tiempo y el espacio, una representación de la tropósfera mejorada, así como también de los ciclones tropicales, un mejor balance entre precipitación y evaporación, mejor representación de humedad de suelo y temperaturas superficiales del mar y de los cuerpos de hielo oceánicos mucho más consistente.

#### **4.2.2 ACTUALIZACIÓN DEL PRODUCTO CR2MET**

Gracias a los esfuerzos de modelación hidrológica realizados en el marco de este proyecto, se identificó un sesgo negativo en el producto de precipitaciones. Suponiendo que este error pudiese venir de la utilización de información de reanálisis climático imprecisa, resulta lógico replantear el desarrollo de este producto a la luz de la nueva información existente.

La actualización del producto CR2MET de precipitaciones tuvo como resultado final la creación de una nueva versión para precipitación (CR2MET v2.0). Dentro de los cambios metodológicos más importantes se encuentra la flexibilización del esquema de desarrollo, que permite eventualmente al usuario realizar análisis considerando distintas forzantes de gran escala, mayor facilidad para la extensión temporal del producto, mayor versatilidad al momento de elegir con respecto a qué periodo calibrar, entre otras. Las modificaciones realizadas apuntan a facilitar la actualización de este producto para la información de meses posteriores al periodo de estudio, así como el poder evaluar el potencial beneficio de la incorporación de nuevas variables. Se revisó también el esquema de ocurrencia de precipitaciones, con el fin de lograr una mejor representatividad. La Figura 4.5 muestra una comparación de los valores climatológicos medios anuales de precipitación estimados por los productos CR2MET en la zona de estudio.



**Figura 4.5. Climatologías de precipitación media anual de los productos de precipitación CR2MET v1.4.2 (panel izquierdo), v2.0 (panel central) y diferencia entre ambos productos (panel derecho).**

La Figura 4.5, en su panel derecho, muestra de forma más clara los cambios de un producto con respecto a otro. Sectores coloreados en azul representan áreas donde la precipitación en la nueva versión aumenta respecto a su predecesor. Entre las latitudes 36°S y 42°S se observan aumentos en los sectores cordilleranos, tanto en la cordillera de la Costa, como en el sector de los Andes, y también en la isla de Chiloé. La situación contraria ocurre en la zona del valle central, así como también de forma generalizada desde 42°S hacia el sur en la zona continental de Chile.

## 4.3 INFORMACIÓN UTILIZADA

En esta sección, se presenta en detalle la fuente de datos de cada forzante meteorológica utilizada en el proyecto. Se da especial énfasis a las variables de precipitación y temperatura, al ser las principales forzantes de los modelos.

### 4.3.1 PRECIPITACIÓN

El producto meteorológico utilizado como base de información para la estimación de las series temporales de precipitación en la zona de estudio corresponde a versión 2.0 del producto de precipitaciones CR2MET. La correcta estimación de esta forzante es fundamental, ya que además es una de las componentes fundamentales del balance hídrico.

#### METODOLOGÍA

Dentro de este procedimiento, se calculan dos modelos para cada banda de latitud: uno para estimar la ocurrencia de precipitación, a través de un modelo de regresión logística, y otro para estimar la cantidad de precipitación caída. Ambos modelos usan el mismo set de predictores (meteorológicos y topográficos), y usan tanto observaciones dentro de esa banda de latitud, como en su entorno, con el fin de realizar un mejor ajuste (la región efectiva en esta zona es usualmente cercana a 3°). Este proceso se realiza separadamente para cada mes, con el fin de representar la variabilidad estacional.

En caso de no cumplirse los requerimientos mínimos de información, la región de la que se extraen los predictores es extendida en un grado adicional de latitud. Este proceso se repite iterativamente hasta que se cumplan las condiciones necesarias para poder calcular las funciones de transferencia. Sin embargo, el modelo obtenido es utilizado solo sobre la banda latitudinal original y no sobre todo el dominio del que se extrajeron registros. Esto conlleva que los modelos calculados dentro de la zona de estudio se calibren, en su mayoría, con datos al interior de la banda, salvo en los sectores más australes. Luego de la calibración con observaciones locales, los modelos de regresión son evaluados (forzados) con los predictores (reanálisis y datos topográficos) en el todo el dominio de interés. Este proceso se realiza sobre una grilla de 0,05° x 0,05°, a partir del cual se obtiene un producto de precipitaciones continuo para todo el territorio de Chile continental.

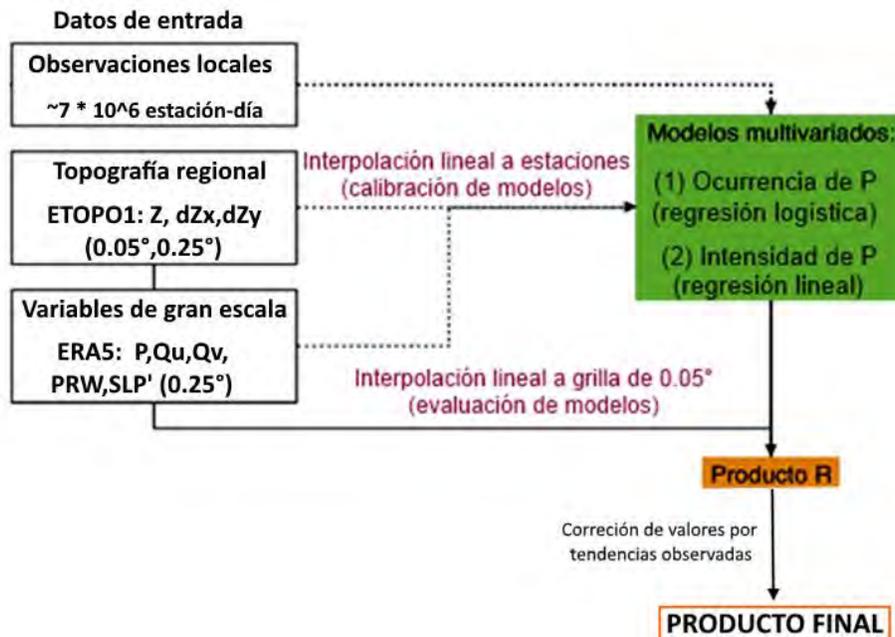
Un mayor detalle de la metodología base se describe en a DGA (2017). Así mismo, mayor detalle de la primera actualización metodológica se puede ver en DGA (2018).

La versión 2.0 presenta, sin embargo, algunos cambios con respecto a la metodología planteada, en dicho documento. En particular, la corrección empírica de valores en los puntos de grilla al combinar el producto de reanálisis con uno generado en base a las observaciones ya no se ejecuta. En su lugar, se realiza una corrección del producto, añadiendo tendencias observadas en los registros. Esto se hace por medio de la utilización de un Análisis de Componentes Canónico de las series de observaciones. Este procedimiento permite identificar señales de cambio de largo plazo (como, por ejemplo, tendencias de aumento o disminución) en un conjunto de datos observados, y lo aplica sobre el producto obtenido. Un esquema del procedimiento desarrollado para generar este set de datos se presenta en la Figura 4.6.

Adicionalmente, la Tabla 4.1. describe otras modificaciones adicionales planteadas en el desarrollo de esta nueva versión del producto de precipitación.

**Tabla 4.1. Modificaciones incorporadas en el método de estimación de precipitaciones.**

Modificación	Efecto sobre el modelo
Incorporación de predictores adicionales: presión a nivel del mar y altura geopotencial en 300 hectopascales	La inclusión de estas dos nuevas variables permite incorporar información de patrones de circulación de gran escala.
Utilización de ERA5	Se utiliza como insumo meteorológico de reanálisis la información del nuevo reanálisis ERA5.
Requerimiento de mínimo de días de precipitación dentro de observaciones	En cada modelo calculado, ya no solo se exige un mínimo de observaciones, sino que también un mínimo de días con precipitación.
Ajuste del producto usando tendencias observadas	Utilizando un ajuste de Análisis de Correlación Canónico, se incorporan al producto tendencias observadas de largo plazo.



**Figura 4.6: Esquema metodológico de generación del producto regional de precipitaciones.**

Fuente: Modificado de DGA (2017)

La precipitación anual media (1979-2016) obtenida para la zona de estudio se ilustra en la Figura 4.7. A modo de comparación, se presentan igualmente los valores climatológicos derivados de estaciones locales (DGA y DMC). La distribución geográfica de la precipitación anual media según el producto (panel derecho de la figura), muestra los característicos gradientes latitudinal y meridional. Se observan valores

particularmente altos (sobre 2000 mm por año) en la zona cordillerana, lo que da cuenta de los distintos regímenes de precipitación en estas regiones. El patrón estimado por el producto presenta clara coherencia con lo que se observa en los registros de estaciones (panel izquierdo la figura). El detalle obtenido en la grilla muestra, al igual que en el producto anterior, una importante heterogeneidad espacial en la precipitación media en zonas climáticas similares, como se aprecia en los valles centrales del centro de Chile, así como también en sectores como la cordillera de Nahuelbuta (recuadro negro superior) y la selva Valdiviana (recuadro negro inferior).

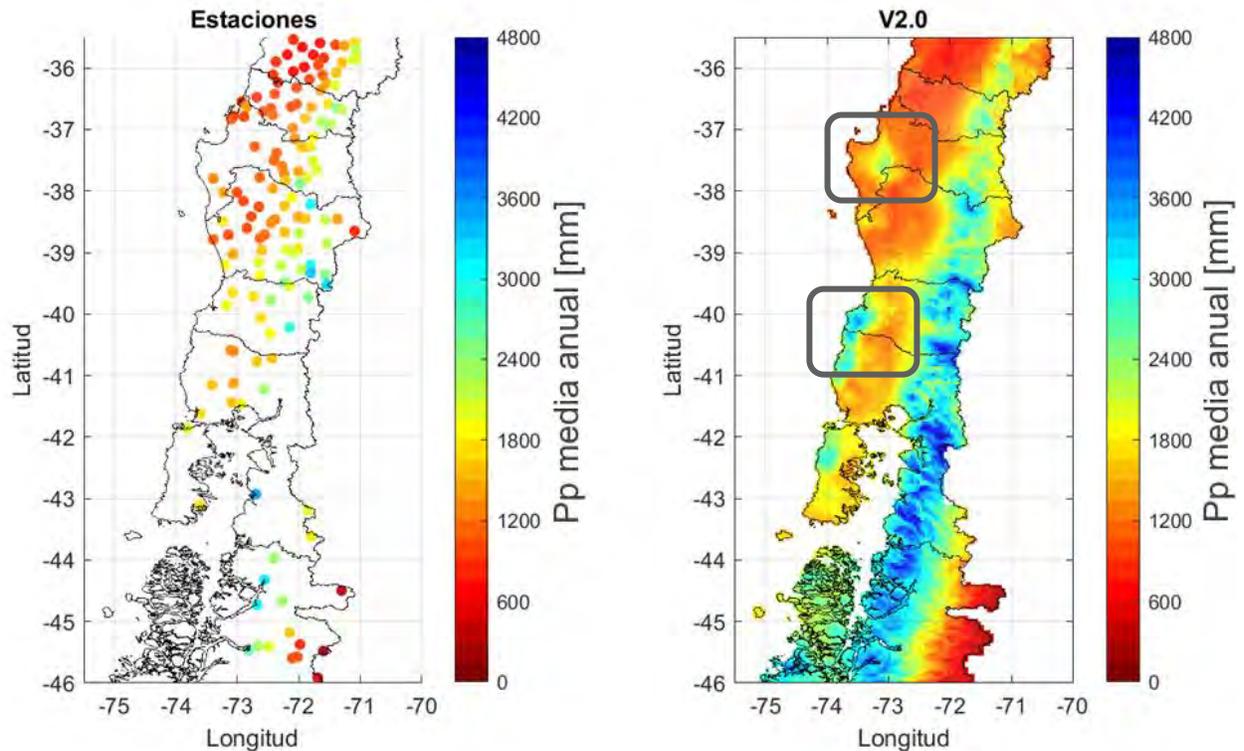


Figura 4.7: Precipitación anual media para el periodo 1979-2016 obtenido de la red de estaciones DMC-DGA (panel izquierdo) y del producto CR2MET (derecha).

## VALIDACIÓN CRUZADA

El desarrollo de un nuevo producto de precipitación con un nuevo reanálisis climático no asegura necesariamente que los resultados vayan a ser mejores. Considerando esto, se utilizan dos formas de validación para evaluar el desempeño del producto:

- a. Contrastar estimaciones de precipitación de CR2MET en puntos donde se cuente con información que no fue utilizada en el desarrollo del producto. Para esto, resulta muy útil la información de estaciones – por ejemplo, de INIA y AGROMET – que cuenten con información de precipitación que no hayan sido utilizadas en el desarrollo de CR2MET.
- b. Hacer una validación cruzada de la metodología de construcción de CR2MET. Esto consiste en realizar la construcción del producto tomando la misma base de datos que fue utilizada, pero excluyendo toda la información proveniente de una estación. Luego, utilizar el modelo calibrado para estimar las precipitaciones en la ubicación de la estación que fue deliberadamente omitida.

Las ventajas de tener dos metodologías de validación es que se obtiene información del desempeño del producto. En el primer caso, es posible evaluar el desempeño del producto directamente al estimar las precipitaciones. En el segundo caso, es posible tener una idea sobre qué tan sensible es a la presencia o ausencia de una estación como fuente de información. Si el producto es bueno, los valores de precipitación debiesen tener una buena correlación temporal y de monto. Además, un buen producto debiese tener buena capacidad predictiva de un punto de una región a pesar de que se le retire de la base de datos utilizada como base para el desarrollo de la estimación.

La Figura 4.8 muestra diagramas de dispersión separados por mes, donde se comparan los valores medios observados en 80 estaciones de INIA o AGROMET que se encuentran al interior de la zona de estudio. En esta figura, se comparan los valores de precipitación media diaria observados (eje de las abscisas) con valores de precipitación media diaria estimados por el producto CR2MET (eje de las ordenadas). La línea roja representa la recta identidad, sobre la cual se ubicaría un punto si es que el ajuste fuera perfecto. Se observa en dicha figura coeficientes de determinación  $r^2$  superiores a 0,5 – salvo en los meses de invierno. En dicho periodo, este índice llega incluso a un valor 0,37 en el mes de julio, y cercanos a 0,45 en los meses de junio y agosto. A pesar de que estos índices pueden parecer bajos, es importante notar que las estimaciones del producto CR2MET se realizan para áreas de grilla completas, mientras que las estaciones representan lugares particulares, que pudiesen tener efectos locales, o que simplemente no son bien representados por la media del área. Un análisis geográfico de estos puntos no muestra ningún sesgo de tipo geográfico, y donde las distintas magnitudes de error se distribuyen de manera aleatoria en el territorio.

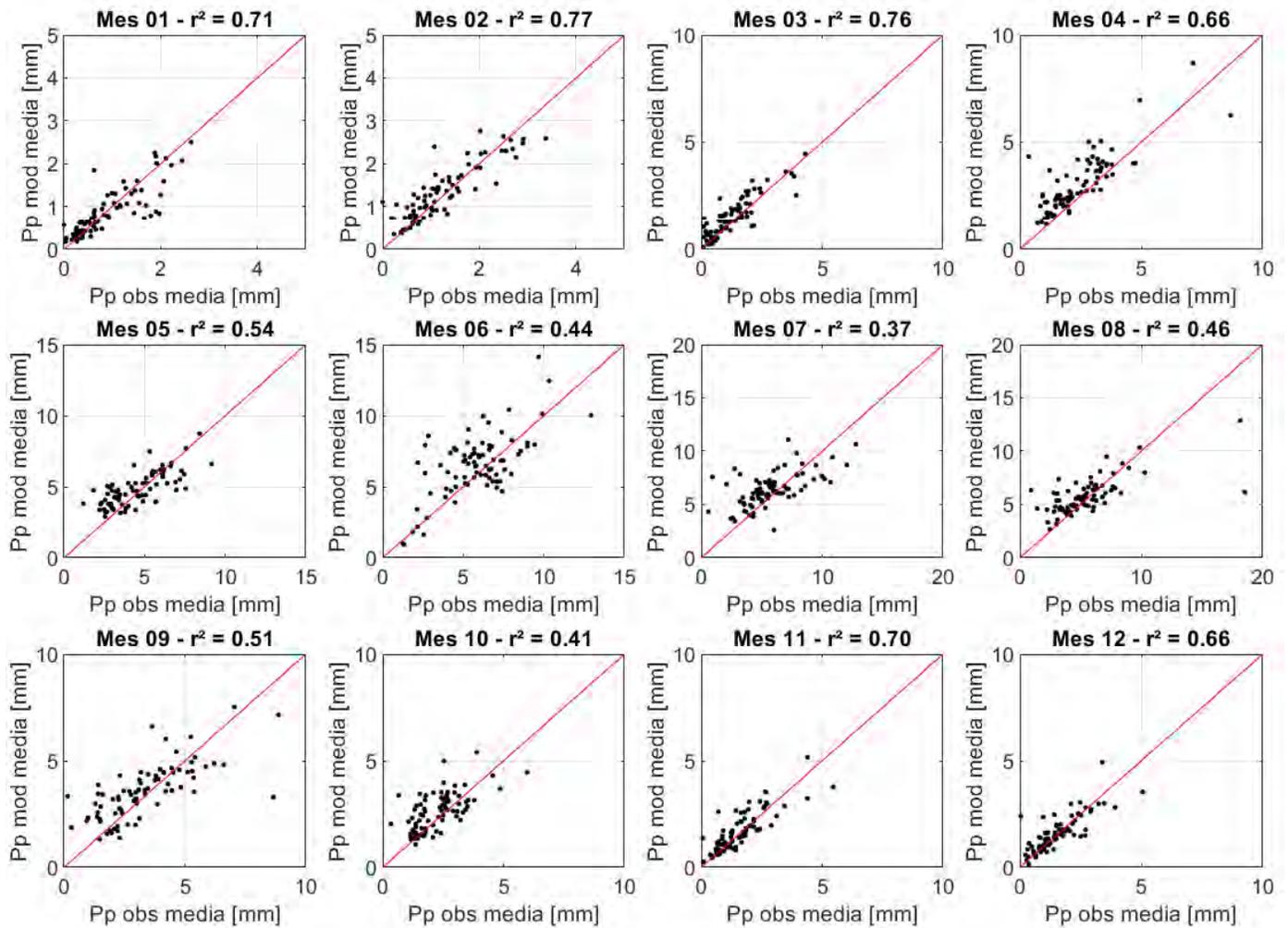


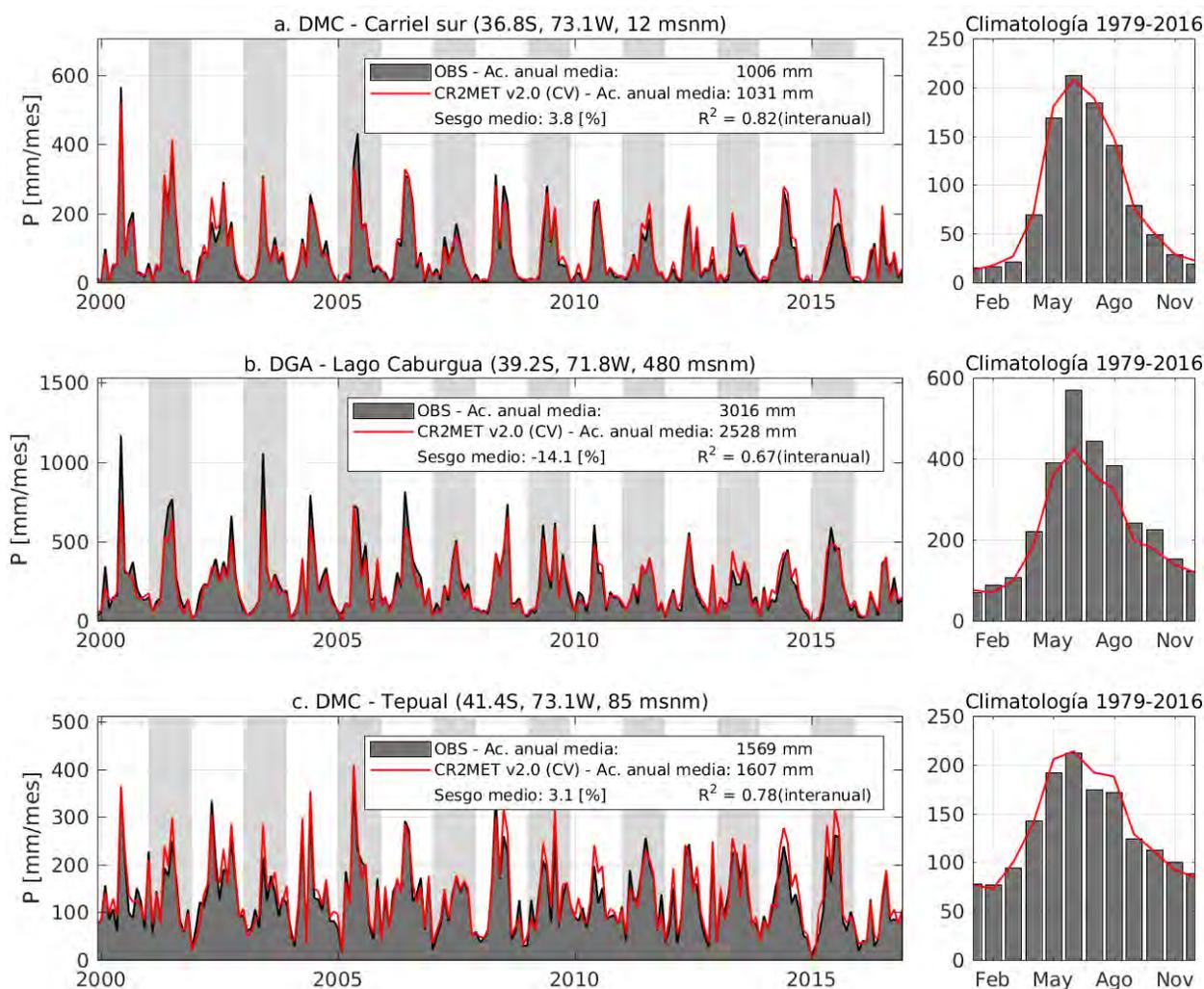
Figura 4.8: Comparación entre estimación de precipitación media diaria del producto CR2METv2.0 y registros observados en estaciones de INIA y AGROMET ubicados dentro del área de estudio (n = 80).

Otro enfoque de evaluación corresponde a la validación *leave-one-out* (LOO). Este tipo de validación cruzada permite realizar un ejercicio similar al presentado en la figura anterior, pero también entrega una idea de la sensibilidad que tiene la metodología de generación del producto ante cambios en la base de datos utilizada para generarlo. Para esto, se realiza iterativamente el proceso de cálculo de modelo por región, retirando en cada iteración la información de una de las estaciones. Posteriormente, este modelo calibrado sin dicha estación es utilizado para estimar la serie de precipitación en la ubicación de la misma. La nueva serie generada puede ser contrastada con otras dos series:

- a. Con la serie de observaciones en dicha estación. En este caso, la comparación sería equivalente a lo mostrado en la sección anterior.
- b. Con la serie estimada para dicho punto por la versión actual del producto de precipitaciones, que se calculó considerando esta estación como potencial fuente de información. En este caso, la comparación entregaría una idea de cuán consistente es el modelo consigo mismo, al evaluar el impacto que tiene la remoción de una de las fuentes de información utilizadas para su

construcción. Es equivalente a realizar un análisis de sensibilidad del producto con respecto a sus fuentes de información.

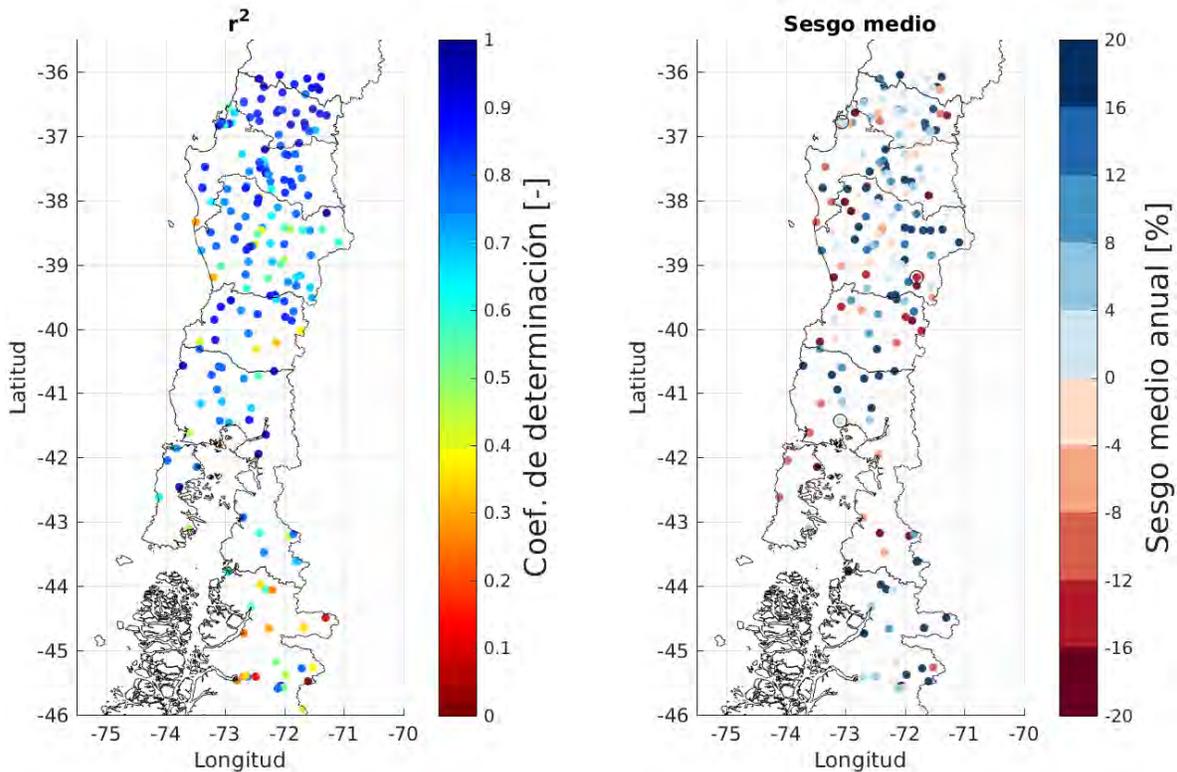
La Figura 4.9 presenta una comparación entre series temporales de precipitación mensual observadas y estimadas en tres estaciones de monitoreo ubicadas en el sector norte del área de estudio (Carriel Sur, DMC), en una ubicación cercada al lago Caburga en el sector de la montaña (Lago Caburgua, DGA) y en el sector sur de la zona de estudio (Tepual, DMC). Estas estaciones presentan un largo periodo de registro, lo que las hace idóneas para el proceso de evaluación. En dicha figura, se presenta una comparación entre las series mensuales de precipitación estimadas y observadas, mostrándose un periodo más corto para facilitar la visualización de los datos. Además, se muestran los valores climatológicos mensuales para evaluar la reproducción del ciclo estacional. En dos de las tres estaciones evaluadas, se aprecia una correcta reproducción del régimen de precipitación media anual por parte del producto distribuido, con sesgos menores a 5%, y un ciclo estacional coherente. Sin embargo, en el caso de la estación de Lago Caburgua se observa un sesgo negativo, cercano al 15%, indicando una subestimación del producto con respecto a los valores observados, y cuyo origen se concentra principalmente en los meses de invierno. La coherencia temporal de las estaciones es variado, con  $R^2$  superiores a 0,8 en el caso de Carriel Sur, pero menor a 0,7 en el Lago Caburgua.



**Figura 4.9.** Series de precipitación (promedios mensuales) y climatologías, obtenido de registros locales (en negro) y estimados con metodología CR2MET y mediante validación cruzada (gráficos en rojo). Se muestran tres estaciones distribuidas a lo largo de la zona de estudio: Estación Carriel Sur (DMC, panel superior); estación Lago Caburgua (DGA, panel central); y estación Tepual (DMC, panel inferior).

La Figura 4.10 presenta una generalización del análisis anterior, realizado sobre el conjunto de estaciones en que se ejecutó el proceso de validación cruzada. En el panel izquierdo, se muestran los coeficientes de determinación, que dan cuenta de la covariabilidad interanual entre la precipitación observada y estimada. Los valores obtenidos son altos en la zona comprendida entre 36°S y 42° ( $R^2 > 0,8$ ), pero disminuyen en latitudes más australes, llegando incluso a valores de  $R^2$  menores a 0,5 en muchos casos.

En el panel derecho de la figura, se muestran los sesgos medios (relativos a valores climatológicos) obtenidos entre los registros pluviométricos y las estimaciones hechas mediante validación cruzada. Estos resultados indican que el producto CR2MET tiene sesgos menores a 20% en una gran cantidad de estaciones de la zona de estudio. No se observa un patrón espacial distintivo de tendencias en el sesgo.



**Figura 4.10: Coeficiente de determinación y sesgo medio calculado para estación donde se tiene información, comparando los valores observados con los obtenidos en validación cruzada.**

Finalmente, se presenta una comparación entre los valores medios de precipitación mensual estimadas en estaciones (Figura 4.11), donde el eje de las abscisas corresponde a los valores obtenidos del producto utilizado y el eje de las ordenadas corresponde a los valores estimados por validación cruzada (VC). Este gráfico muestra la sensibilidad del método de cálculo con respecto a una estación como fuente de información. Si la metodología es robusta, y no depende mayormente de un punto de información, las estimaciones debiesen presentar un buen nivel de coherencia y tener valores similares. En el caso contrario, se observará una gran dispersión con respecto a la curva identidad. Como indicador de la dispersión que se tiene, se presentan los valores de  $r^2$  para cada mes. Se observa que en el periodo invernal se tiene cierto nivel de variabilidad, pero que resulta despreciable. Se mantienen siempre valores de  $r^2 > 0,97$ . Además, debido al planteamiento de la metodología de cálculo, que incorpora un paso de muestreo aleatorio para el cálculo de las regresiones, se espera un cierto nivel de variabilidad inherente a la metodología. Esta última consideración toma particular relevancia en el caso de los meses con mayor cantidad de eventos de precipitación.

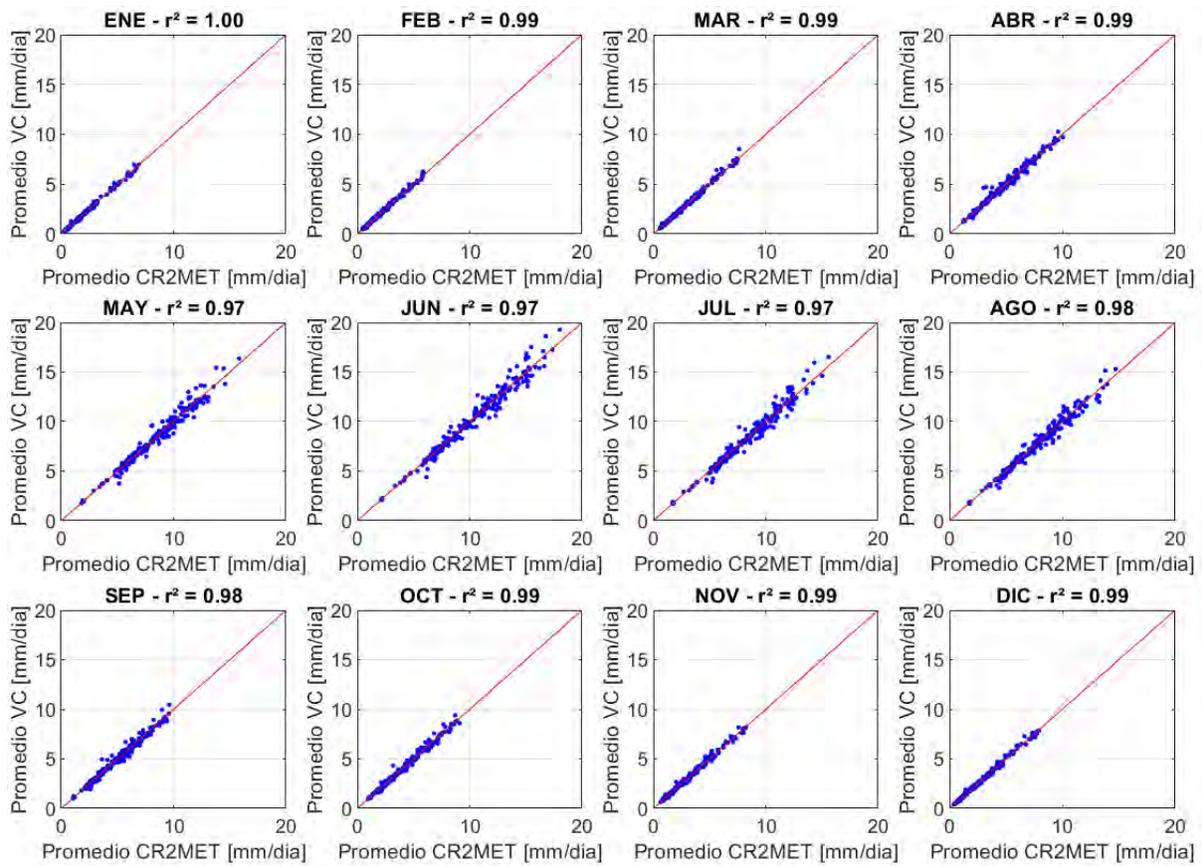


Figura 4.11: Comparación de las estimaciones de Precipitación mensual promedio en ubicaciones de estaciones entre el producto de precipitaciones utilizado con los resultados del proceso de validación cruzada LOO. Cada punto representa la ubicación de una estación (DGA o DMC) utilizada en el desarrollo del producto. En el eje X se muestran los valores medios estimados por el producto utilizado para la ubicación dichas estaciones, mientras que en el eje Y se muestran las estimaciones para las mismas ubicaciones, pero utilizando un producto de validación cruzada, en el que no considera dicha estación como información en su desarrollo.

### 4.3.2 TEMPERATURA

El producto de temperaturas utilizado corresponde a la versión 1.3, que es la misma utilizada en DGA (2018). Se presenta a continuación un breve resumen de la metodología utilizada para el desarrollo de este producto. Sin embargo, su planteamiento base en detalle puede ser revisado en DGA (2017). Modificaciones adicionales que buscan mejorar su desempeño se presentan en DGA (2018).

#### METODOLOGÍA

El desarrollo de productos grillados de temperatura se realiza con un enfoque similar al de precipitación, usando como base un conjunto de modelos estadísticos. En este caso, sin embargo, se incorpora como predictor adicional, información de productos satelitales (MODIS), los que estiman la temperatura superficial del suelo. De esta forma, se busca incorporar variaciones espaciales que se dan no sólo en función de condiciones atmosféricas y topográficas, sino también en función de tipo de cobertura superficial.

La Tabla 4.2 describe las tres etapas requeridas para el desarrollo del producto, así como los insumos y productos involucrados, en cada una de ellas.

**Tabla 4.2. Descripción de las diferentes etapas que se desarrollan para generar el producto de temperaturas actualizadas.**

**Fuente: DGA, 2018.**

<b>Etapas</b>	<b>Descripción</b>	<b>Datos utilizados</b>
Etapa I	Estimación de temperatura diaria mínima y máxima en grilla de 0,05°. En dominio temporal está determinado por los productos LST de MODIS (2002-2016 con datos faltantes).	<ul style="list-style-type: none"><li>• Observaciones locales de Tx y Tn</li><li>• LST de MODIS (MOD11 y MOD)</li><li>• Temperaturas medias y extremas de ERA Interim (análisis y reanálisis)</li><li>• Topografía</li></ul>
Etapa II	Generación de temperaturas en grilla para el periodo completo (1979-2016).	<ul style="list-style-type: none"><li>• Producto Etapa 1</li><li>• Observaciones locales de Tx y Tn</li><li>• Temperaturas de ERA Interim (análisis y reanálisis)</li></ul>
Etapa III	Ajuste de climatología y variabilidad en zonas cercanas a estaciones con registros observacionales largos.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Producto Etapa 2</li><li>• Observaciones locales de Tx y Tn</li></ul>

Se realiza a continuación un breve resumen de la metodología en cada una de las etapas descritas en la tabla anterior.

#### a. Etapa 1

Esta etapa consiste en establecer una relación entre traducir las variables de temperatura de superficie de MODIS con las temperaturas mínimas y máxima cerca de la superficie (2 metros), por medio del uso de modelos de regresión lineal múltiple. Estos modelos, calibrados separadamente para cada mes,

utilizan como predictores la temperatura superficial de MODIS, así como también información de variables meteorológicas desde reanálisis y, como predictando, las temperaturas mínimas y máximas registradas en estaciones a lo largo del país. Entre los productos de reanálisis utilizados se considera información de ERA-Interim, ERA5 y también otros dos productos adicionales: el producto CPC Global Temperature data desarrollado por la agencia NOAA (NOAA/OAR/ESRL) y el producto Berkeley Earth Surface Temperature (BEST, Rohde *et al.*, 2013). Además, las forzantes meteorológicas distribuidas se combinan con datos topográficos (altura, ubicación), considerando entonces sesgos inducidos por elevación<sup>10</sup>.

Como paso final de esta etapa, los modelos son forzados con los predictores interpolados a cada punto de grilla, obteniendo un primer producto de temperaturas máximas y mínimas, denotados por Tx (1) y Tn (1), con resultados limitados temporalmente a la disponibilidad de los predictores. En este caso, este paso queda limitado por la disponibilidad del producto MODIS a ser usado como predictor, ya que se encuentra disponible solo desde el año 2002.

#### b. Etapa 2

En esta etapa, se busca completar temporalmente los resultados del producto obtenido en el paso anterior. Para ello, se calibran modelos estadísticos que estiman la información obtenida del producto intermedio de la etapa 1 (Tx(1) y Tn(1)) como variable a predecir, en función de predictores que tengan continuidad temporal para todo el periodo de interés (1979-2016). Una vez que se cuenta con estos modelos, es posible generar un segundo producto Tx(2) y Tn(2), con continuidad temporal como espacial. Estos predictores corresponden a información obtenida desde reanálisis climáticos, y utilizan variables como temperaturas máximas o mínimos correspondientemente, así como temperaturas de análisis estimadas a determinadas horas del día. Como resultado de esta etapa, se obtiene un producto espacialmente distribuido en la grilla de interés, que además cuenta con continuidad temporal en todo el periodo 1979-2016.

#### c. Etapa 3

La etapa final en el proceso de generación de las temperaturas máximas y mínimas incluye correcciones de variabilidad de las temperaturas estimadas para cada punto, en función de las observaciones cercanas geográficamente. De esta etapa se obtiene el producto final.

La Figura 4.12 muestra una comparación entre los valores climatológicos de temperatura mínima y máxima registrados en estaciones de medición y los compara con los valores obtenidos para la región de estudio. Se observa coherencia espacial en ambas variables a lo largo de toda la zona de estudio y se representan adecuadamente los cambios asociados a gradientes adiabáticos en altura.

---

<sup>10</sup>Debido a que las estaciones meteorológicas usualmente se ubican a una menor elevación que su entorno, típicamente la temperatura que registra es mayor que la celda de 5 x 5 Km en la que ésta se encuentra.

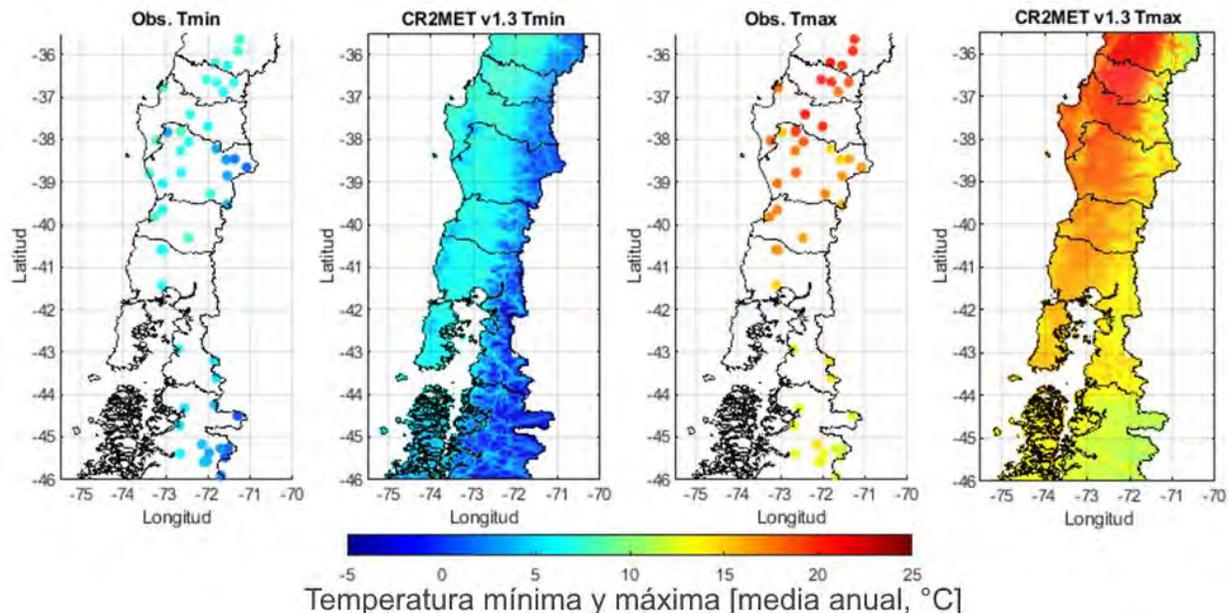
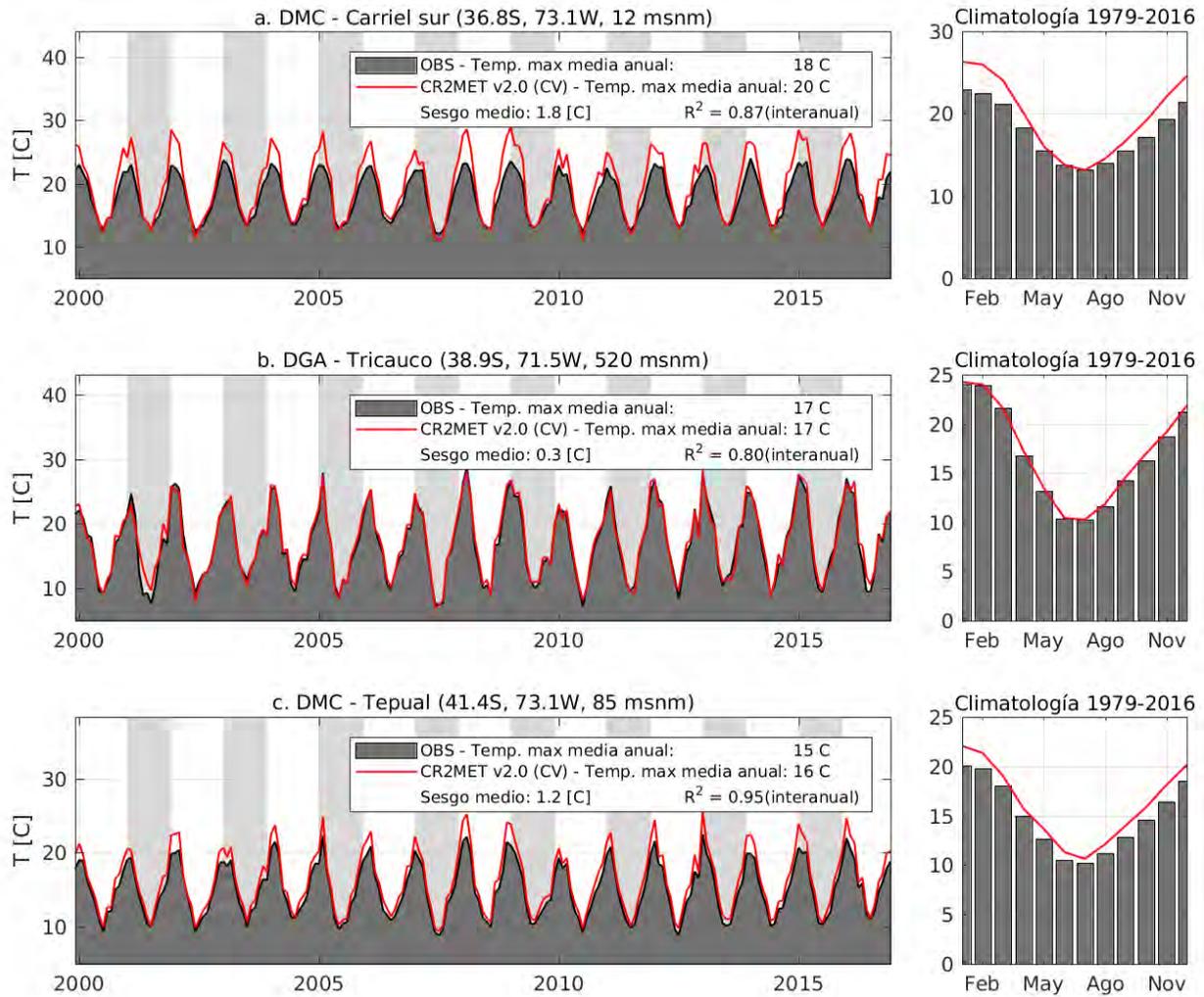


Figura 4.12: Promedios anuales de temperatura diaria mínima (paneles de la izquierda) y máxima (paneles del lado derecho) en el periodo 1979-2016 obtenido de la red de estaciones DMC-DGA y del producto CR2MET.

## VALIDACIÓN

Equivalentemente al proceso de validación presentado para la precipitación, se realiza un proceso de validación cruzada (*leave one out*) para evaluar la temperatura máxima y mínima. Es importante destacar que, en este caso, donde el producto originalmente estima inmediatamente sobre el píxel, la verificación se hace reemplazando el cálculo de cada uno de los píxeles de la grilla por la ubicación de la estación. Se presentan los resultados de validación del producto final.

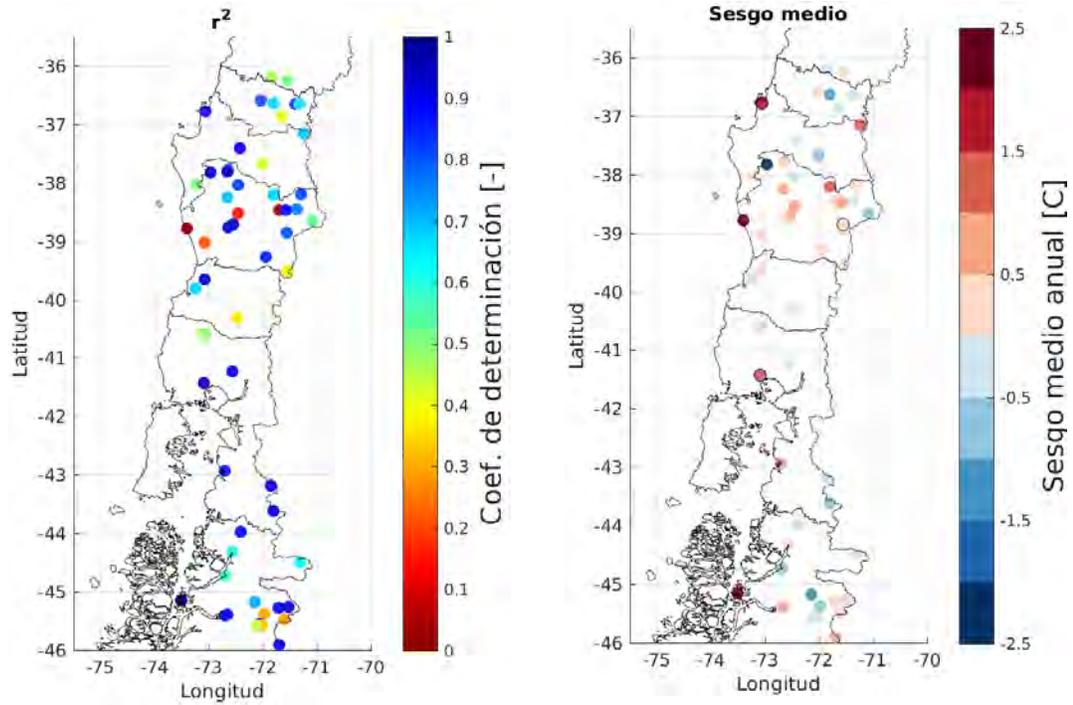
Como en el caso de la precipitación, se describe el desempeño del producto resultante en tres figuras. La primera (Figura 4.13) muestra ejemplos de los resultados para la temperatura máxima en tres estaciones de monitoreo: Carriel Sur (DMC), Tricauco (DGA) y Tepual (DMC), dos de las cuales fueron presentadas anteriormente. Los valores climatológicos de esta variable están correctamente reproducidos en dos de los tres ejemplos, mientras que la variabilidad interanual se ajusta de buena forma en general, aunque con valores variados, pero siempre iguales o superiores a 0,9. Sin embargo, en la estación de Carriel Sur el producto muestra una reproducción más deficiente de la variabilidad estacional, con un sesgo positivo en los periodos más cálidos. Así mismo, la estación Tepual presenta un ligero sesgo positivo también, pero distribuido constante a lo largo del año.



**Figura 4.13:** Series de temperatura diaria máxima (promedios mensuales) y climatologías, obtenido de registros locales (en negro) y estimados con metodología CR2MET y mediante validación cruzada (gráficos en rojo). Se muestran tres estaciones distribuidas a lo largo de la zona de estudio: Estación Carriel Sur (DMC, panel superior); estación Tricauco (DGA, panel central); y estación Tepual (DMC, panel inferior).

Un análisis general de la zona, extendiendo el análisis al caso de la variable de temperatura mínima, se presenta en la Figura 4.14. En el caso de las temperaturas máximas, el promedio del coeficiente de determinación de validación de todas las estaciones es 0,67, y se observa que en general se distribuye de forma homogénea en el área de estudio. Además, se presentan un sesgo medio cálido promedio de 0,1, principalmente positivo en sectores costeros y del valle central mientras que en estaciones de sectores cordilleranas se tiene un sesgo frío. Sin embargo, este sesgo no es necesariamente un error del producto, sino que puede ser sistemático y estar relacionado con la diferencia entre la altura a la que se ubica la estación de medición y la altura media del píxel modelado. Las temperaturas mínimas presentan un menor desempeño, con un coeficiente de determinación medio de todas las estaciones de 0,34, pero con un sesgo medio promedio aproximadamente nulo. Sin embargo, en la zona norte del área de estudio, la costa tiende a presentar un sesgo costero negativo, mientras que la cordillera uno positivo. Esta tendencia se revierte en la parte sur de la zona de estudio.

## Temperatura Máxima



## Temperatura Mínima

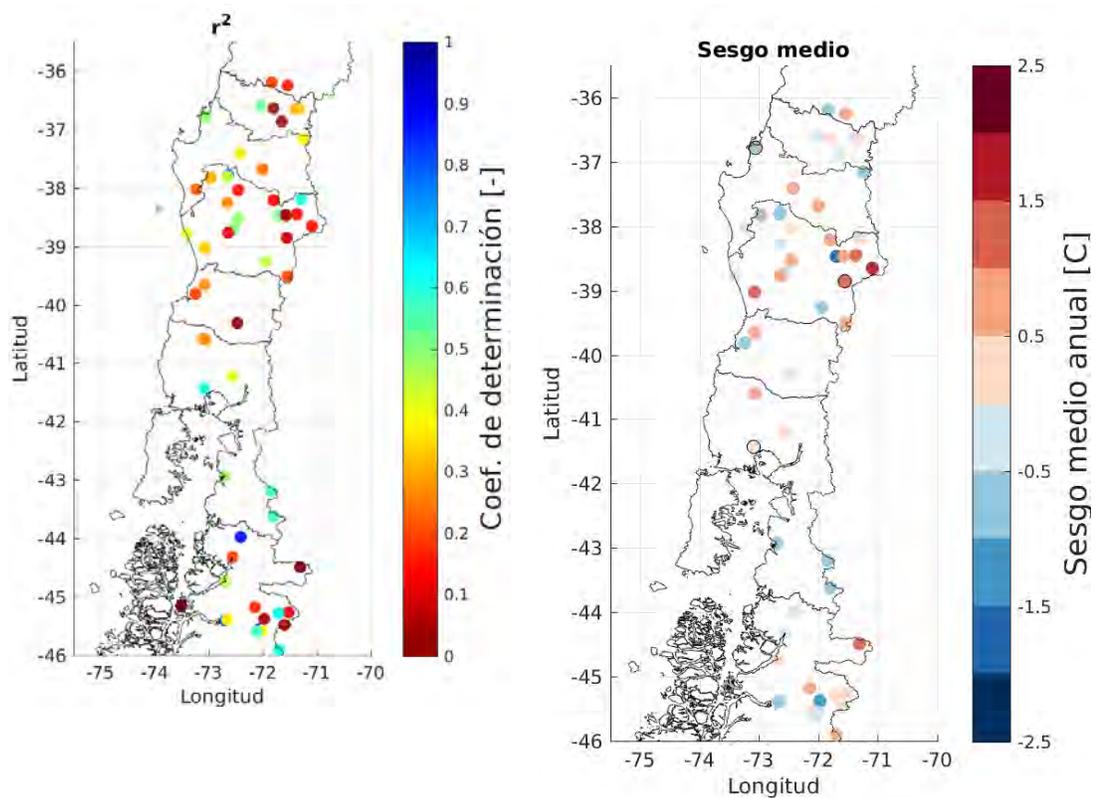


Figura 4.14: Gráficos de validación del producto de temperatura máxima (paneles superiores) y temperatura mínima (paneles inferiores). En el panel izquierdo, se muestran coeficientes de determinación entre valores anuales de temperatura máxima estimados y observados, mientras que el panel derecho se muestran los sesgos en los valores medios anuales.

La Figura 4.15 muestra una comparación a escala temporal mensual de los valores de temperatura máxima y mínima media, de los valores obtenidos en el proceso de validación cruzada con respecto a los observados. Se presentan los valores del coeficiente de determinación para cada una de las variables por mes.

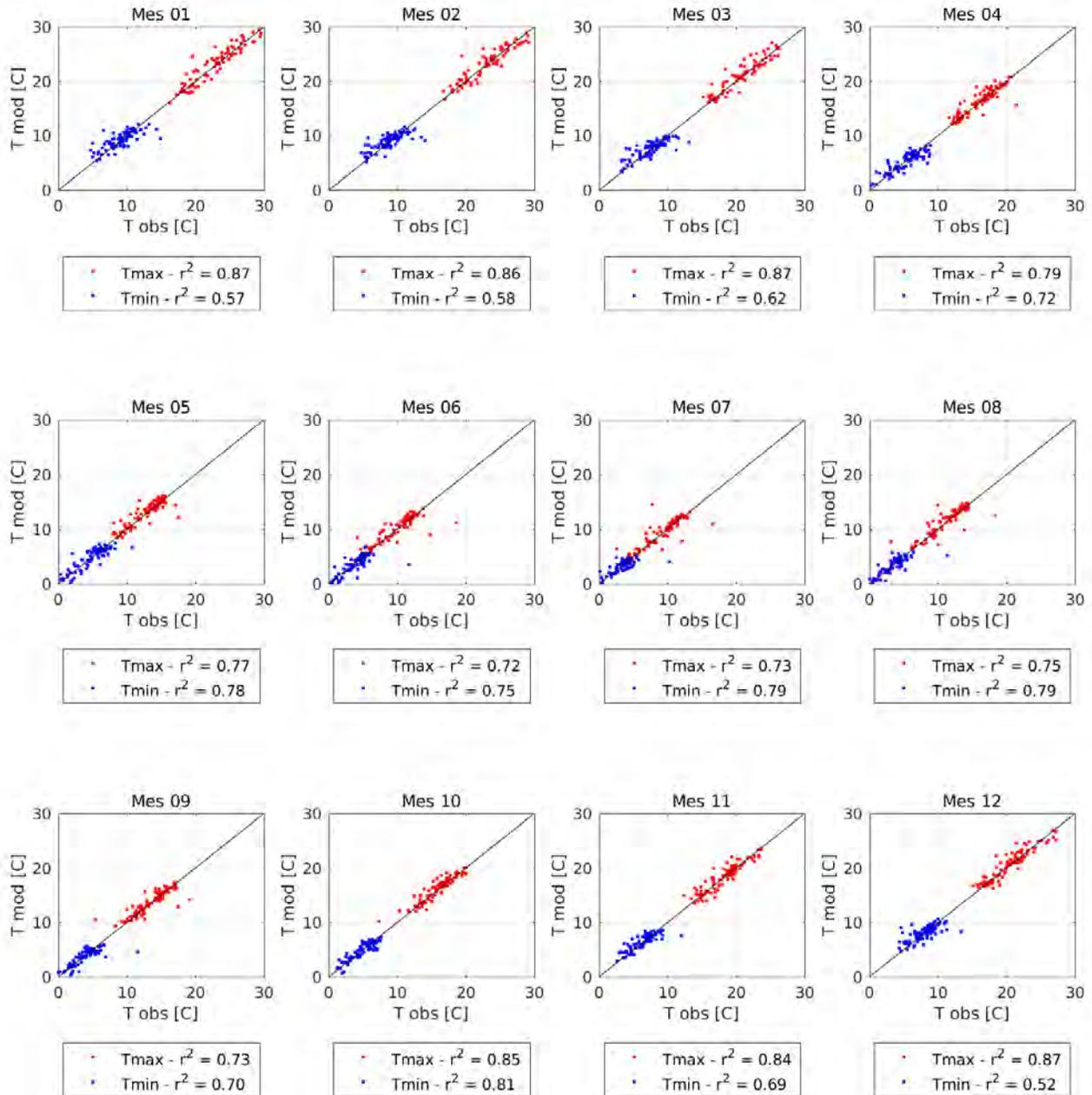


Figura 4.15. Comparación entre valores observados y estimados por CR2MET-CV de valores medios anuales de temperaturas máximas y mínimas, separados a nivel mensual.

En esta figura, se observa que la temperatura máxima presenta valores ligeramente superiores de este índice que los obtenidos para temperatura mínima ( $r^2_{\text{medio Tmax}} = 0,8$ ;  $r^2_{\text{medio Tmin}} = 0,69$ ). Sin

embargo, se observan variaciones estacionales en el desempeño con señales opuestas: mientras que las temperaturas mínimas presentan un menor desempeño en el periodo de los meses de verano, las temperaturas máximas disminuyen el nivel de correlación en los meses de invierno. Adicionalmente, se observan algunos puntos dentro de estos gráficos que escapan completamente de la tendencia general, presentando sesgos medios de incluso 8°C en los casos más extremos. Estos casos se concentran particularmente en la evaluación de los meses de invierno de la temperatura máxima.

#### CÁLCULO DE TEMPERATURA MEDIA

El cálculo de valores de temperatura media a dos metros se obtiene a través de replicar la evolución temporal tri-horarios, obtenida desde un producto de reanálisis, pero ajustado según las temperaturas extremas del producto descrito en la sección anterior. La serie de temperaturas medias es obtenida a través de interpolación lineal simple de la información del reanálisis al centro del punto de grilla de interés, donde se tiene información ajustada de temperaturas máximas y medias según lo descrito en el paso anterior.

Se establece un sistema de ecuaciones para definir, cada día, los parámetros de un modelo lineal simple, como se presenta en la ecuación (4.1)

$$T_{3h}^{prod}(d, h) = \alpha(d) + \beta(d) * T_{3h}^{Reanálisis}(d, h) \quad (4.1)$$

Donde  $T_{3h}^{prod}$  y  $T_{3h}^{Reanálisis}$  son el promedio tri-horario buscado y del reanálisis, respectivamente. Para obtener los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ , se plantea un sistema de ecuaciones utilizando las temperaturas mínimas y máximas del producto y del reanálisis (variables conocidas), según la ecuación (4.2)

$$\begin{aligned} \max[T_{3h}^{prod}(d)] &= \alpha(d) + \beta(d) * \max[T_d^{ERAbled}(d)] \\ \min[T_{3h}^{prod}(d)] &= \alpha(d) + \beta(d) * \min[T_d^{ERAbled}(d)] \end{aligned} \quad (4.2)$$

#### 4.3.3 VIENTO

El viento es otra de las variables meteorológicas a considerar dentro del proceso de modelación. Sin embargo, no existe una red de estaciones de medición de esta variable suficientemente extensa como para utilizarla de fuente de información. Este set de datos tampoco cumple las condiciones mínimas para ser usadas como base en el desarrollo de un producto grillado similar a lo hecho para precipitaciones y temperaturas. Sin embargo, para los esfuerzos de modelación, se requiere de información grillada y continua. Debido a esto, se recurre a las estimaciones entregadas por otras fuentes de menor escala espacial, como son los reanálisis atmosféricos. En este caso, se utilizan directamente las estimaciones de viento provistas por el reanálisis ERA5, interpoladas linealmente a los puntos de grilla de interés.

Sin embargo, para efectos de modelación se requiere el valor del viento a una altura de dos metros. El reanálisis ERA5 entrega estimaciones de velocidad de viento a 10 metros, por lo que resulta necesario realizar un ajuste que permita una adecuada representación. Con este fin, se utiliza la fórmula propuesta por la FAO, suponiendo un comportamiento del viento con la altura como un perfil logarítmico.

La Figura 4.16 presenta los valores medios de cuatro meses del año, para ejemplificar los valores que se obtienen de realizar este procedimiento. Se observa una cierta variabilidad estacional, pero que no es tan marcada. Adicionalmente, se estiman valores de mayor intensidad en los sectores costeros.

Los valores estimados por medio de este procedimiento no presentaron sesgos identificables con respecto a latitud, longitud o elevación, por lo que son utilizados sin ninguna corrección posterior.

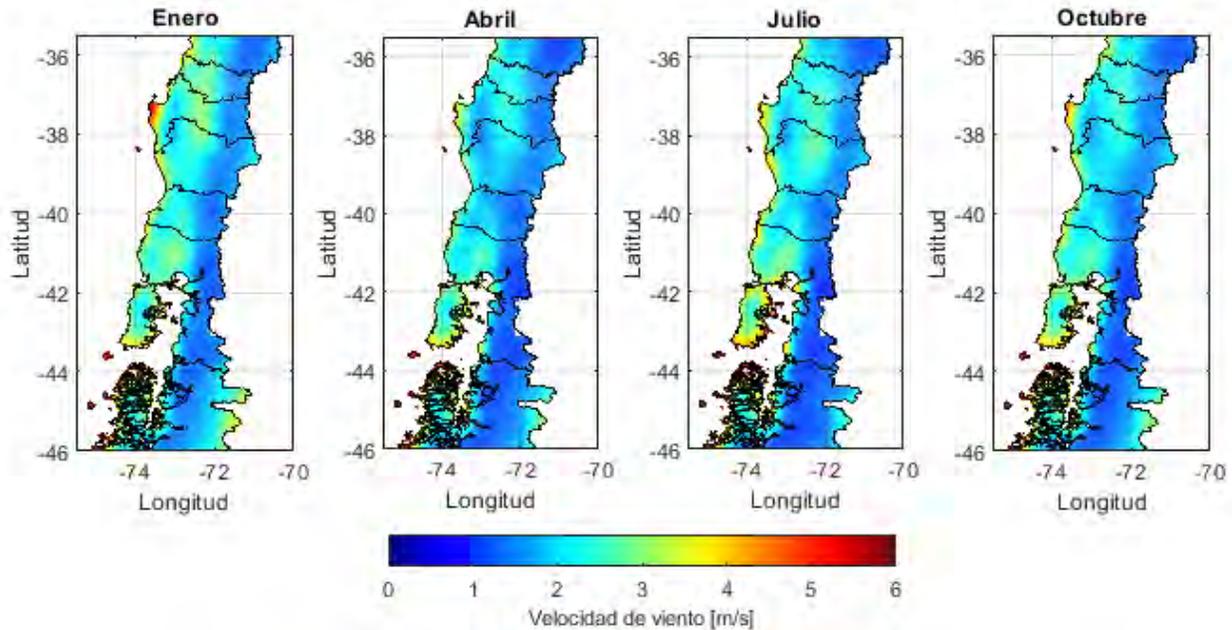


Figura 4.16: Magnitud del viento media en distintos meses para el periodo 1985-2015 obtenida del procesamiento de los valores obtenidos desde ERA5.

#### 4.3.4 HUMEDAD RELATIVA

La humedad relativa, al igual que el viento, es una variable necesaria que no cuenta con suficiente cobertura espacial, además de tener una alta variabilidad producto de efectos locales. Para obtener un campo continuo en el tiempo y en el espacio, en este caso también se recurre a información del reanálisis ERA5. Sin embargo, esta variable no se encuentra disponible directamente como variable de salida, por lo que se debe estimar utilizando la relación entre las presiones parciales de vapor de agua y de saturación. Estas presiones son estimables en función de las variables meteorológicas de temperatura y temperatura de rocío. Esto se traduce en la práctica en la ecuación 4.1:

$$HR = \frac{e_s(T_d)}{e_s(T_m)} \quad (4.1)$$

donde  $e_s(T_d)$  representa la presión de vapor de saturación de la temperatura de rocío y  $e_s(T_m)$  es la presión de vapor de saturación de la temperatura media.

Las variables de temperatura de rocío y temperatura media se obtienen directamente desde los reanálisis, a escala temporal tri-horaria. La presión parcial de vapor de ambas temperaturas es calculada por medio de la ecuación de August-Roche-Magnus, cuya fórmula se presenta en la ecuación (4.2).

$$e_s(T) = 6.1094 \exp\left(\frac{17,625 * T}{T + 243,04}\right) \quad (4.2)$$

donde  $e_s(T)$  es la presión de vapor de saturación a la temperatura T expresada en hPa y T es la temperatura a evaluar expresada en °C.

A pesar de estas mejoras considerables asociadas al cambio de producto de reanálisis atmosférico (ERA5), se identificaron leves sesgos asociados a la elevación. Estos fueron calculados utilizando información de estaciones de medición de las redes del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Centro de Estudios Avanzados de Zonas Áridas (CEAZA) y de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). A pesar de que algunas de estas fuentes de información se encuentran fuera de la zona de estudio, su inclusión se justifica en que el patrón espacial es similar a lo largo de todo el país. Se identificó que estaciones bajas presentan un sesgo negativo, mientras que estaciones en altura presentan un sesgo positivo. Esto quiere decir que, en la práctica, en sectores cordilleranos se estima una mayor humedad relativa que la registrada, mientras que en sectores costeros y del valle se tienen valores menores a lo registrado. El valor de este sesgo es calculado mediante regresiones lineales, separadamente por mes, y es posteriormente removido en el producto de humedad relativa obtenido a partir del reanálisis.

La Figura 4.17 muestra los campos de humedad relativa para cuatro meses representativos de cada una de las estaciones, habiendo ya aplicado la corrección de sesgo. Se observa claramente cómo se replica la variabilidad estacional, presentando valores mayores de humedad relativa en los meses de otoño e invierno, asociados al aumento de precipitación en dicha época. También es posible ver alta variabilidad espacial dentro de la zona de estudio.

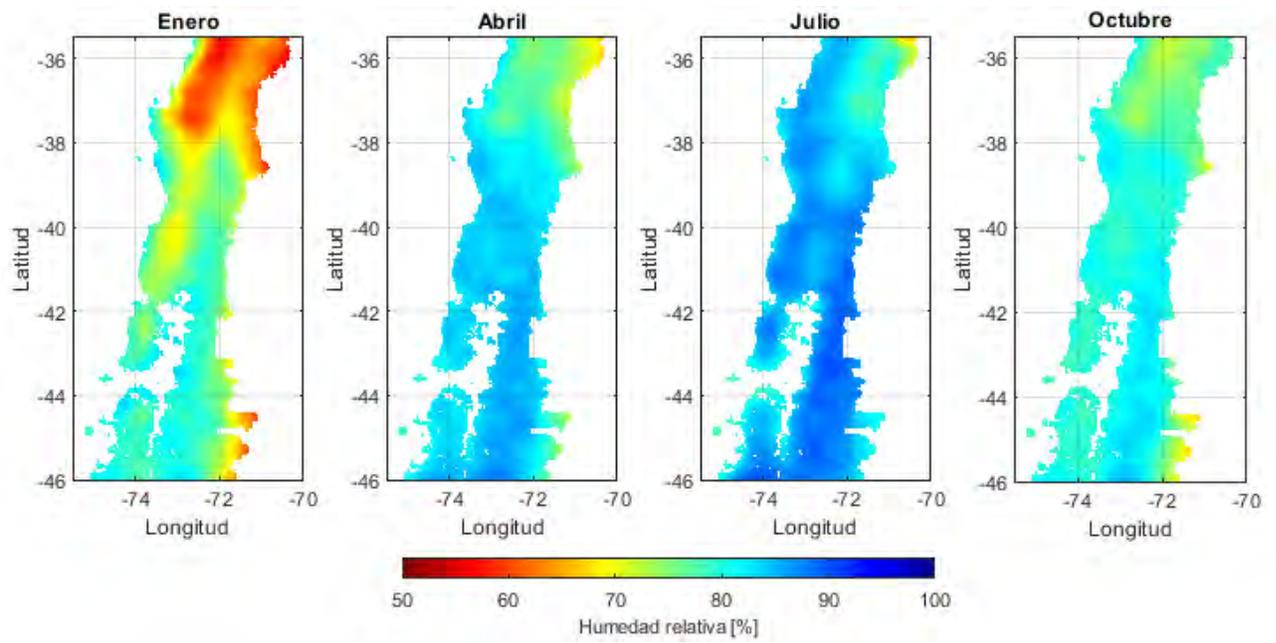


Figura 4.17: Magnitud de la humedad relativa media en distintos meses para el periodo 1985-2015 obtenida del procesamiento de los valores obtenidos desde ERA5.

## 4.4 CAMBIO CLIMÁTICO

La Organización Meteorológica Mundial (WMO por sus siglas en inglés), define Cambio Climático como una variación estadísticamente significativa tanto en el estado medio del clima como en su variabilidad, y dicha condición tiene un componente de persistencia en el tiempo (típicamente décadas o más). Cambios climáticos pueden ser atribuibles a procesos internos naturales del sistema terrestre, o a factores externos (antropogénicos).

Para evaluar el potencial impacto de este fenómeno, varias instituciones de investigación a nivel global han desarrollado Modelos Generales de Circulación (GCM, por sus siglas en inglés), los cuales buscan reproducir los procesos físicos, químicos y biológicos fundamentales para la representación en el sistema climático. Con el fin de tener un contexto comparativo de todos estos modelos, se han definido posibles escenarios futuros denominados Patrones de Concentración Representativos (Representative Concentration Pathways, RCP; Moss et al., 2010), en el marco del Proyecto asociado de Intercomparación de modelos Acoplados (Coupled Model Intercomparison Project, CMIP). Estos escenarios se reconocen por la perturbación en el balance radiativo al tope de la atmósfera equivalente al año 2100, con respecto a niveles preindustriales. Así, los escenarios con menor y mayor esfuerzo en la reducción emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) prevén, respectivamente, un forzamiento radiativo equivalente a 8,5 y 2,6 W/m<sup>2</sup> en 2100 (RCP2.6 y RCP8.5). Estos escenarios proyectan aumentos de temperatura desde 1.0 a 4.0°C respecto de la condición presente, para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5, respectivamente (Figura 4.18).

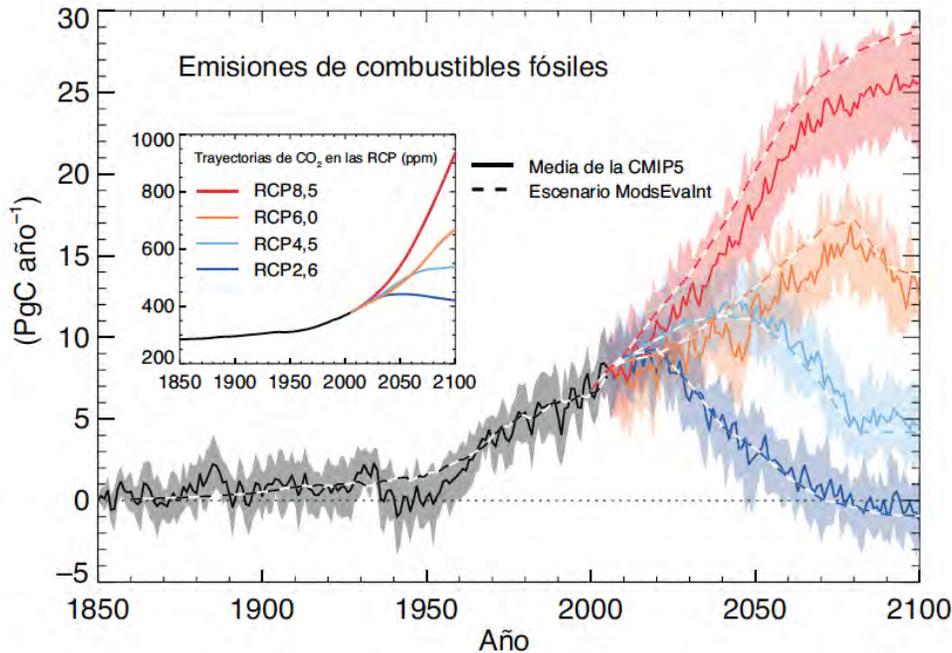
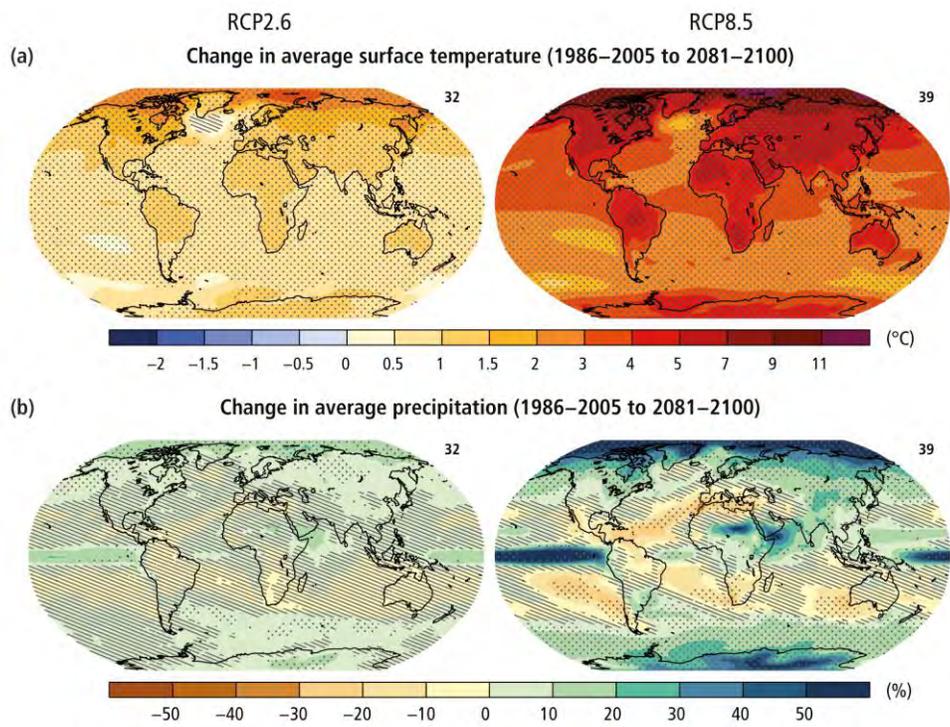


Figura 4.18: Emisiones de combustibles fósiles compatibles simuladas mediante los modelos CMIP5 para los cuatro escenarios RCP. Series temporales de emisiones anuales. Las líneas discontinuas representan las estimaciones históricas y emisiones de los distintos escenarios RCP calculadas mediante los modelos de evaluación integrados utilizados para definir los escenarios RCP, las líneas continuas y los penachos muestran resultados de los modelos del sistema Tierra de la CMIP5. Fuente: Resumen técnico del quinto informe de evaluación del IPCC (IPCC, 2013).

El incremento de GEI proyecta en particular déficit de precipitación para varias regiones de Chile, al contrario de lo esperable a nivel mundial (Figura 4.19). En general, los distintos modelos muestran sistemáticamente una disminución de esta la variable en la región, lo cual es particularmente importante considerando el escenario de vulnerabilidad de estas regiones, así como los impactos socio-económicos y ecológicos asociados a esta disminución. El tipo de impactos asociado a este tipo de escenario es similar a lo que se ha estudiado para el episodio de sequía, que se observa desde 2010 en el territorio nacional y que ha sido evaluada en diversos estudios (Aldunce *et al.*, 2017; Garreaud *et al.*, 2017; González *et al.* 2018)



**Figura 4.19: Cambios en la temperatura superficial promedio (a) y cambios en precipitación promedio (b) basados en las proyecciones medias de un conjunto de modelos para el periodo 2081-2100 relativo al periodo 1986-2005 bajo un escenario RCP2.6 (izquierda) y RCP8.5 (derecha). El número de modelos usado para calcular el promedio multi-modelo se indica en la esquina superior derecha de cada panel. Las áreas punteadas muestran regiones donde el cambio proyectado es grande respecto a la variabilidad natural y donde al menos un 90% de los modelos concuerdan en el signo del cambio. Las áreas achuradas muestran regiones donde el cambio proyectado es menor a una desviación estándar de la variabilidad natural interna. Fuente: IPCC (2013).**

En el contexto nacional, múltiples estudios basados en observaciones muestran coherencia en el comportamiento de las precipitaciones de las últimas décadas con lo proyectado (Aceituno *et al.*, 1993; Minetti *et al.*, 2003; Haylock *et al.*, 2006; Vicuña *et al.*, 2011; Cai *et al.*, 2012; Quintana y Aceituno, 2012; Purich *et al.*, 2013; Vera y Díaz, 2015; Boisier *et al.*, 2018, 2016). Las causas de esta tendencia, en particular en la zona de estudio, están asociadas tanto a variabilidad natural interdecadal, como a efectos antropogénicos, relacionadas con el aumento de GEI y la reducción de ozono estratosférico. Así mismo, las temperaturas también presentan un cambio consecuente en el territorio nacional, aunque algunos estudios identifican algunas anomalías. Falvey y Garreaud (2009), por ejemplo, muestran que, contrario

a la tendencia global, en los sectores costeros del norte de Chile ha habido una disminución de la temperatura media de 0,2°C/década aproximadamente. Sin embargo, en los valles interiores de Chile y en zonas precordilleranas, se registra un aumento de temperaturas de aproximadamente 0,25°C/década. Sin embargo, estos cambios se asocian con un cambio de fase de la Oscilación Decadal del Pacífico, y no se replica en periodos de tiempo más extensos. Además, los cambios de temperatura en capas más elevadas de la atmósfera son consecuentes con las tendencias globales.

#### 4.4.1 INTRODUCCIÓN DE METODOLOGÍA DE ESCALAMIENTO

La metodología de escalamiento a utilizar es análoga a la desarrollada en DGA (2018), adoptándose los mismos modelos de circulación general, bajo un escenario RCP8.5. Sin embargo, existirán algunas diferencias en el producto de cambio climático utilizado, debido a que las técnicas de escalamiento se basan en observaciones en su desarrollo. Debido a la actualización del producto de precipitación, se esperan algunos cambios consecuentemente. Se resumen en esta sección la metodología de elección de GCM a utilizar como referencia, así como la técnica de escalamiento estadístico utilizado.

##### I. SELECCIÓN DE ESCENARIO Y MODELOS

El escenario RCP a utilizar corresponde al RCP8.5, que representa el escenario más pesimista de los planteados dentro en el marco del CMIP5, y que considera un forzante radiativo adicional de 8.5 W/m<sup>2</sup> en el año 2100 con respecto a niveles preindustriales. Este escenario busca definir un límite superior en los efectos de cambio climático. Según lo descrito anteriormente, los GCM a utilizar como referencia son consecuentes con los utilizados en DGA, 2018 y se enumeran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Modelos global de clima seleccionados para representar las proyecciones de cambio climático en el presente estudio.

Modelo	Institución	Sensibilidad climática
CSIRO-MK3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence, Australia.	Baja Extrema
CCSM4	National Center for Atmospheric Research, USA.	Baja moderada
MIROC-ESM	Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies, Japan.	Alta moderada
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace, France.	Alta extrema

La elección de estos modelos se basa en un conjunto de criterios, descritos con mayor detalle en DGA (2017). De forma resumida, estos criterios consideran:

- a. **Respuesta regional a modos globales de variabilidad climática.** Se buscó aquellos modelos que representaban adecuadamente fenómenos interanuales como la influencia de El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) y el Modo Anular del hemisferio sur (SAM), debido a su influencia en la variabilidad de precipitación en Chile. Se descartaron aquellos con un pobre desempeño en representar estos modos naturales de la atmósfera.

**b. Sensibilidad climática.** Condición del modelo que hace alusión a la respuesta global del sistema climático a una cierta forzante externa. Se seleccionaron distintos modelos, con el fin de representar sensibilidades bajas, medias y altas. El nivel de sensibilidad de cada modelo se detalla en la Tabla 4.3.

**c. Cambios regionales.** Los cambios proyectados de temperatura y precipitación fueron evaluados para cada modelo. Se seleccionó un conjunto de modelos con impactos diversos.

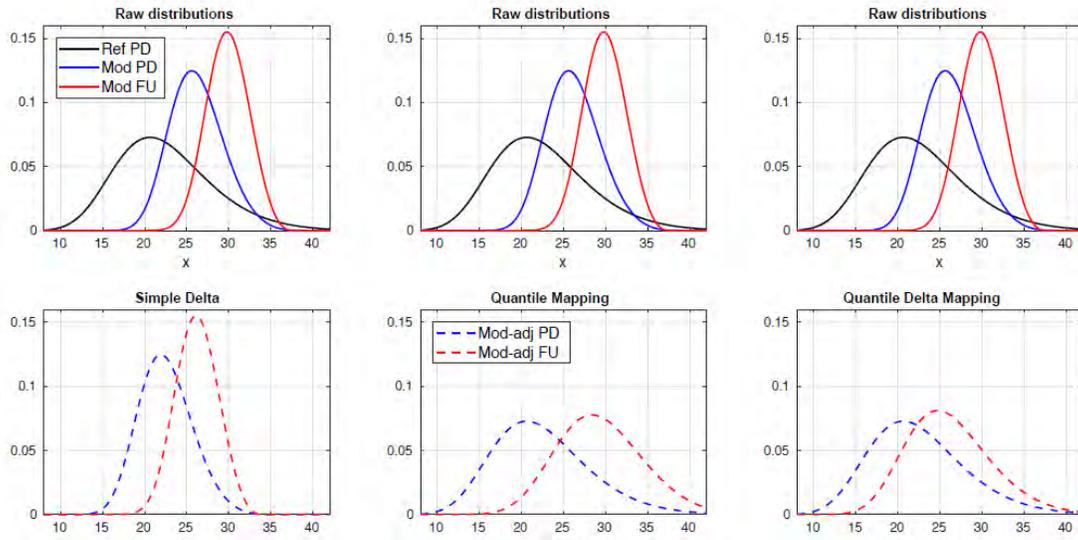
## II. TÉCNICAS DE ESCALAMIENTO

Las proyecciones de cambio climático se basan en simulaciones numéricas de los GCM que se modelan a escala global. Sin embargo, para evaluar efectos sobre los sistemas hidrológicos, se requiere de información a nivel regional. Debido a esto, es necesario aplicar técnicas de ajustes que permitan interpretar a nivel regional las señales globales de los GCM. Estas técnicas de escalamiento se clasifican en dos grandes familias: dinámicas y estadísticas. Los escalamientos dinámicos presentan la ventaja de replicar el sistema climático a una escala regional, por lo que se obtienen campos físicos consistentes. Sin embargo, requieren de intensivo tiempo y poder de cómputo, y sus resultados están sujetos a sesgos inherentes al modelo regional utilizado. Por estos motivos, en este proyecto no se consideró la utilización de un modelo de circulación regional para proyecciones de variables meteorológicas.

Por otro lado, los métodos de regionalización estadísticos son una buena alternativa, ya que permiten una regionalización coherente con registros históricos (Hamlet et al., 2010; Tryhorn y Degaetano, 2011; Cavazos y Arriaga-Ramírez, 2012). Los enfoques de escalamiento estadístico se basan en el supuesto de establecer relaciones estadísticas entre la información de los GCM y los datos observados, tanto entre ellos como entre los distintos periodos de tiempo a analizar (Wilby et al., 1998). Existen múltiples métodos estadísticos, comúnmente utilizados en hidrología, entre los que destacan:

- a. Método delta: corresponde en introducir cambios en una variable de referencia, siguiendo las proyecciones de un GCM. Se puede, por ejemplo, introducir un cambio absoluto de temperatura o aplicar un factor de ponderación a la precipitación. Es una aproximación razonable en algunos casos (e.g., Ramirez y Jarvis, 2010), pero no considera cambios temporales en otros aspectos de la distribución de frecuencia de la variable evaluada, como su varianza o extremos.
- b. *Quantile mapping* (QM): considera los cambios temporales en los cuantiles de la distribución de probabilidad de la variable evaluada. Estos cambios son evaluados al contrastar los datos de referencia observados y la simulada por GCMs, en un periodo presente consistente. Esta técnica es efectiva en remover sesgos relativos a observaciones, pero tiene el problema de amplificar o atenuar –en algunos casos de manera sustantiva– los cambios en el tiempo simulados por el GCM (Ehret et al., 2012; Cannon et al., 2016).
- c. *Quantile Delta Mapping* (QDM): propuesta en Cannon *et al.* (2016), preserva los cambios absolutos (utilizados típicamente para temperatura) o relativos (e.g., precipitación) en los cuantiles, corrigiendo al mismo tiempo los sesgos en la distribución de frecuencia de la variable simulada, respecto de la referencia.

La Figura 4.20 ilustra las técnicas de escalamiento descritas, para conjuntos hipotéticos de temperatura. Las temperaturas simuladas se muestran en azul, para el periodo presente, y en rojo para el periodo futuro. La curva negra corresponde a los valores del conjunto de referencia. Todas las técnicas corrigen el valor medio simulado. Sin embargo, el método delta no representa adecuadamente la distribución de la variable representada, mientras que QM ajusta bien los valores observados, pero amplifica cambios en los valores medios. El método QDM por otra parte, logra ajustar el valor medio, al mismo tiempo que reproduce la distribución, y además mantiene los cambios absolutos propuestos en el modelo según cuantil.



**Figura 4.20:** Comparación de distintas técnicas de escalamiento para la distribución de frecuencia de una variable, a partir de una muestra sintética de datos (paneles superiores). Las curvas continuas rojas y azules representan la variable a ajustar en dos periodos de tiempo (ej., presente y futuro), utilizando una variable de referencia (negro). Los paneles inferiores muestran el ajuste obtenido mediante el método Delta (izquierda), QM (centro) y QDM (izquierda). Fuente: DGA, 2018

Considerando lo anteriormente descrito, se utiliza la técnica de mapeo de delta por cuantiles para realizar el escalamiento de las precipitaciones y temperaturas con el fin de evaluar el impacto del cambio climático en la zona de estudio.

#### 4.4.2 PRECIPITACIÓN

La Figura 4.21 muestra el resultado de la aplicación de un escalamiento utilizando el método QDM para la variable precipitación. El panel superior izquierda muestra los valores climatológicos anuales de la referencia utilizada (en este caso, el producto de precipitaciones CR2MET v2.0). Los cuatro paneles restantes de la fila superior muestran las estimaciones obtenidas directamente desde los GCMs (en la figura se señala a cuál corresponde cada una), que son incapaces de reproducir adecuadamente los valores climatológicos de precipitación media anual. Si bien se identifica un patrón espacial concordante de aumento de precipitaciones en la zona más austral, aun así no se logran reproducir fenómenos locales tales como la precipitación orográfica, mostrando campos de valores relativamente continuos sobre la zona de estudio, en contraste con lo que se tiene como base con el producto CR2MET, la acumulación en

las zonas cordilleranas del centro de Chile está significativamente subestimada en las simulaciones de GCMs. Este rasgo es común en modelos de baja resolución espacial. En estos modelos, la influencia de los Andes sobre el flujo zonal está subrepresentado, subestimando así la componente de precipitación orográfica característica en cordillera. Esto refuerza la idea de lo necesarios que resultan los procesos de escalamiento.

Las filas inferiores de dicha figura muestran el resultado del proceso de escalamiento para cada uno de los modelos, posterior a la aplicación de la metodología propuesta. Estos valores, por construcción, deben ser climatológicamente iguales al periodo utilizado como referencia. Se observa que esta condición se cumple y que, por tanto, las estimaciones de cambio serán válidas como comparación al periodo de referencia calculado con el producto observacional.

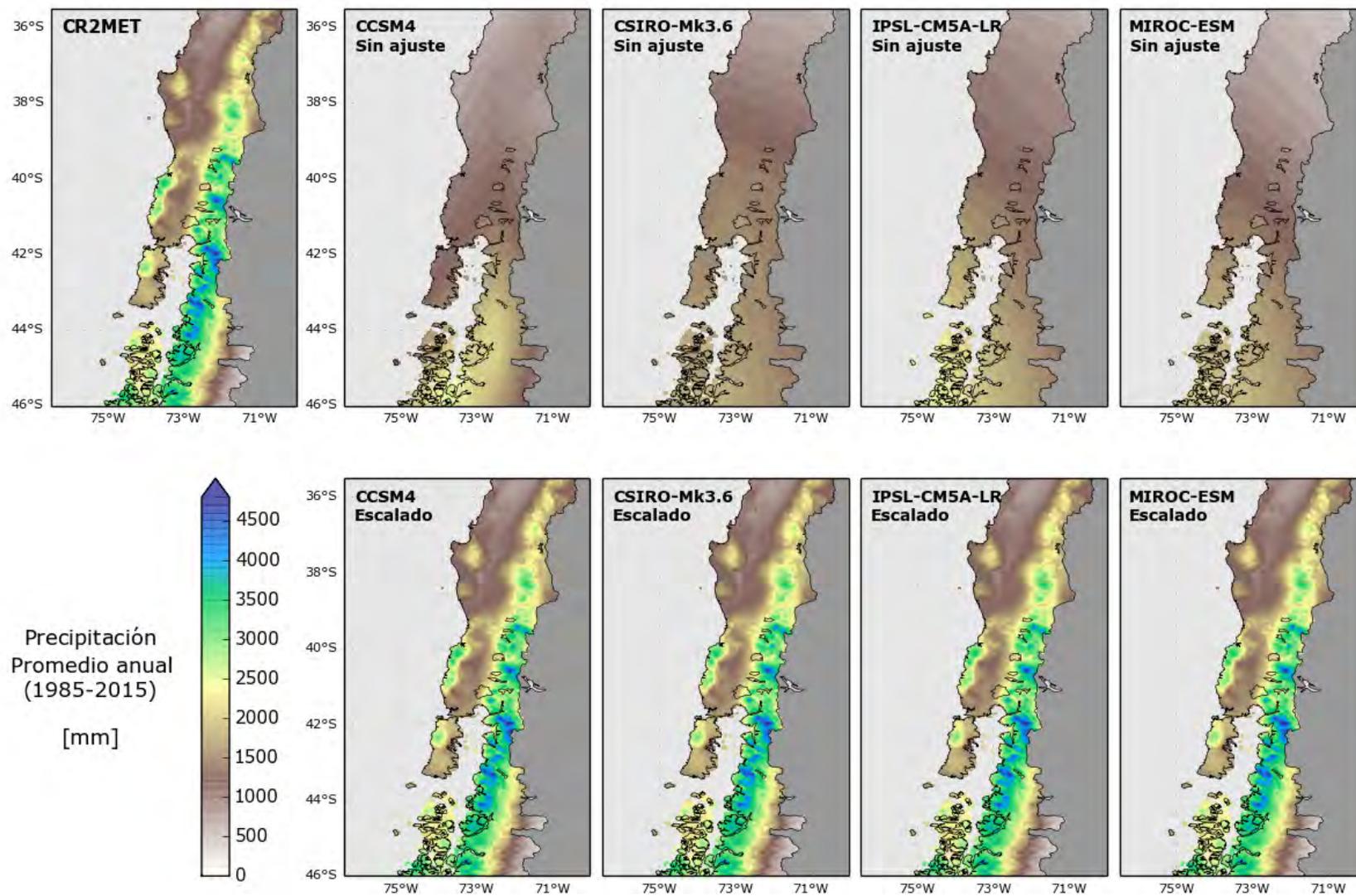


Figura 4.21: Promedios anuales climatológicos (1985-2015) para la precipitación anual. Se muestran los resultados del producto de temperatura CR2MET (referencia, panel superior a la izquierda) y los obtenidos de los cuatro GCMs evaluados en este proyecto. Los paneles inferiores muestran los resultados del escalamiento para cada modelo, los que, por construcción, deben replicar la referencia.

Los cambios medios netos proyectados en precipitación se muestran en la Figura 4.22. En este caso, la metodología de regionalización aplicando deltas por cuantil, conserva los cambios relativos en cada percentil donde efectivamente se registra precipitación. Esto se traduce en que no se conserven los cambios proyectados en la media. Los cambios son heterogéneos espacialmente, pero las señales de los modelos se replican de manera concordante en la zona de estudio. Los sectores cordilleranos, tanto de la Costa como de los Andes, proyectan disminuciones de montos sustantivos, que varían entre los 200 y más de 700 mm anualmente. Los sectores del valle también presentan disminuciones, pero de menor magnitud.

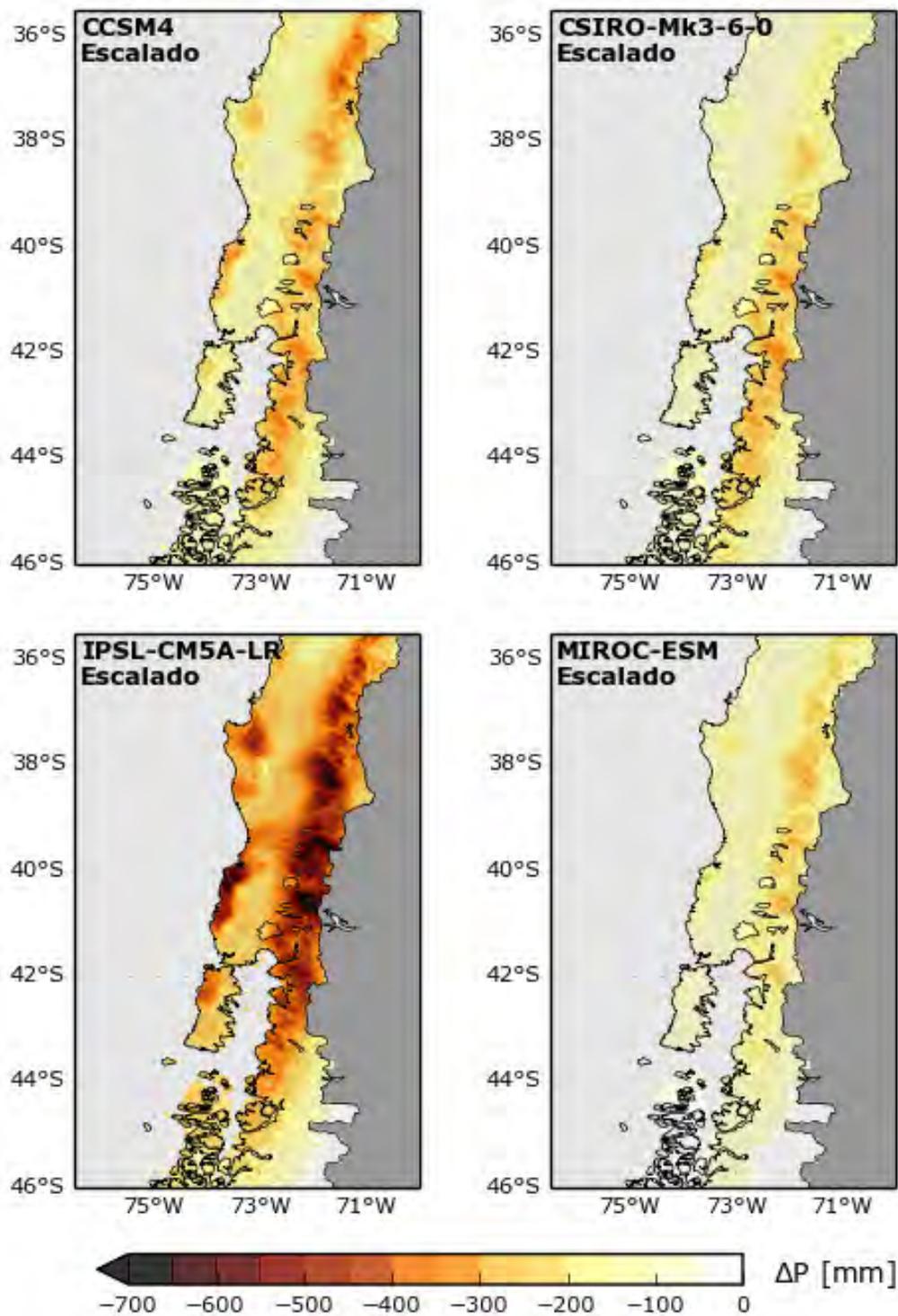


Figura 4.22: Cambios de precipitación anual media, proyectado hacia 2030-2060 con respecto al periodo 1985-2015. Para cada modelo evaluado, se presentan las diferencias con respecto al periodo base 1985-2015.

Porcentualmente, las disminuciones de tres de los cuatro modelos rondan valores cercanos al 10% con respecto al periodo de referencia, mientras que sólo uno de ellos (IPSL-CM5A-LR) presenta un mayor valor, del orden del 30% al 40% del valor medio anual. Resulta interesante notar que la severidad de las disminuciones proyectadas es concordante con el nivel de sensibilidad climática atribuido a cada modelo según lo presentado en la Tabla 4.1. En dicha tabla se señala el modelo IPSL como el de mayor sensibilidad climática, lo cual es concordante con las proyecciones de disminución presentadas.

Para destacar el potencial impacto de los cambios de precipitación proyectados hacia el futuro en la hidrología a la escala de cuenca, en la Figura 4.23 se presentan promedios espaciales de las diferencias entre el periodo futuro y presente, sobre cuencas de extensión mediana y grande, donde fueron seleccionadas algunas de las cuencas más representativas de la zona de estudio. El panel izquierdo permite ver espacialmente como las señales de cambio proyectado van disminuyendo porcentualmente a medida que se va avanza hacia el sur. Los gráficos del sector derecho de dicha figura muestran el detalle de cambio porcentual medio proyectado para cada cuenca por cada modelo. Se observa que la variabilidad proyectada entre modelos en general es baja, y en general es del orden del 10%. La única excepción a esto se presenta en el modelo IPSL-CM5A-LR, el cual proyecta valores del orden del 20% en cada una de las cuencas.

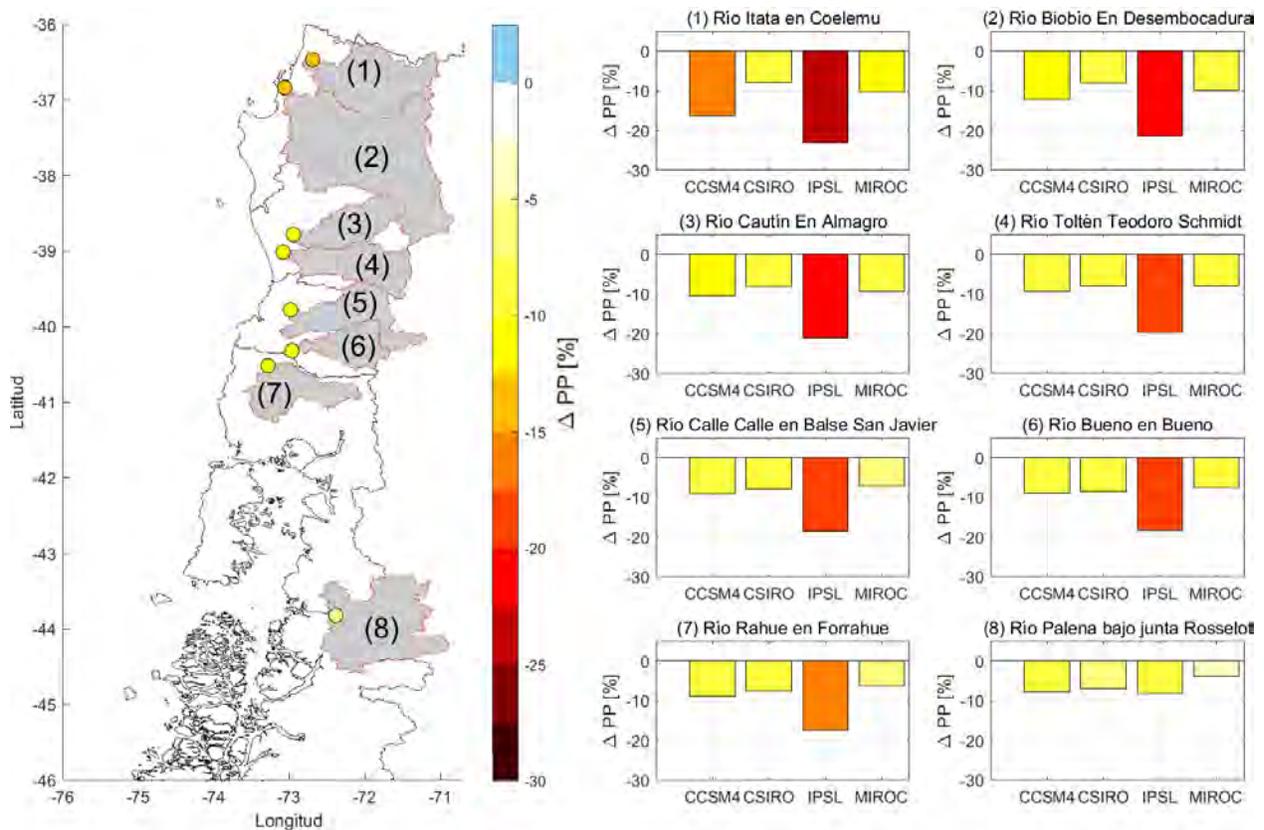


Figura 4.23: Cambio relativo en precipitación media anual proyectado para el periodo futuro (2030-2060) respecto al periodo de línea base (1985-2015), promediado sobre un conjunto de cuencas representativas. El panel izquierdo muestra el cambio promedio de los cuatro modelos, mientras que los paneles del lado derecho entregan información específica por modelo, para estas 8 cuencas de mediana a gran extensión.

#### **4.4.3 TEMPERATURA**

La necesidad de realizar el proceso de escalamiento para las variables de temperatura máxima y mínima nuevamente se confirman en las Figura 4.24 y Figura 4.25, al comparar las climatologías obtenidas directamente de los GCMs y las de los productos a 5 km derivados de observaciones para estas variables. Al igual que en la precipitación la baja resolución de los modelos, así como también otros sesgos propios de su construcción, hacen que se presenten diferencias importantes con los valores observados. Particularmente deficiente resulta la representación del gradiente térmico entre valle y montaña, ausente tanto en el caso de la temperatura máxima como mínima. Se llegan a observar diferencias de hasta 10°C entre los valores estimados en el producto CR2MET, con respecto a los de los GCM. Esto resulta más evidente en el caso de la temperatura máxima. En el caso de la temperatura mínima, se logra replicar de mejor forma el gradiente topográfico (particularmente notable resulta el caso del modelo CCSM4 en el sector cordillerano), pero de todas formas se observan variaciones en los patrones climatológicos significativas que deben ser corregidos.

Para ilustrar el método de regionalización, se muestran también en la Figura 4.24 y Figura 4.25 las climatologías de las variables escaladas para cada modelo, las que, por construcción, replican los valores obtenidos con del producto de referencia (CR2MET).

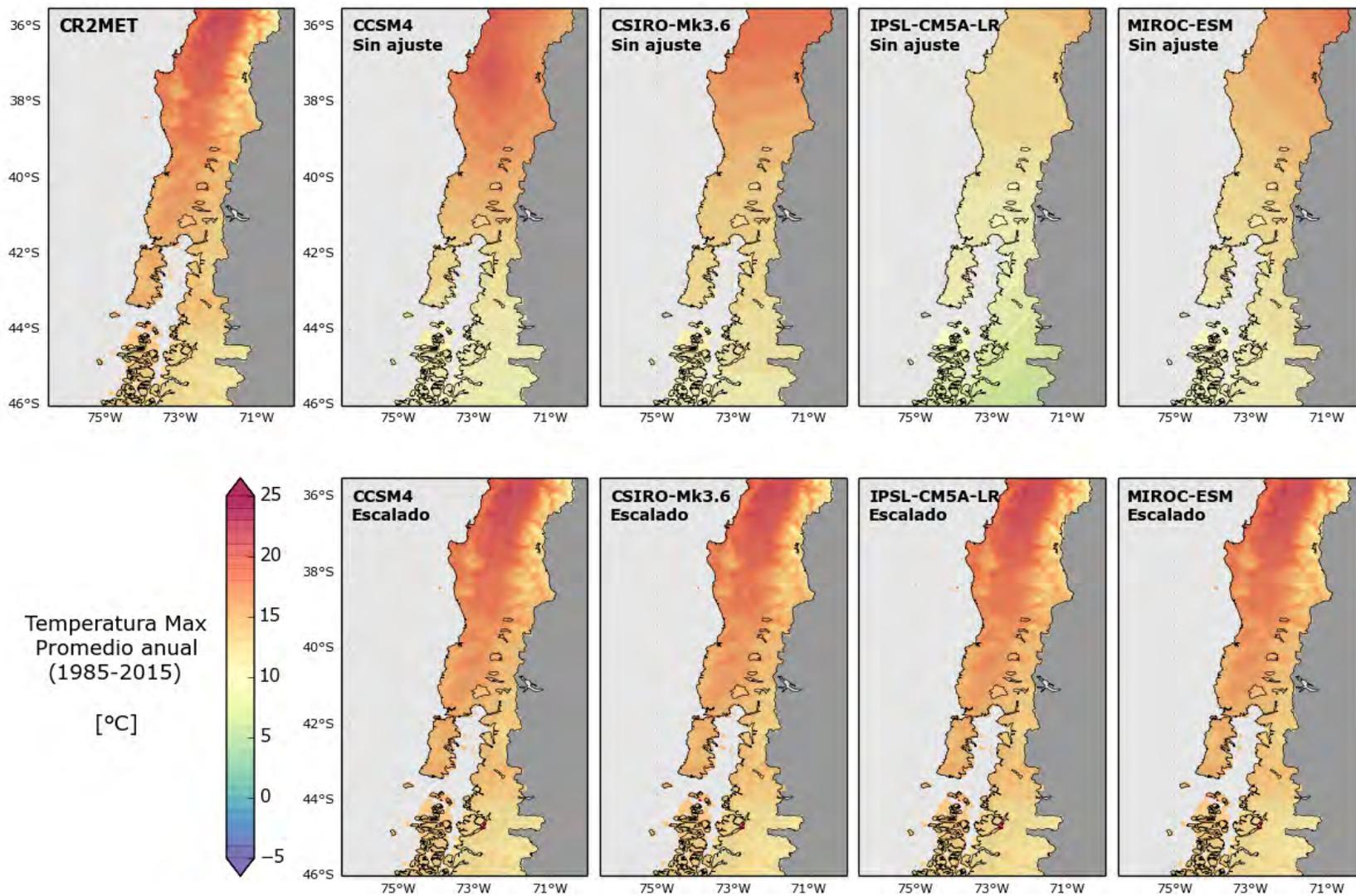


Figura 4.24: Promedios anuales climatológicos (1985-2015) de la temperatura diaria máxima. Se muestran los resultados del producto de temperatura CR2MET (referencia, panel superior a la izquierda) y los obtenidos de los cuatro GCMs evaluados en este proyecto. Los paneles inferiores muestran los resultados del escalamiento para cada modelo, los que, por construcción, deben replicar la referencia.

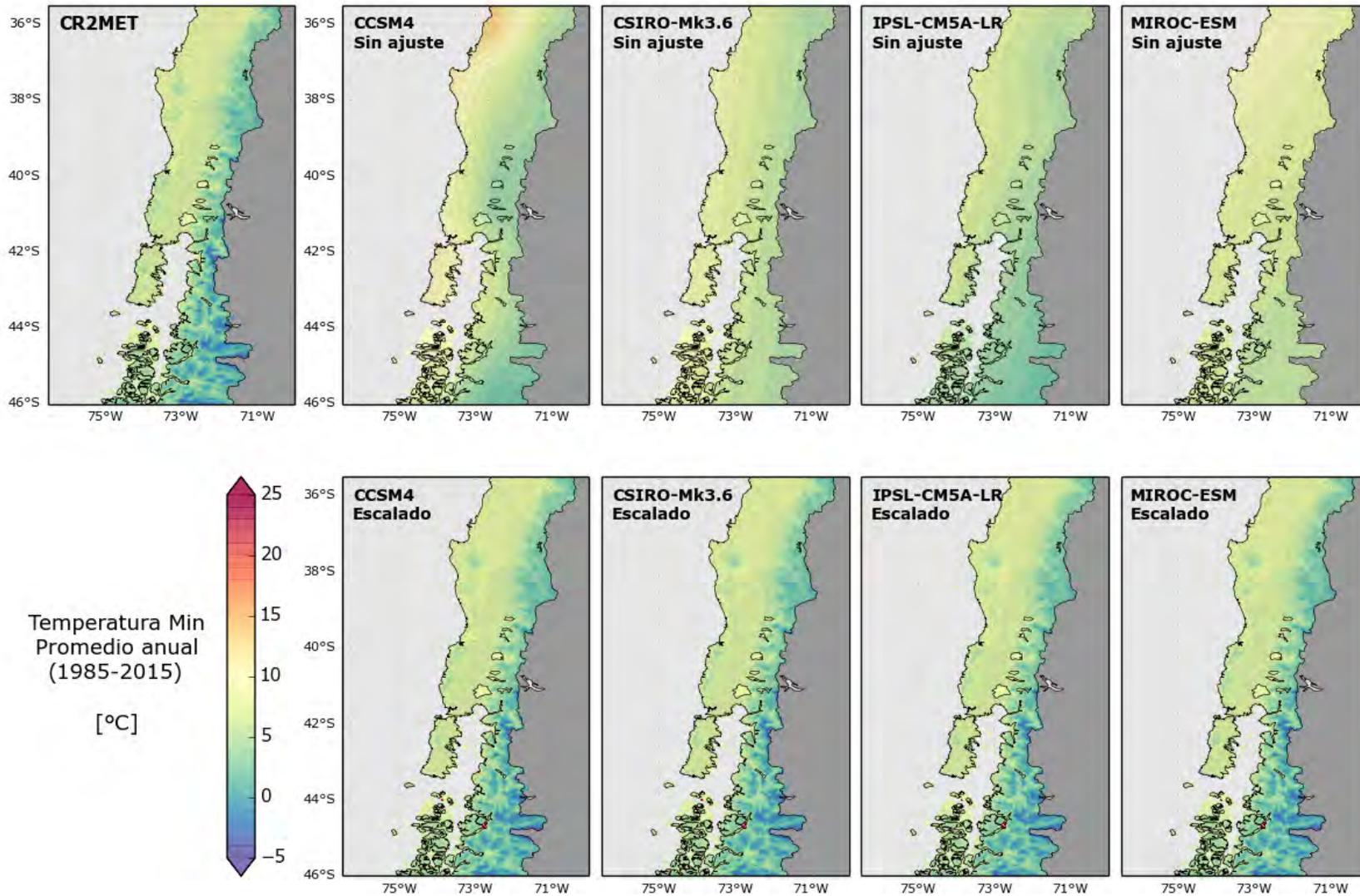


Figura 4.25 Promedios anuales climatológicos (1985-2015) de la temperatura diurna mínima. Se muestran los resultados del producto de temperatura CR2MET (referencia, panel superior a la izquierda) y los obtenidos de los cuatro GCMs evaluados en este proyecto. Los paneles inferiores muestran los resultados del escalamiento para cada modelo, los que, por construcción, deben replicar la referencia.

La Figura 4.26 muestra los cambios de temperatura máxima proyectados hacia el futuro por cada GCM regionalizado. Cabe recordar que, para estas variables, el resultado del método QDM conserva los cambios originales de los modelos, tanto en medias como en cuantiles. Coherente con los diagnósticos de cambio climático a escala global, según el escenario RCP8.5, todos los modelos muestran un aumento de temperatura en la zona de estudio hacia 2030-2060, en torno a 1°C y 2.5°C en el caso de la temperatura máxima. Sin embargo, en la Figura 4.27 se muestra que la temperatura mínima no alcanza aumentos de tanta magnitud como la máxima (en algunos casos los aumentos esperados se mantienen por bajo 1°C, en particular en el sector de la Cordillera de Nahuelbuta), lo que eventualmente podría traducirse en un aumento de la amplitud térmica. Así mismo, se proyectan cambios de mayor magnitud en la zona norte del estudio, en contraste con la parte más austral.

Longitudinalmente, se logra distinguir en ambas variables un aumento de los valores en la zona cordillerana (en especial en MIROC-ESM, aunque también es el modelo que presenta mayor variabilidad espacial). Este mayor aumento en la zona cordillerana, respecto de las zonas costeras, es coherente con la amplificación de cambios de temperatura en los continentes observado en otras regiones del globo, así como también con lo encontrado en la aplicación de esta metodología a las macrozonas norte y centro del país (DGA, 2018). Este mayor calentamiento local en los sectores cordilleranos puede conllevar altas implicancias en lo referente a impactos hidrológicos.

La Figura 4.28 muestra el cambio en el decil superior de temperatura máxima en el verano austral (diciembre a febrero), obtenido de las simulaciones escaladas. Esta figura muestra las ventajas de la metodología de regionalización adoptada con respecto al método Delta, que solo considera cambios en la media. Con el enfoque QDM, se conservan los cambios en la distribución de frecuencia de variable evaluada. En particular, se refleja que distintos modelos proyectan aumentos más drásticos de las temperaturas extremas (CSIRO), mientras que otros proyectan menores cambios de valores extremos (CCSM4). Además, existe una gran variabilidad espacial también dentro de los mismos modelos. Análogamente, la Figura 4.29 muestra los cambios proyectados para el decil inferior de la temperatura mínima en el periodo de invierno. Al igual que en el caso de la temperatura máxima, se observan diferencias espaciales, para regiones distintas, dentro de un mismo modelo. Adicionalmente, también se observan diferencias entre modelos, que varían en magnitud.

### CAMBIOS EN TEMPERATURAS MÁXIMAS

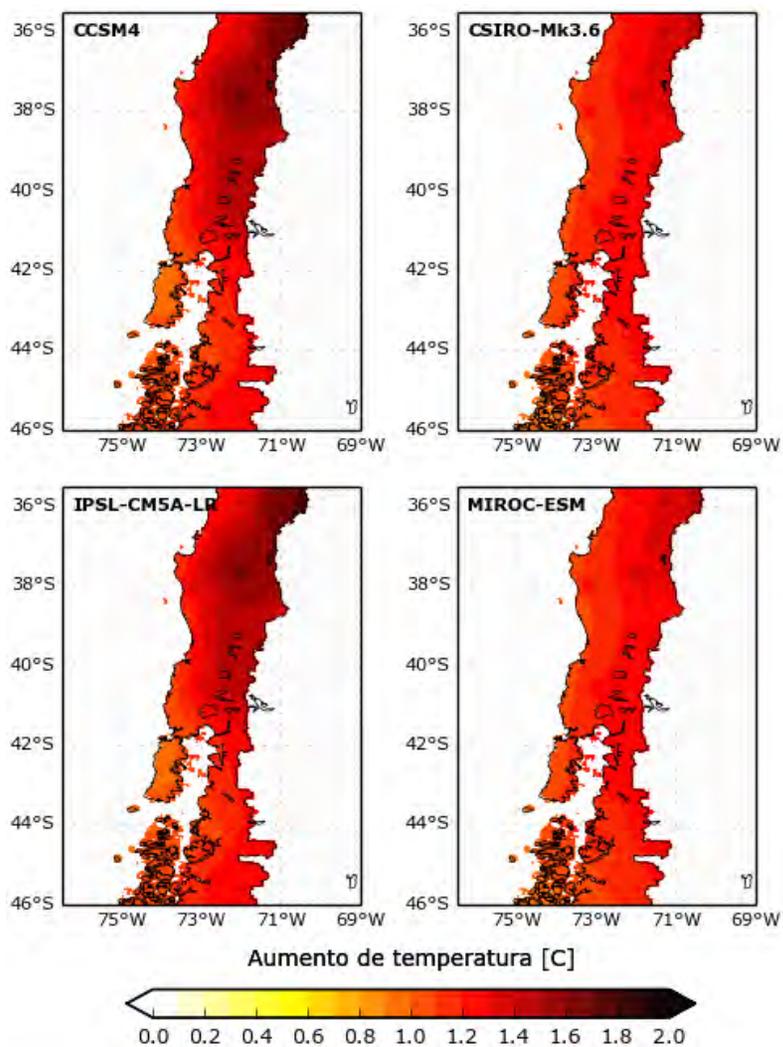


Figura 4.26. Cambios proyectados en la media anual de temperatura diurnas máximas por los cuatro GCMs hacia 2030-2060, respecto al periodo 1985-2015.

### CAMBIOS EN TEMPERATURAS MEDIAS MÍNIMAS

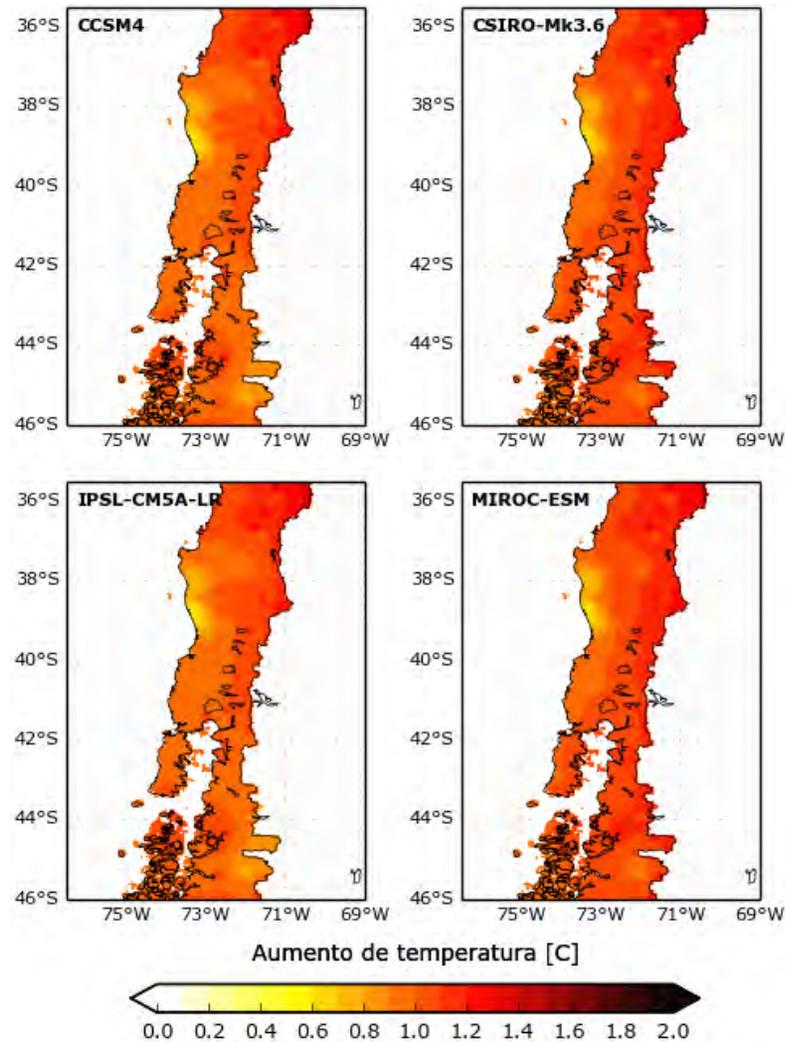


Figura 4.27. Cambios proyectados en la media anual de temperatura diurnas mínimas por los cuatro GCMs hacia 2030-2060, respecto al periodo 1985-2015.

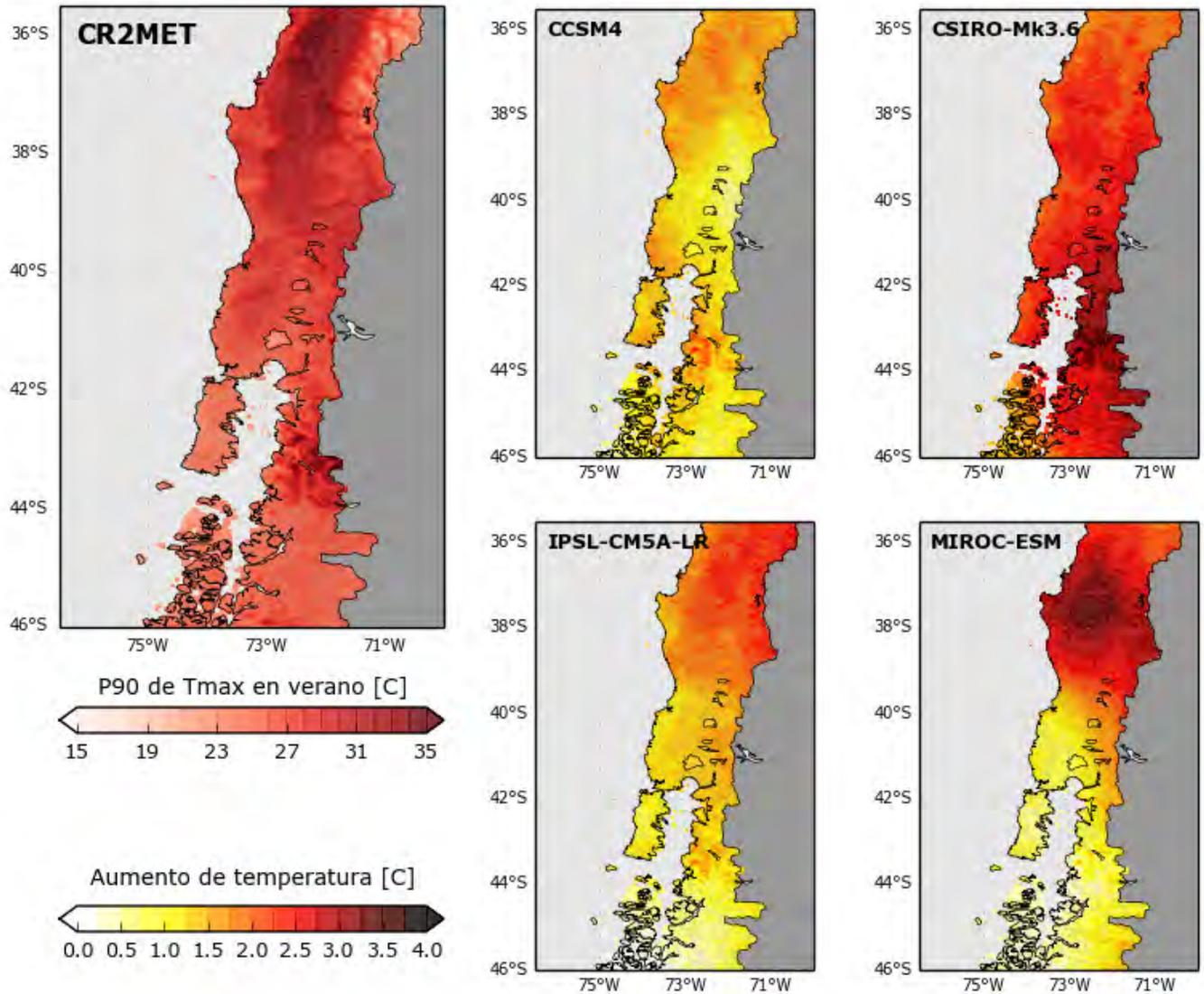


Figura 4.28: Cambios proyectados en el percentil 90% de temperatura máxima en verano (diciembre a febrero) hacia el 2030-2060, respecto del periodo 1985-2015. Panel a la izquierda muestra la climatología de esta variable en el periodo de referencia (1985-2015), igual en todos los modelos ajustados.

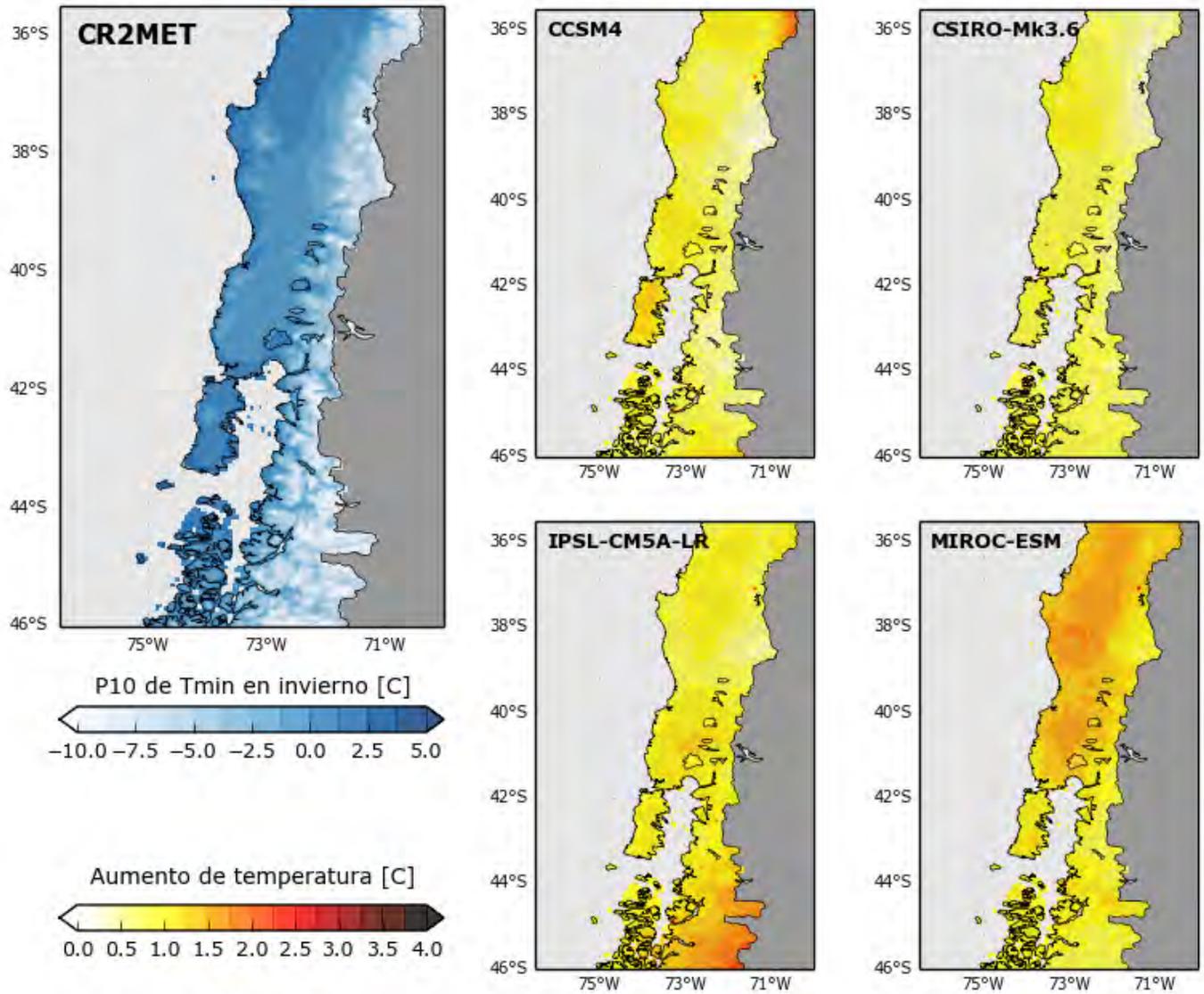


Figura 4.29: Cambios proyectados en el percentil 10% de temperatura mínima en invierno (junio a agosto) hacia 2030-2060, respecto del periodo 1985-2015. Panel a la izquierda muestra la climatología de esta variable en el periodo de referencia (1985-2015), igual en todos los modelos ajustados.

## 5 IDENTIFICACIÓN DE CUENCAS EN RÉGIMEN NATURAL PARA LA ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO

Debido a que el modelo VIC no incorpora intervención antrópica, es necesario comparar las estimaciones del caudal obtenido a partir de dicho modelo con estaciones fluviométricas asociadas a cuencas con bajos niveles de intervención. Debido a que se utilizan estaciones fluviométricas DGA para evaluar las salidas de caudal del modelo VIC, se requiere delimitar la cuenca para cada estación según la definición natural de las mismas, lo que no necesariamente obedece a límites regionales o internacionales.

### 5.1 IDENTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE CUENCAS

La delimitación de cuencas se basa en el trabajo de Álvarez-Garretón *et al.* (2018), quienes obtuvieron las coordenadas de las estaciones fluviométricas DGA y definieron el área de la cuenca basándose en: (1) la ubicación del punto de salida de la cuenca, que corresponde a las estaciones fluviométricas DGA, y (2) la información de modelos de elevación digital de 30 m de resolución horizontal, provenientes de ASTER-GDEM. Cada cuenca quedó definida por el punto de salida y el área aportante, obtenida de manera automatizada mediante el software QGIS y el programa GRASS (ambos softwares de libre acceso). Una de las complejidades que Álvarez-Garretón *et al.* (2018) identificaron es que las coordenadas de las estaciones no tienen la precisión suficiente para identificar el punto de salida de una cuenca, por lo que revisaron información adicional, incluyendo el nombre de la estación, mapas de carreteras o imágenes de Google Earth.

Recientemente, la Dirección General de Aguas ha actualizado la lista de cuencas hidrográficas nacionales en el estudio DGA (2014b), realizado por CIREN. Estas cuencas, denominadas DARH<sup>11</sup>, siguen criterios hidrológicos y modifican la definición de cuencas BNA vigentes hasta antes de esa fecha. Esta nueva clasificación depende principalmente de la red hidrográfica, y no necesariamente de la ubicación de estaciones fluviométricas, por lo que presenta una cobertura espacial mayor a la planteada por Álvarez-Garretón *et al.* (2018). Las cuencas DARH que conforman la zona de estudio se presentan en la Figura 5.1.

### 5.2 CARACTERIZACIÓN DE CUENCAS

Con el fin de caracterizar adecuadamente las cuencas, se utilizó la base de datos CAMELS-CL (Álvarez-Garretón *et al.* 2018), desde donde se obtiene la meteorología y los atributos de 516 cuencas de Chile continental definidas por estaciones fluviométricas DGA. De estas cuencas, 247 se encuentran en las macro zonas Sur y Austral.

La base de datos CAMELS-CL se encuentra disponible a través de la página web del Centro de Investigación del Clima y Resiliencia<sup>12</sup>, y contiene series de tiempo de variables hidrometeorológicas agregadas a la escala de cuenca, incluyendo:

---

<sup>11</sup> DARH. Departamento de Administración de Recursos Hídricos

<sup>12</sup> <http://camels.cr2.cl/>

- Precipitación diaria, derivada del estudio DGA (2017)
- Temperaturas extremas y media diarias; derivadas del estudio DGA (2017)
- Evapotranspiración potencial diaria y acumulada cada 8 días, estimadas mediante el método de Hargreaves y los productos MOD16A, y
- Equivalente en agua de nieve (SWE, por sus siglas en inglés), obtenida del reanálisis de nieve de Cortés y Margulis (2017).

Por otra parte, la base de datos CAMELS-CL incluye atributos climáticos, topográficos, hidrológicos, geológicos, de uso de suelos y grado de intervención de cada cuenca. A continuación, se detallan brevemente algunos de estos atributos:

- Topografía: se incluyen en esta categoría el área, elevación mínima, media, mediana y máxima, además de la pendiente media.
- Geología: Las características geológicas se obtuvieron de Glim (Global Lithological Map database) e incluyen la primera y segunda clase geológica más frecuente.
- Uso de suelo: Se obtiene a partir de la información de Zhao *et al.* (2016). Se define una categoría de uso nacional para todo el territorio nacional a una resolución horizontal de 30 metros, y es la que se considera como fuente de información en este trabajo.
- Glaciares: Se usa la última versión (v6) de Randolph Glacier Inventory<sup>13</sup>, el que contiene un inventario global de glaciares para 19 zonas del mundo (RGI Consortium, 2017), consistente en archivos vectoriales que definen cada glaciar. En el caso del presente estudio, se recurre al Inventario de Glaciares de la DGA por el mayor nivel de detalle e información que presenta.
- Evapotranspiración Potencial: Se dispone de dos estimaciones para esta variable, obtenidas a partir de:
  - i. La fórmula de Hargreaves, que abarca mayor cobertura temporal (1979-2016), pero con menor resolución espacial (0,05° x 0,05°).
  - ii. El producto MOD16 (Mu *et al.*, 2005), que sólo se encuentra disponible desde el año 2000, pero posee una resolución espacial más fina (1 x 1 km<sup>2</sup>).
- Equivalente en Agua de Nieve (SWE por sus siglas en inglés): El monto de SWE se encuentra agregado a la escala de cuenca y a una resolución temporal diaria. Los montos se obtienen de Cortés y Margulis (2017), quienes estimaron el valor de SWE para los Andes chilenos centrales a una resolución horizontal de 180 m.
- Derechos de Aguas: Se incorpora el grado de intervención humana, procesando información de derechos de agua de la base de datos de la DGA.
- Índices climáticos: Se presentan índices como la precipitación media, la evapotranspiración potencial y la estacionalidad de la precipitación, entre otros. Estos índices fueron calculados para el periodo 01/04/1990 - 31/03/2010.

---

<sup>13</sup> <https://www.glims.org/RGI/>

- Índices Hidrológicos: Estos índices entregan información sobre el comportamiento de las cuencas a partir de observaciones de caudal. CAMELS-CL incluye cuencas que tengan al menos un 85% de información dentro del período 01/04/1990 - 31/03/2010. Algunos índices hidrológicos incluidos son el coeficiente de escorrentía anual, la pendiente de la curva de duración, índice de flujo base, duración media de caudales altos, duración media de flujos bajos, entre otros.

En este estudio, la delimitación de cada cuenca hidrográfica se obtiene a partir de modelos de elevación digital (Alvarez-Garretón *et al.*, 2018), usando como puntos de salida las estaciones de control fluviométrico que la DGA administra. Si bien pueden ser similares con la división hidrográfica de las cuencas DARH (DGA, 2014) o administrativa del BNA, ambas delimitaciones no coinciden necesariamente.

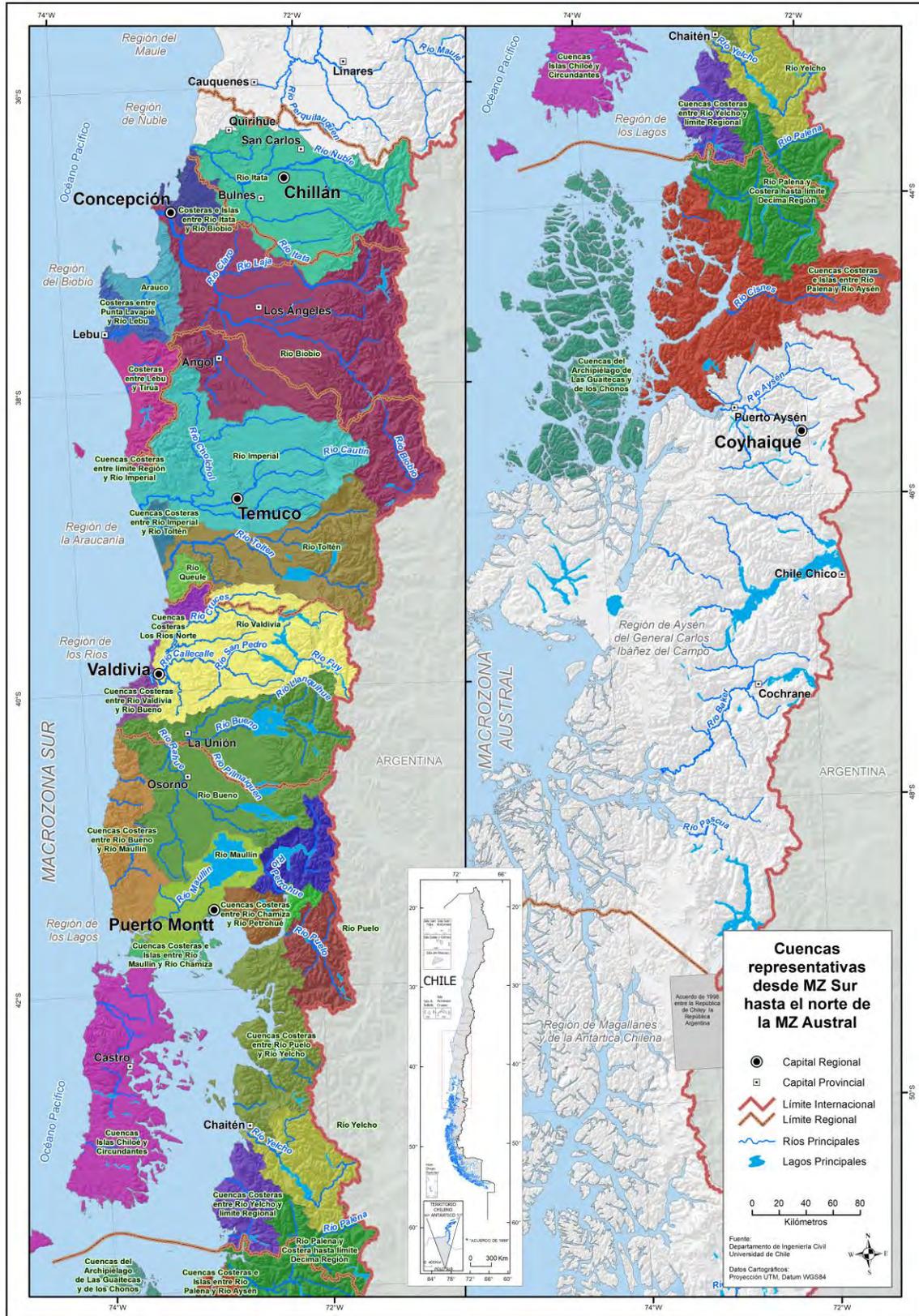


Figura 5.1: Identificación de cuencas de la zona de estudio para el presente proyecto.

### **5.3 CUENCAS EN RÉGIMEN NATURAL**

La selección de cuencas en régimen natural para calibrar el modelo VIC se hizo mediante tres filtros. El primero de ellos incluye los siguientes aspectos: (1) que la suma de los derechos consuntivos superficiales sea menor al 5% del caudal medio anual registrado en la estación fluviométrica que define la cuenca hidrográfica (si no existen derechos, se cumple de todas formas este criterio), (2) que no existan embalses dentro de la cuenca, y (3) un criterio adicional exclusivo para la calibración: que tengan al menos cinco años de información fluviométrica. Luego de aplicar el primer filtro (derechos consuntivos), se debe corroborar que (i) las cuencas que tengan derechos no consuntivos asignados no se encuentran en ejercicio, y (2) que existan bocatomas importantes, pero que la restitución se encuentre aguas arriba de la estación fluviométrica que define la cuenca. En ambos casos, se realiza una inspección visual de los derechos no consuntivos mediante el programa Google Earth para verificar la existencia de bocatomas y restituciones, especialmente de centrales hidroeléctricas de pasada.

Con los criterios anteriores, se identifican 78 cuencas en régimen natural o con baja intervención (ver Figura 7.2) entre la región de Ñuble y la cuenca del río Cisnes, en la Región de Aysén. De estas cuencas, 25 se encuentran anidadas (es decir, están contenidas completamente en otra cuenca con información fluviométrica).

### **5.4 CONCLUSIONES CAPÍTULO V**

De las 78 cuencas en régimen natural definidas según los criterios anteriormente descritos, se tiene que estas ocupan aproximadamente el 28% de la superficie de toda la zona de estudio. Esto quiere decir, que, si se logra una modelación hidrológica eficiente, se tendrá mayor certidumbre con el balance hídrico en estas cuencas, quedando el 72% restante como una estimación derivada de la metodología de regionalización. Lo anterior sugiere incrementar el número de estaciones fluviométricas en lugares con mínima intervención humana, con el fin de mejorar las estimaciones del balance hídrico en futuros estudios.

## 6 ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO PARA LAS CUENCAS EN RÉGIMEN NATURAL DE LAS MACROZONAS SUR Y PARTE NORTE DE LA ZONA AUSTRAL

La modelación hidrológica considera las 78 cuencas en régimen natural (con y sin lagos). Los parámetros del modelo VIC se calibran para cada cuenca adoptando como función objetivo el índice KGE. Adicionalmente, se evalúa el índice NSE en función de los parámetros resultantes del proceso de calibración utilizando KGE. Los índices de eficiencia se encuentran detallados en el Anexo A. A modo de referencia, estos índices pueden tener valores desde  $-\infty$  a 1, siendo 1 el valor óptimo que representa una calibración perfecta en ambos casos (KGE y NSE).

En este estudio, no se realizó relleno de caudales, ya que esto podría incorporar incertidumbre en el proceso de calibración. Con el fin de utilizar un período de calibración similar para todas las cuencas, se consideran los años disponibles con registros fluviométricos dentro del período 1990-2010.

### 6.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS

Para el proceso de calibración de las cuencas definidas en régimen natural en el capítulo 5 (ver Figura 7.2 ), se comienza por un análisis de sensibilidad en las mismas, donde se busca obtener un conjunto de parámetros de calibración basado no sólo en la experiencia del equipo de trabajo, sino que también en la influencia de estos parámetros en las distintas funciones objetivo. Para esto, se utiliza DELSA (*Distributed Evaluation of Local Sensitivity Analysis*; Rakovec et al., 2014) en las cuencas en régimen natural, variando un total de 34 parámetros y considerando 5 funciones objetivo asociadas a distintos índices hidrológicos (DGA,2017). Es importante destacar que, para algunos parámetros, se consideró la sensibilidad del parámetro en sí, mientras que en otros casos se analizó la sensibilidad del multiplicador espacial del parámetro en caso de tener patrones variables en el espacio o constantes.

Los resultados de este proceso se presentan en la Figura 6.1, donde se observa que los parámetros más sensibles – i.e., los que entregan un mayor índice de sensibilidad – corresponden a *binf*, *depth1*, *depth2*, *depth3*, *exp1*, *exp2*, y en menor escala *Ws*, *Ds*, *albaar*, *albtha* y *newalb*. Dada la experiencia del equipo de trabajo, se agregan la rugosidad de la nieve *r<sub>snow</sub>*, *Dsmax* y *ksat* además de los parámetros ya mencionados. En la Tabla 6.1 se presenta una breve descripción de cada uno de los parámetros antes mencionados.

Tabla 6.1 Parámetros e calibración seleccionados en base al análisis de sensibilidad

Variable	Unidades	Rango	Descripción
<i>binf</i>	N/A	]0,1]	Parámetro asociado a la curva de infiltración
<i>Ds</i>	fracción	[0,1]	Fracción del $Ds_{max}$ donde comienza el caudal base no lineal
$Ds_{max}$	mm/día	[0,∞]	Velocidad máxima de caudal base
$W_s$	fracción	[0,1]	Fracción de humedad el suelo donde ocurre el caudal base no lineal
<i>exp</i>	N/A	[3, ∞]	Exponente en la ecuación de Cambell para conductividad hidráulica



## 6.2 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA

### 6.2.1 RESULTADOS EN CUENCAS CON LAGOS SEGÚN METODOLOGÍA PROPUESTA

En esta sección, se comparan los resultados de calibraciones obtenidas con las siguientes configuraciones: 1) el lago como un cuerpo de agua (caso base en el que no se considera la metodología de lago, donde no existe la opción de variación del volumen del mismo, sin embargo, se considera que la cobertura de suelo es de agua, con lo que existe exclusivamente evaporación), 2) la metodología de lago planteada en el acápite 2.3.2, considerando una calibración de parámetros de suelo del lago y el tiempo de retardo. La metodología se aplica en la cuenca del río Curaco en Colico, en la que se encuentra el lago Colico, y Huahum en la Frontera, en la que se encuentra el lago Lacar (ver Tabla 6.2)

Tabla 6.2 Información geomorfológica de la cuenca del río Curaco en Colico y Huahum en la frontera.

Variable	Curaco en Cólico	Huahum en la Frontera <sup>14</sup>
Área Cuenca [km <sup>2</sup> ]	403,3	1029
Área Lago [km <sup>2</sup> ]	54,75	55
Perímetro [km]	50.593	58
Largo Desagüe [m]	170	80
Relación Largo/Perímetro [%]	0,34	0,14

En la Figura 6.2 se presenta la ubicación espacial de las cuencas estudiadas, encontrándose la cuenca del río Curaco en Cólico en la región de la Araucanía y la cuenca del río Huahum en la región de los Ríos. Las cuencas calibradas y que contienen lagos se identifican en la Tabla 6.5.

---

<sup>14</sup> Esta cuenca posee una superficie importante en territorio Argentino.



Figura 6.2 Ubicación espacial de las cuencas en estudio.

En la Tabla 6.3, se presentan los valores de KGE y eficiencia de Nash-Sutcliffe para las dos metodologías señaladas, observándose que no existe una diferencia considerable entre ellas. Por otro lado, en la Figura 6.3 se presentan series de tiempo (a escalas diaria, mensual y anual) de caudales observados y simulados a partir de la metodología de cuerpo de agua en la cuenca en estudio, donde se observa que, en general, la temporalidad de los caudales está bien representada. Sin embargo, se observa una clara subestimación en los caudales, que puede tener su origen en: 1) sub-estimación de precipitación, 2) falta de incorporación de flujos subterráneos y/o 3) sobre-estimación en las tasas de evaporación.

Tabla 6.3 Criterios de eficiencia asociados a las distintas metodologías utilizadas en el proceso de calibración.

BNA estación fluviométrica	Índice	9405001	10100006
<b>Nombre Lago</b>		<b>Colico</b>	<b>Lacar</b>
<b>Cuerpo de Agua</b>	KGE	0,31	0,64
	NSE	0,29	0,48
<b>Metodología propuesta</b>	KGE	0,27	0,53
	NSE	0,36	0,19

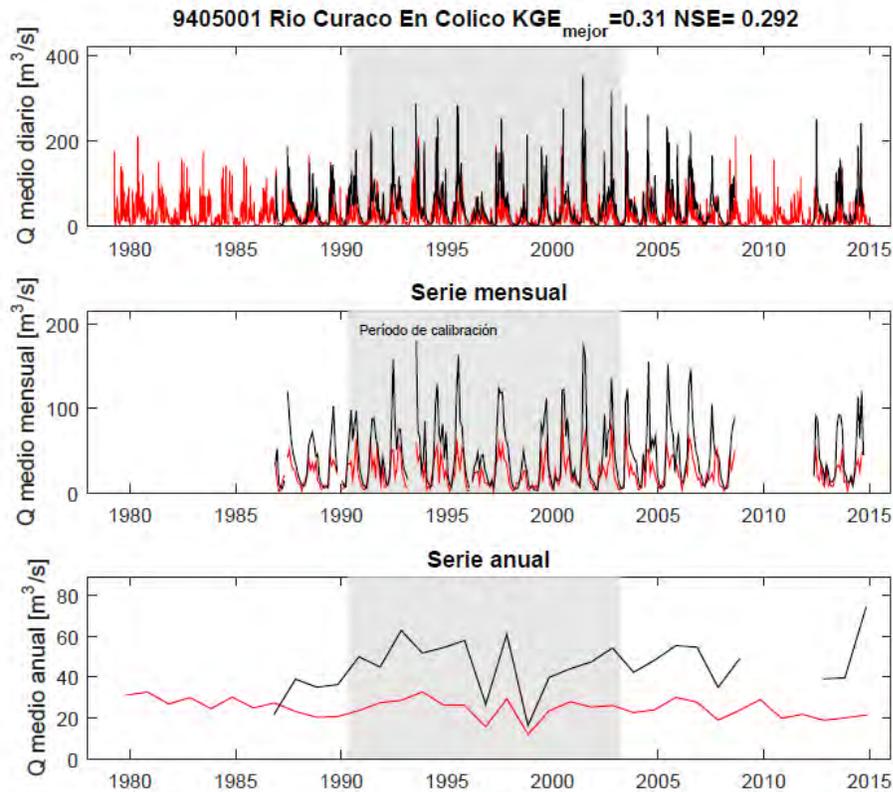


Figura 6.3: Serie temporal de caudales simulados (rojo) y observados (negro) en la cuenca del río Curaco en Colico.

Es importante señalar que la delimitación de cuencas se realiza en base a criterios hidrológicos, sin considerar delimitaciones geopolíticas asociadas.

Debido a los resultados de la metodología de cuerpo de agua presentados, y considerando que 1) la aplicación de esta metodología requiere de un mayor tiempo computacional, 2) los resultados de las calibraciones en cuencas con presencia de lagos mediante la metodología de calibración original se consideran aceptables, y 3) las cuencas con presencia de lagos calibradas no serán consideradas en el proceso de regionalización, es que se desestima la opción de utilizar la metodología de lagos, utilizando sencillamente una calibración tradicional.

De esta forma, se intentó calibrar las cuencas que poseen lagos en la zona de estudio, pudiendo existir combinación de lagos en serie y en paralelo, totalizando 10 cuencas (ver Tabla 6.6 y Figura 7.2). Dadas sus características específicas, los parámetros de dichas cuencas no formarán parte del set de parámetros a transferir a otras cuencas.

### 6.2.2 ESTIMACIÓN DEL APORTE GLACIAR

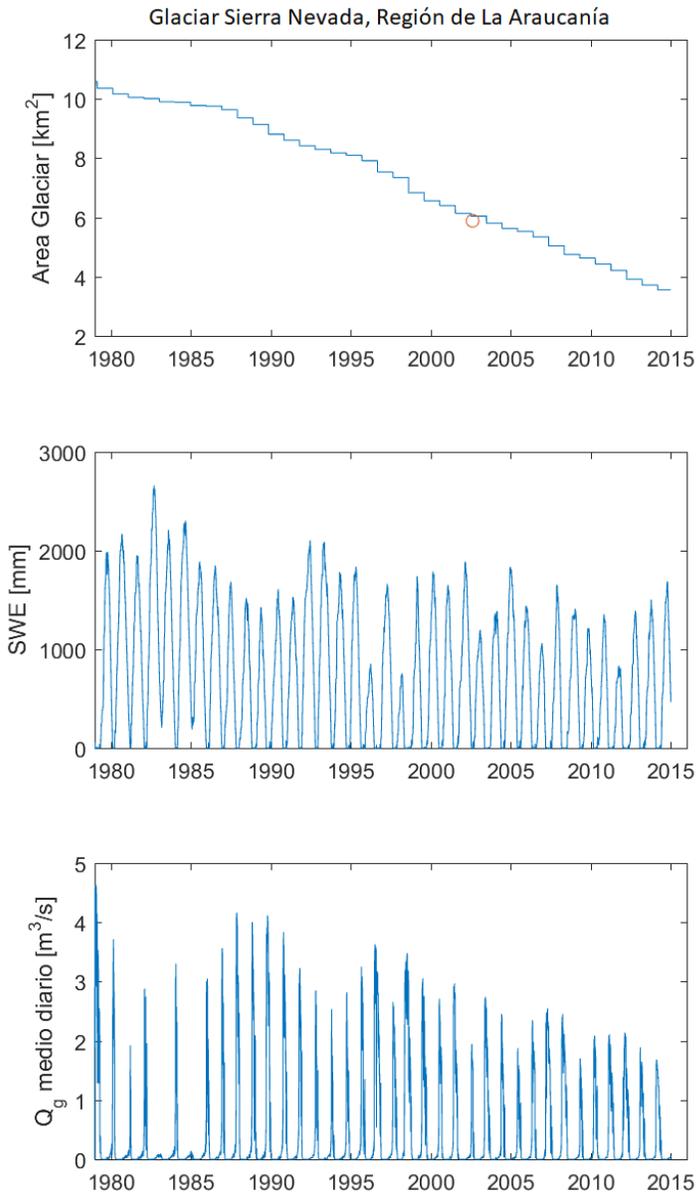
El aporte glaciar se estima según la metodología propuesta por Baraer *et al.* (2012)<sup>15</sup> para cada uno de los glaciares del Inventario Oficial (DGA, 2011). En el Anexo E se encuentra la estimación de cada masa de hielo, donde el nombre de cada archivo corresponde al código del glaciar. A modo de ejemplo, la Figura

<sup>15</sup> Procedimiento detallado en el Anexo A

6.4 muestra dos variables de estado para el glaciar Sierra Nevada (Región de La Araucanía): (1) área glaciar y (2) SWE del manto nival sobre el glaciar. En el panel superior, el círculo rojo representa el área glaciar observada. En el panel inferior, se aprecia el caudal proveniente exclusivamente de la masa de hielo,  $Q_g$  (no incluye el aporte de la nieve sobre el glaciar). Se aprecia que, en los años donde existe nieve remanente sobre el glaciar, la metodología reduce el aporte desde la masa de hielo (por ejemplo, los años hidrológicos 82-83 y 84-85). Por otro lado, el balance de masa y energía produce un retroceso del glaciar debido a que prácticamente todos los años la nieve sobre el glaciar se derrite completamente, lo que produce un aporte desde la masa de hielo. Hay que considerar que, a pesar que exista nieve sobre el glaciar, puede existir derretimiento desde la zona sin nieve (variable de estado  $S_{free}$  en Anexo A). En conclusión, para este cuerpo glaciar se aprecia una constante disminución del área y una fluctuación anual en su contribución que presenta una importante variabilidad inter-anual.

Para validar la metodología de estimación del aporte glaciar, se estima el área total para varios años mediante imágenes Landsat usando el índice NDSI en algunos glaciares. Algunos de ellos se presentan en la Figura 6.5, donde se muestran tres casos posibles: (i) estimación de área glaciar mediante imágenes Landsat altamente variables en el tiempo (glaciar Echaurren), (ii) datos Landsat consistentes con el Inventario oficial de la DGA y con la metodología propuesta (glaciar Mocho Choshuenco), y (iii) imágenes Landsat con una variación de área razonable y estimación mediante metodología que no se ajusta bien a la tendencia temporal. Los tres casos presentados se explican por diferentes causas:

- i. El uso del índice NDSI no permite distinguir entre nieve o hielo, por lo que las imágenes satelitales utilizadas corresponden a los meses de febrero y marzo, meses en los cuales es posible suponer que toda el área cubierta identificada por el índice NDSI corresponde a hielo. Sin embargo, puede ocurrir que en algunos años muy húmedos persistan áreas cubiertas por nieve al final de la temporada, por lo que la estimación de área glaciar incluirá además la superficie cubierta por el remanente de nieve, generando incongruencia entre las imágenes satelitales de distintos años.
- ii. El uso del índice NDSI no permite identificar de manera remota la presencia de glaciares cubiertos y rocosos, mientras que la estimación del inventario DGA considera todos los cuerpos glaciales.
- iii. La mayoría de los glaciares descubiertos poseen además una fracción cubierta, la que resulta muy difícil de estimar incluso in situ, por lo que es posible que hayan superficies glaciales no identificadas en el inventario DGA.



**Figura 6.4:** Estimación del caudal proveniente del glaciar Sierra Nevada (Región de la Araucanía). Panel Superior: Estimación del área glacial. El punto rojo muestra la observación disponible del área glacial. Panel central: SWE del manto nival sobre el glaciar. Panel inferior: Estimación del caudal proveniente de la masa de hielo (no incluye el aporte del manto de nieve sobre el glaciar ni la precipitación líquida).

Una vez estimados los aportes glaciales para cada uno de los cuerpos de hielo del Inventario de glaciares de la DGA, es posible estimar la importancia del derretimiento glacial en cuencas en régimen natural con presencia de cuerpos de hielo. En la Figura 6.6 se muestra el aporte promedio del caudal glacial medio diario respecto del caudal total medio diario durante los meses de verano (diciembre, enero y febrero) para el período abr/1985 a mar/2015. Adicionalmente, se muestra el mayor aporte a nivel diario para los meses de verano y el mismo período de análisis. Se evidencia que, en términos medios, el aporte glacial presenta una importancia heterogénea entre las cuencas analizadas (34 en total) y no es mayor al

10% del caudal medio de los meses de verano. No obstante, considerando el análisis a nivel diario, se aprecia la importancia del glaciar en algunos días correspondientes a años secos, donde la importancia relativa supera, para varias cuencas, más del 50% del caudal total. Esto muestra la importancia de los glaciares para mitigar el impacto de la disminución de la escorrentía en años con bajas precipitaciones.

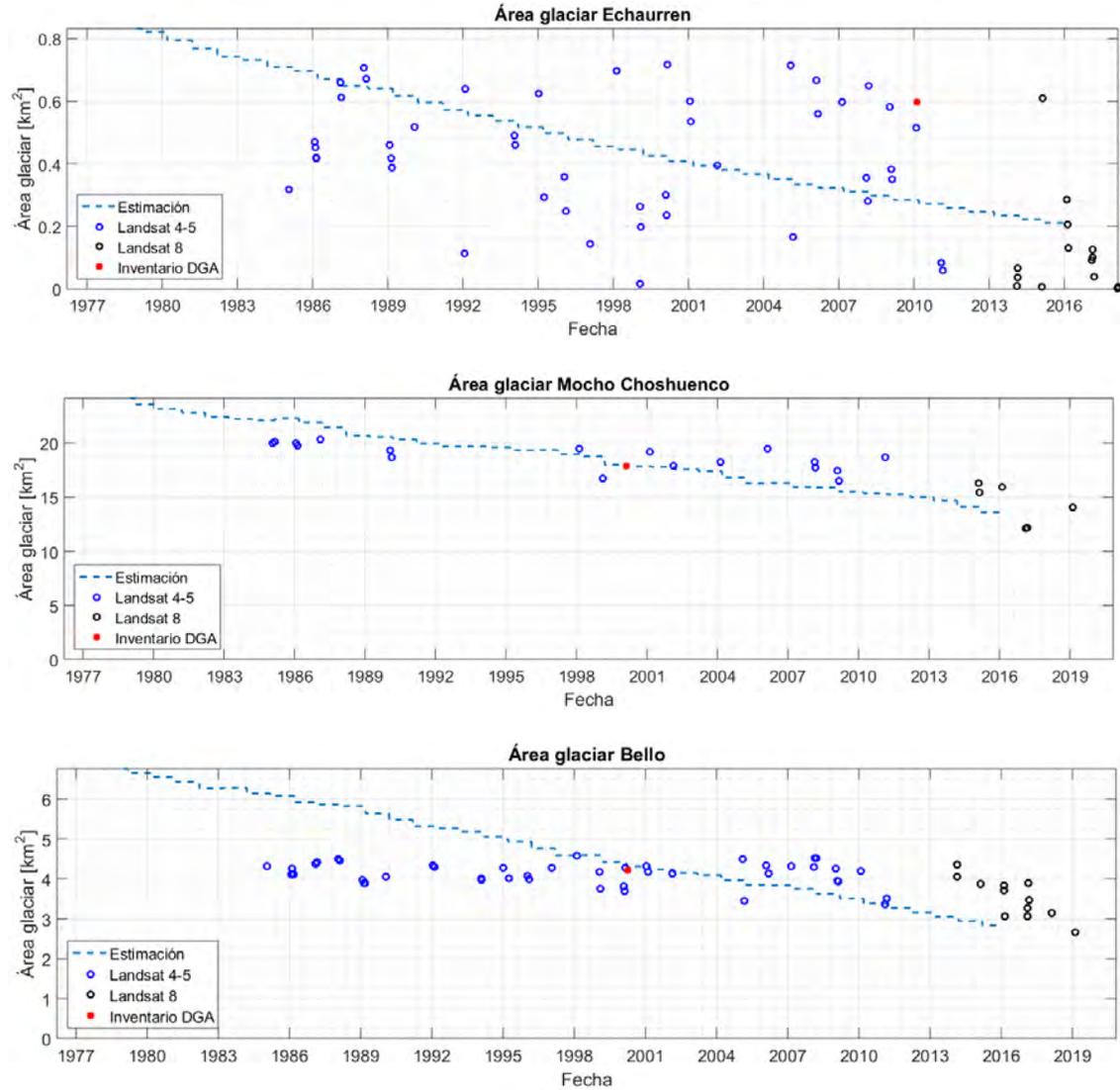


Figura 6.5: Estimación del área glaciar mediante imágenes Landsat (puntos azules y negros), en rojo está la estimación del Inventario Oficial de Glaciares de la DGA (2014) y en línea punteada se encuentra la estimación mediante la metodología propuesta.

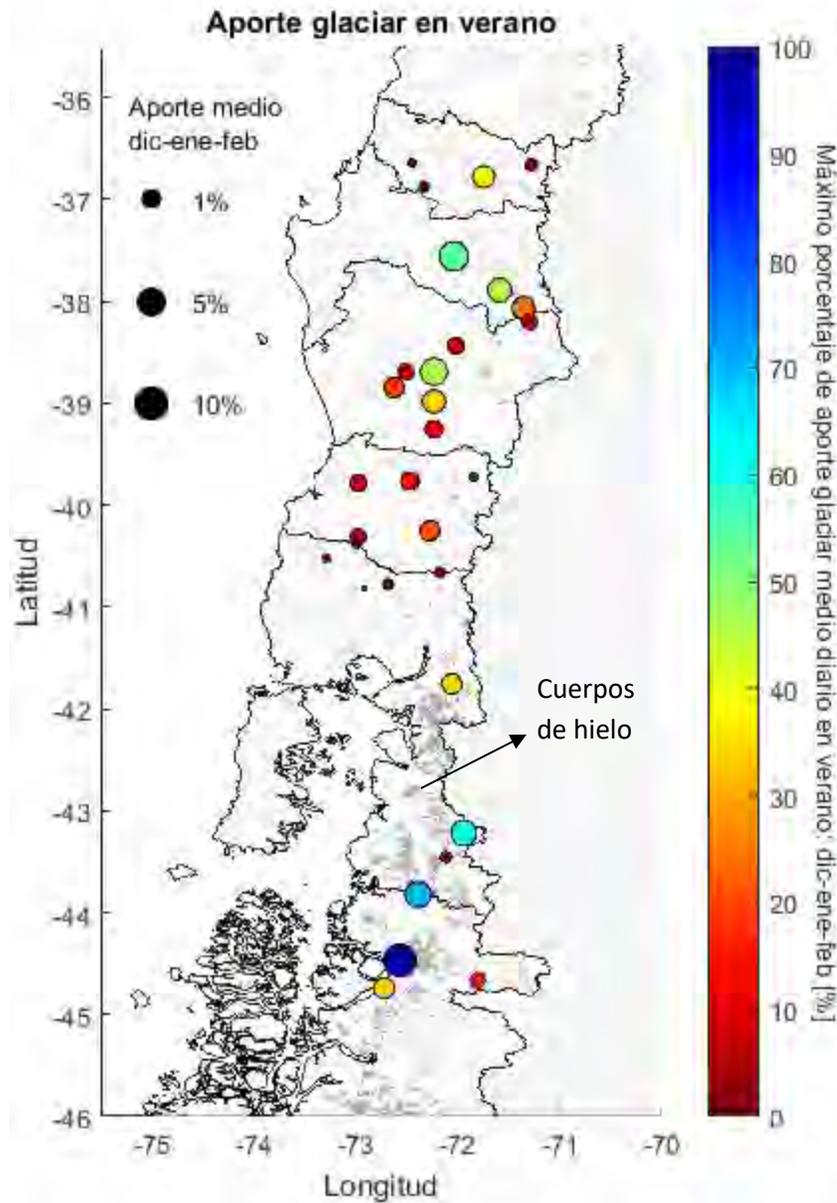


Figura 6.6: Aporte medio del caudal glacial a la escorrentía total (tamaño del círculo) en cuencas calibradas y con presencia de cuerpos de hielo según Inventario DGA. Se presenta además el mayor porcentaje de aporte del caudal glacial medio diario al caudal medio diario total durante los meses de verano (dic-ene-feb). Período de análisis: abr/1985 – mar/2015.

Las estaciones fluviométricas que definen las cuencas calibradas con presencia de cuerpos de hielo se presenta en la Tabla 6.4. Además, se presentan los resultados detallados, donde la contribución porcentual de cada glaciar a la escorrentía total se calcula como:

$$\text{Aporte glacial} [\%] = 100 \cdot \frac{Q_g}{Q_g + Q_{VIC}}$$

Donde  $Q_g$  corresponde al caudal glacial proveniente exclusivamente del derretimiento de hielo (es decir, no incorpora la nieve sobre el glaciar) y  $Q_{VIC}$  corresponde al caudal mediante la simulación según VIC, que no considera el aporte glacial.

Tabla 6.4: Estaciones fluviométricas calibradas y con presencia de cuerpos de hielo.

Código BNA	Latitud (°)	Longitud (°)	Nombre estación fluviométrica	Máximo aporte en verano (dic-ene-feb) [%]	Aporte promedio en meses de verano (dic-ene-feb) [%]
8135002	-36,65	-72,45	Río Itata En Balsa Nueva Aldea	1,2	0,1
8104001	-36,6653	-71,2739	Río Sauces Antes Junta Con Ñuble	2,4	0,2
8117004	-36,7867	-71,7486	Río Chillán En Esperanza	36,2	2,1
8132001	-36,8667	-72,3333	Río Diguillín En Longitudinal	2,9	0,1
8323002	-37,55	-72,0333	Río Duqueco En Villucura	54,4	6,3
8313000	-37,8986	-71,5806	Río Pangué En Captación	46,7	2,9
8308000	-38,0661	-71,3497	Río Lomín En Puente La Junta	23,5	2,3
8307002	-38,2008	-71,2989	Río Bio-Bio En Llanquén	7,0	0,5
9123001	-38,4303	-72,0106	Río Cautín En Rari-Ruca	9,0	0,7
9131001	-38,6833	-72,2333	Río Quepe En Vilcún	45,5	4,4
9129002	-38,6867	-72,5028	Río Cautín En Cajón	6,6	0,5
9135001	-38,85	-72,6167	Río Quepe En Quepe	19,8	1,6
9404001	-38,9833	-72,2333	Río Allipén En Los Laureles	33,5	2,4
9420001	-39,2667	-72,2333	Río Toltén En Villarrica	11,7	0,9
10102001	-39,7267	-71,8497	Río Liquine En Liquine	2,1	0,1
10111001	-39,7667	-72,475	Río San Pedro En Desagüe Lago Riñihue	14,1	1,0
10122001	-39,775	-72,9833	Río Calle Calle En Balsa San Javier	11,2	0,8
10304001	-40,25	-72,2667	Río Calcarrupe En Desembocadura	21,3	1,6
10311001	-40,3167	-72,9667	Río Bueno En Bueno	4,8	0,5
10328001	-40,3842	-73,0022	Río Pilmaiquén En San Pablo	0,3	0,0
10364001	-40,5167	-73,2833	Río Rahue En Forrahue	0,3	0,0
10322003	-40,6603	-72,1772	Río Gol Gol En Puente N.º 2	2,1	0,1
10340001	-40,7889	-72,6889	Río Rahue En Desagüe Lago Rupanco	0,8	0,1
10343002	-40,8206	-72,9133	Río Coihueco Antes Junta Río Rahue	0,2	0,0
10503001	-41,7219	-72,0139	Río Manso Antes Junta Río Puelo	2,0	0,1
10514001	-41,7569	-72,0525	Río Puelo Antes Junta Con Manso	33,8	1,6
10702002	-43,1742	-71,7544	Río Futaleufú En La Frontera	0,1	0,0
10701002	-43,2094	-71,9369	Río Espolón En Desagüe Lago Espolón	62,4	3,5
10704002	-43,4492	-72,1075	Río Futaleufú Ante Junta Río Malito	2,5	0,1
11040001	-43,8189	-72,3833	Río Palena Bajo Junta Rosselot	71,6	4,0
11130001	-44,4625	-72,5583	Río Ventisquero En Carretera Austral	97,8	9,3
11143001	-44,6592	-71,8083	Río Cisnes Antes Junta Río Moro	18,4	0,5

Código BNA	Latitud (°)	Longitud (°)	Nombre estación fluviométrica	Máximo aporte en verano (dic-ene-feb) [%]	Aporte promedio en meses de verano (dic-ene-feb) [%]
11143002	-44,75	-72,7167	Río Moro Antes Junta Río Cisnes	12,2	0,2
11147001	-44,75	-72,7167	Río Cisnes En Puerto Cisnes	33,7	1,7

### 6.2.3 RESULTADOS EN CUENCAS CALIBRADAS

En la Figura 6.7 se presentan los índices de eficiencia KGE (lado izquierdo) y los valores correspondientes de NSE (lado derecho), calculados en base a las series diarias de caudal observado y simulado para las 78 cuencas en régimen natural. Se debe destacar que el índice KGE es la función objetivo del proceso de calibración y que los aportes glaciares están incorporados para cada una de las cuencas. Los parámetros incluidos en el proceso de calibración están relacionados con los procesos de infiltración, generación de flujo base, cambios en el albedo de la nieve, percolación y profundidad de las distintas capas de suelo (tres en total).

La comparación de la modelación de SWE en cuencas en donde se contaba con el reanálisis de nieve de Cortés y Margulis (2017), se encuentra en el Anexo D.

Es importante mencionar que, a pesar de que muchas cuencas calibradas si contienen lagos, algunos no fue posible incluirlos dentro de una cuenca. Ese es el caso de los lagos Llanquihue, Todos los Santos, Yelcho, Verde y Rosselot. En consecuencia, los resultados de la estimación del balance hídrico en estos cuerpos de agua son inciertos y los resultados deben usarse con precaución. Del mismo modo, los valores de NSE para aquellas cuencas ubicadas al sur de la latitud 42°S son deficientes, por lo que dicha zona tendrá mayores incertidumbres en la estimación del balance hídrico que aquella al norte de la latitud 42°S, en parte, porque existe una mayor cantidad de estaciones fluviométricas usadas (más cuencas calibradas satisfactoriamente) y mas estaciones meteorológicas consideradas en la construcción del producto meteorológico, particularmente precipitación y temperatura.

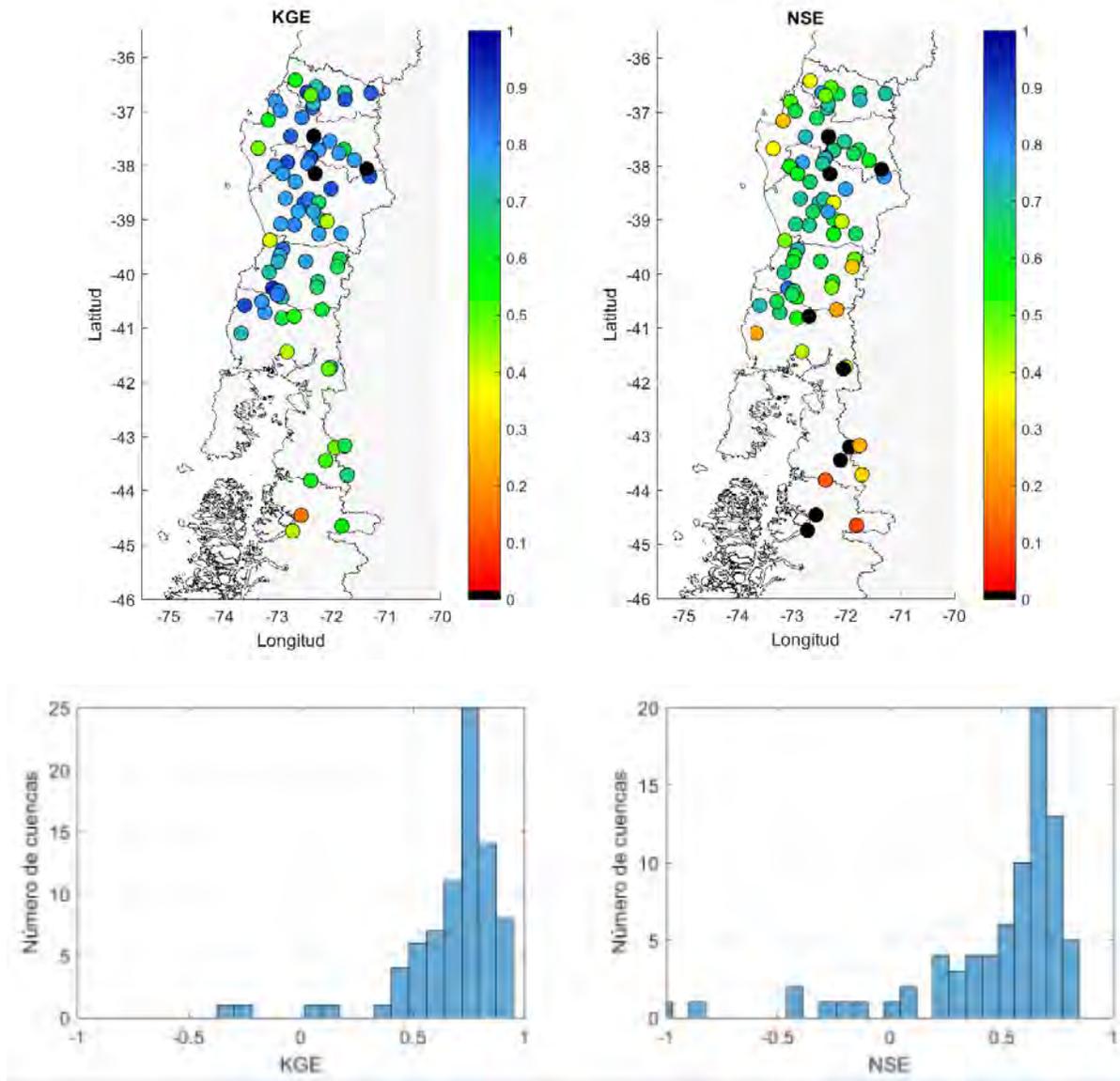
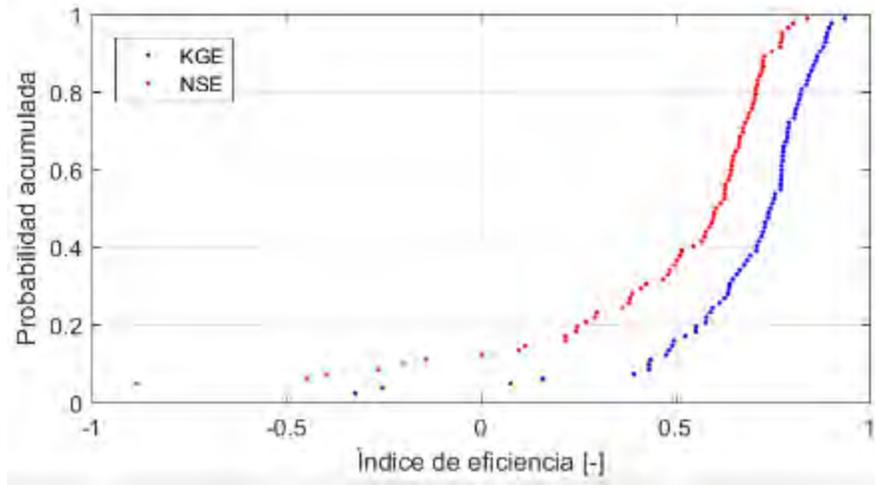


Figura 6.7: (Panel superior) Mapa de índice KGE calibrado y el valor de NSE correspondiente para las 78 cuencas en régimen natural. (Panel Inferior) Histogramas con los valores de KGE y NSE respectivos.

Los resultados de la Figura 6.7 indican que aproximadamente el 90% de las cuencas calibradas presenta un KGE mayor a 0,5, mientras que alrededor del 70% de las cuencas presenta un NSE mayor a 0,5. Por otro lado, sólo tres cuencas presentan un KGE menor que 0, mientras que 6 cuencas presentan un NSE menor que 0. Dichas cuencas tienen registros muy cortos de caudal, o áreas aportantes muy pequeñas (no todas se aprecian en la Figura 6.8, pues el eje de las abscisas se ha delimitado al rango -1 a 1).



**Figura 6.8: Probabilidad acumulada de los criterios de eficiencia en las 78 cuencas calibradas.**

Adicionalmente a los valores de los índices de eficiencia, se busca evaluar otras componentes del modelo. Para evaluar las estimaciones de recarga, en la Figura 6.9 se ilustra la comparación entre las metodologías propuestas MoMLRr y RORA (ver acápite 3.2) y la estimación según el modelo VIC, donde la línea punteada corresponde a una relación perfectamente lineal. Se aprecia que la metodología RORA es muy similar a las estimaciones de VIC, mientras que MoMLRr es la metodología que entrega menores montos anuales.

El supuesto utilizado para la comparación es que el flujo de agua desde la segunda a la tercera capa de suelo de cada pixel de VIC, agregado a escala de cuenca, representaría la recarga hacia los acuíferos. Este supuesto, sin embargo, no necesariamente se cumple en la realidad, pues los acuíferos están interconectados y no todas las celdas contribuyen a la recarga. Por lo anterior esta comparación es netamente referencial.

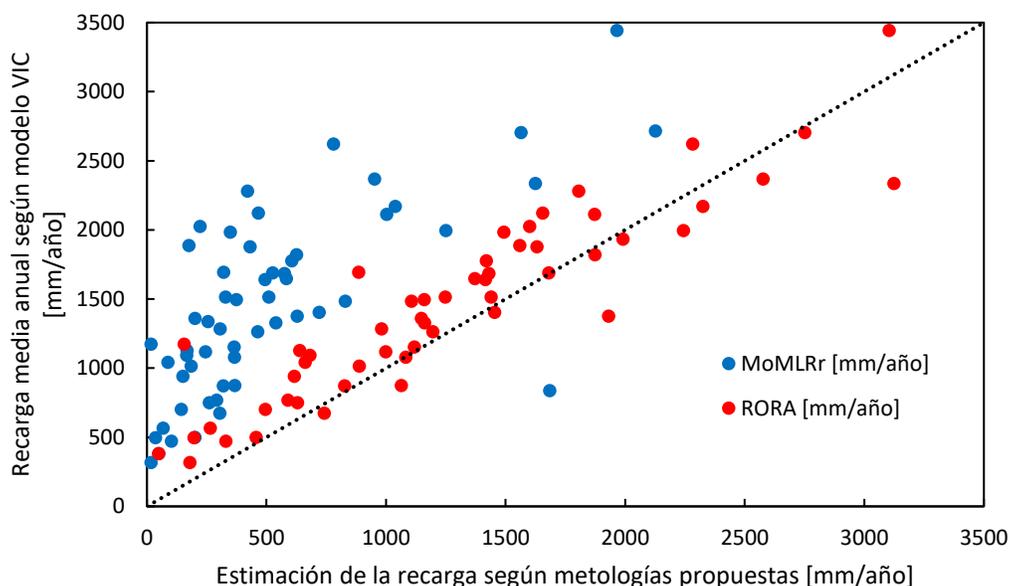


Figura 6.9: Comparación entre las recargas obtenidas con las metodologías propuestas (MoMLRr y RORA) y la estimación mediante el modelo VIC.

El detalle con los índices de eficiencia, los montos de recarga y la presencia de lagos y glaciares para las cuencas calibradas, así como los métodos de estimación de recarga propuestos en el acápite 3.2, se muestra en la Tabla 6.5 (se consideran solamente dos decimales para el área glacial, para ver la totalidad de cuencas con glaciares, revisar Tabla 6.4). Para las cuencas con lagos, se especifica en la Tabla 6.6 el nombre del lago y el área de cada uno de ellos. En ambas tablas el código BNA es el asociado a las estaciones fluviométricas que delimitan las cuencas en estudio. Adicionalmente, se identifican aquellas cuencas calibradas que contienen lagos.

Tabla 6.5: Resultados de caudal y recarga para las cuencas calibradas.

BNA	Nombre	Caudal		Recarga [mm/año]			Presencia	
		NSE	KGE	VIC	MoMLRr	RORA	Lagos	Área Glacial [km <sup>2</sup> ]
8104001	Río Sauces Antes Junta Con Ñuble	0,71	0,86	1639,8	494,2	1415,7		0,56
8112001	Río Niblinto Antes Canal Aliment. Emb. Coihueco	0,66	0,69	2025,9	222,8	1601,1		0,00
8117004	Río Chillán En Esperanza	0,72	0,86	2112,6	1002,8	1872,9		0,84
8117008	Río Quilmo En Camino A Yungay (Ca)	0,63	0,82	500,8	-	-		0,00
8118001	Río Changaral Camino A Portezuelo	0,5	0,71	564,8	67,6	264,7		0,00
8124001	Río Itata En General Cruz	0,71	0,84	1014,7	184,7	887,8		0,00
8132001	Río Diguillín En Longitudinal	0,7	0,74	1327,5	-	-		0,55
8134003	Río Larqui En Santa Cruz De Cuca	0,5	0,49	596,5	-	-		0,00

BNA	Nombre	Caudal		Recarga [mm/año]			Presencia	
		NSE	KGE	VIC	MoMLRr	RORA	Lagos	Área Glacial [km <sup>2</sup> ]
8135002	Río Itata En Balsa Nueva Aldea	0,78	0,9	940	150,9	616		0,55
8144001	Río Lonquén En Trehuaco	0,39	0,58	496,9	35,7	197,6		0,00
8220001	Río Andalién Camino A Penco	0,51	0,77	472,4	102,9	330,3		0,00
8307002	Río Biobío En Llanquén	0,79	0,89	1496,7	374,4	1160,5		6,01
8308000	Río Lomín En Puente La Junta	-4,17	-2,13	1061,8	-	-		4,66
8313000	Río Pangue En Captación	0,61	0,77	2170,5	1039	2324,9		2,01
8316002	Río Huequecura Aguas Arriba De Emb. Angostura	0,64	0,64	1932,2	-	1990,3		0,00
8317002	Río Lirquén En Cerro El Padre	0,65	0,77	1886,5	175,9	1559,2		0,00
8323002	Río Duqueco En Villucura	0,69	0,79	1688,8	525,6	1681,1		8,10
8324002	Estero Paillihue En Ex Longitudinal Sur	-4,95	0,08	840	-	-		0,00
8330001	Río Mulchén En Mulchén	0,8	0,9	1152,8	364,3	1118,6		0,00
8332001	Río Bureo En Mulchén	0,67	0,79	1878,6	431	1631,7		0,00
8342001	Río Renaico En Longitudinal	0,58	0,73	2122,9	466,5	1655		0,00
8343001	Río Mininco En Longitudinal	0,75	0,87	1117,3	244,9	998,4		0,00
8351001	Río Malleco En Collipulli	0,7	0,81	1984,2	348,5	1493,4		0,00
8356001	Río Rahue En Quebrada Culén	0,78	0,89	318,3	16,7	179,6		0,00
8362001	Río Nicodahue En Pichún	0,73	0,87	1079,7	365,7	1082,2		0,00
8366002	Estero Quilque En Los Ángeles	-1,04	-0,32	837,6	1684	-		0,00
8385001	Río Claro En Camino Yumbel-Estación	0,65	0,83	750,6	261,3	629,7		0,00
8393002	Estero Hualqui En Desembocadura	0,63	0,81	382,7	49,8	48,8		0,00
8430001	Río Laraquete En El Cajón	0,27	0,59	1328	539,2	1161,2		0,00
8720001	Río Lebu En Las Corrientes (En Los Álamos)	0,36	0,48	1337,9	255,6	-		0,00
9101001	Río Purén En Tranamán	0,52	0,72	871	319,7	827,2		0,00
9101002	Río Purén En Purén	0,57	0,79	873,8	367,3	1064,2		0,00
9102001	Río Lumaco En Lumaco	0,6	0,78	702,6	144	495,3		0,00
9104002	Río Dumo En Santa Ana	-0,88	-0,25	1173,9	16,8	155,9		0,00
9107001	Estero Chufquén En Chufquén	0,67	0,78	1042,6	88,5	661,3		0,00
9116001	Río Cholchol En Cholchol	0,71	0,78	827,1	-	-		0,00
9123001	Río Cautín En Rari-Ruca	0,77	0,89	2223,4	-	-		7,33
9127001	Río Muco En Puente Muco	0,71	0,84	1313,3	-	-		0,00
9129002	Río Cautín En Cajón	0,72	0,85	1648,4	583,9	1372,1		7,33
9131001	Río Quepe En Vilcún	0,38	0,66	2095,3	-	-		6,60
9134001	Río Huichahue En Faja 24000	0,77	0,76	1649	-	-		0,00
9135001	Río Quepe En Quepe	0,65	0,77	1514,9	510,7	1439,7		6,60
9404001	Río Allipén En Los Laureles	0,6	0,74	1995,6	1250,4	2243,8		21,76

BNA	Nombre	Caudal		Recarga [mm/año]			Presencia	
		NSE	KGE	VIC	MoMLRr	RORA	Lagos	Área Glacial [km <sup>2</sup> ]
9405001	Río Curaco En Colico	0,41	0,44	2241,6	-	-	Si	0,00
9416001	Río Liucura En Liucura	0,66	0,78	2367	952,2	2577,1		0,00
9420001	Río Toltén En Villarrica	0,59	0,77	2426,3	-	-	Si	21,72
9434001	Río Donguil En Gorbea	0,7	0,82	1359,8	200,9	1147,5		0,00
9436001	Río Mahuidanche En Santa Ana	0,67	0,77	1264,2	463,2	1196,3		0,00
10100002	Río Fui En Desagüe Lago Pirihueico	0,29	0,65	1872,2	-	-		0,00
10102001	Río Liquine En Liquine	0,49	0,64	2703,2	1564,4	2751,4		0,19
10111001	Río San Pedro En Desagüe Lago Ríñihue	0,64	0,75	2370,8	-	-	Si	23,82
10122001	Río Calle Calle En Balsa San Javier	0,62	0,75	2080,9	-	-	Si	23,82
10134001	Río Cruces En Rucaco	0,73	0,84	1514,4	328,9	1248,1		0,00
10137001	Río Inaque En Mafil	0,59	0,76	1285,1	306,5	980,9		0,00
10140001	Río Santo Domingo En Rinconada De Piedra	0,47	0,39	1375,6	628,8	1930,7		0,00
10142003	Río Futa En Tres Chiflones	0,69	0,72	1693,4	320,8	886,1		0,00
10304001	Río Calcurrupe En Desembocadura	0,48	0,67	2583,7	-	-	Si	10,90
10305001	Río Caunahue Camino A Llifén	0,63	0,68	2620,6	780,9	2282,1		0,00
10311001	Río Bueno En Bueno	0,66	0,81	2288,2	-	-	Si	12,60
10313001	Río Lollehue En La Unión	0,84	0,94	768,9	291,9	589,4		0,00
10322003	Río Gol Gol En Puente N°2	0,22	0,61	3444,1	1965,1	3104,6		0,41
10327001	Río Chirre Antes Junta Río Pilmaiquén	0,58	0,73	1685	575,9	1430,2		0,00
10328001	Río Pilmaiquén En San Pablo	0,64	0,82	2227,3	-	-	Si	0,58
10340001	Río Rahue En Desagüe Lago Rupanco	0,01	0,55	2341,3	-	-		0,69
10343002	Río Coihueco Antes Junta Río Rahue	0,55	0,64	1777,3	605,7	1419,1		0,02
10356001	Río Negro En Chahuilco	0,68	0,79	1092,4	165,9	681,5		0,00
10364001	Río Rahue En Forrahue	0,63	0,79	1391,8	-	-	Si	0,71
10401001	Río Tranallaguin En Carrico	0,73	0,88	1128,1	168,3	638,8		0,00
10405001	Río Hueyusca En Napeco	0,25	0,73	1471,8	-	-		0,00
10432003	Río Chico Ante Río Chamiza	0,43	0,43	2280,4	421,1	1805,2		0,00
10503001	Río Manso Antes Junta Río Puelo	0,38	0,71	1820,7	626,5	1873,2		2,78
10514001	Río Puelo Antes Junta Con Manso	-0,2	0,5	2328,4	-	-		136,88
10704002	Río Futaleufú Ante Junta Río Malito	-0,4	0,53	1569,9	-	-		36,83
11020004	Río Tigre En La Frontera	0,3	0,68	1403,4	720,7	1453,8		0,00
11130001	Río Ventisquero En Carretera Austral	-0,26	0,16	2716	2126,9	-		52,87
11143001	Río Cisnes Antes Junta Río Moro	0,1	0,58	498,8	201,1	457,4		4,02
11143002	Río Moro Antes Junta Río Cisnes	0,22	0,55	674,6	304,5	742,3		0,20

BNA	Nombre	Caudal		Recarga [mm/año]			Presencia	
		NSE	KGE	VIC	MoMLRr	RORA	Lagos	Área Glacial [km <sup>2</sup> ]
11147001	Río Cisnes En Puerto Cisnes	-0,45	0,43	1333,9	-	-		74,41

Tabla 6.6: Detalle de cuencas con presencia de lagos

Código BNA	Nombre cuenca	Lago	Área [km <sup>2</sup> ]
9405001	Río Curaco En Colico	Colico	56,06
9420001	Río Toltén En Villarrica	Villarrica	174,7
		Caburgua	51,7
10111001	Río San Pedro En Desagüe Lago Riñihue	Pullingue	6
		Panguipulli	114,3
		Riñihue	89,6
		Pirihueico	31
		Calafquén	117,4
		Lacar	57,1
10122001	Río Calle Calle En Balsa San Javier	Igual a 10111001	
10304001	Río Calcurrupe En Desembocadura	Maihue	48,9
10311001	Río Bueno En Bueno	Maihue	48,9
		Ranco	429,8
10328001	Río Pilmaiquén En San Pablo	Puyehue	159
10364001	Río Rahue En Forrahue	Rupanco	234,9
10514001	Río Puelo Antes Junta Con Manso	Puelo	44
10704002	Río Futaleufú Ante Junta Río Malito	Menendez	55,7
		Futalaufquén	44
		Rivadavia	21,7
		Quimel	40,4

#### 6.2.4 VALIDACIÓN CRUZADA DE LA REGIONALIZACIÓN DE PARÁMETROS

La validación cruzada del proceso de regionalización de parámetros considera como potenciales donantes a todas aquellas cuencas que no tienen lagos. Lo anterior se debe a que las cuencas calibradas con presencia de lagos (diez en total), poseen un comportamiento hidrológico distinto al resto de las cuencas en la vida real, generando un volumen de regulación y evaporación. De este modo, si estas cuencas con lagos transfieren parámetros a otra cuenca sin ellos, es probable que los procesos simulados en las cuencas receptoras intenten reproducir los efectos que tienen estos cuerpos de agua en el ciclo hidrológico.

Los criterios para la validación cruzada corresponden a los mencionados en el acápite 2.3.3, siendo 12 en total. En este proceso, se saca una cuenca del set de donantes, y se estiman los parámetros (con el set de cuencas remanente) para cada uno de sus pixeles. Luego, se corre el modelo VIC y se estiman los índices de eficiencia. El procedimiento anterior se repite para cada una de las cuencas y para cada uno de los criterios de regionalización.

Los índices analizados para seleccionar el mejor criterio de regionalización corresponden al KGE y al coeficiente  $\beta$  asociado. El índice KGE es el siguiente:

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

Para el coeficiente  $\beta = \overline{Q_{mod}}/\overline{Q_{obs}}$ , las barras horizontales corresponden al promedio (para más detalle se recomienda leer el Anexo A). En la Figura 6.10, se muestran las curvas de probabilidad acumulada para ambos índices. En el caso del KGE, el valor óptimo es 1 (es decir, una línea totalmente vertical), por lo que la curva más cercana a esa vertical en 1 es la que corresponde a la mejor regionalización según KGE. En dicha figura, se aprecian dos curvas que resaltan: (i) clasificación de pixeles según atributos climáticos y asignación mediante cercanía, y (ii) clasificación de pixeles según criterios físicos y asignación por cercanía.

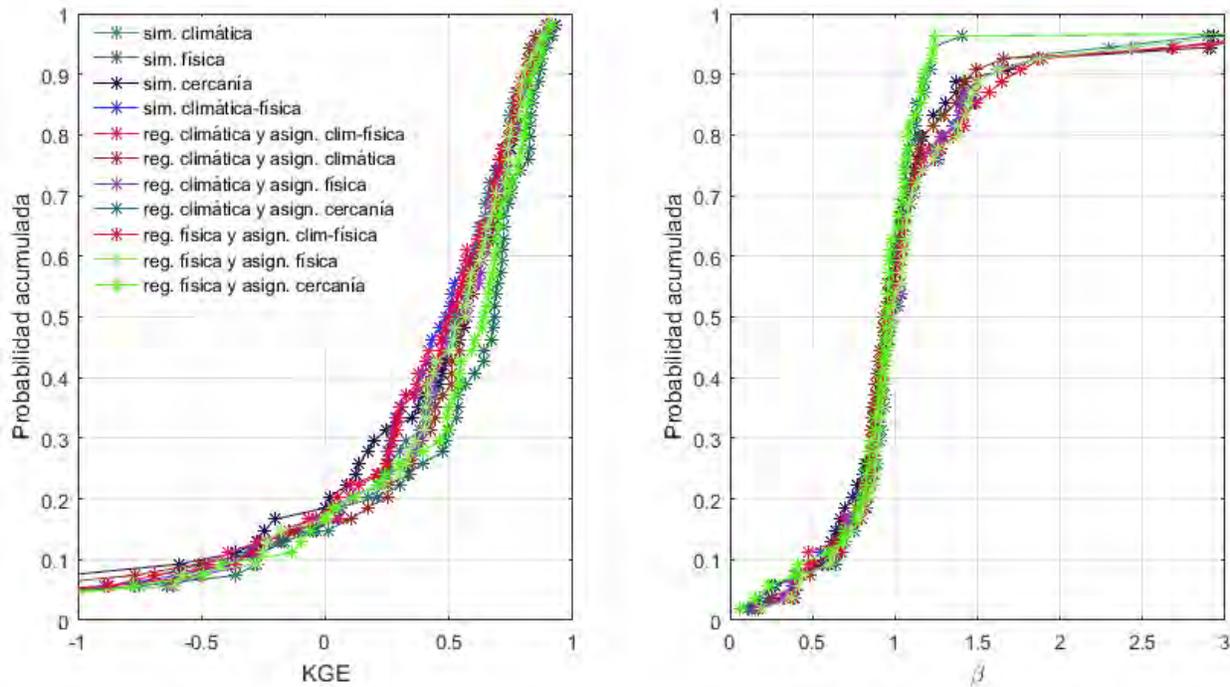


Figura 6.10: Curvas de probabilidad acumulada para el índice KGE y el coeficiente  $\beta = \overline{Q_{mod}}/\overline{Q_{obs}}$  para las cuencas en régimen natural.

En el panel derecho de la Figura 6.10 se presentan las curvas de probabilidad acumulada para el coeficiente  $\beta$ , donde resaltan los mismos criterios de regionalización analizados para el índice de eficiencia KGE. Para dilucidar cuál de ambos criterios tiene un mejor desempeño, se muestran en la Figura 6.11 todos los criterios de regionalización para ambos índices. De este gráfico, se desprenden dos conclusiones:

- i. La clasificación según atributos climáticos y asignación por cercanía tiene una mediana mayor que una clasificación de pixeles según atributos físicos y asignación por cercanía

- ii. La dispersión de los distintos métodos de regionalización es menor en torno al valor  $\beta = 1$ , que corresponde a un comportamiento "ideal". Lo que se traduce en que los caudales modelados son, en promedio, inferiores a los observados.

En consecuencia, el criterio de regionalización seleccionado corresponde a una clasificación de pixeles según atributos climáticos y una asignación de cuencas por cercanía.

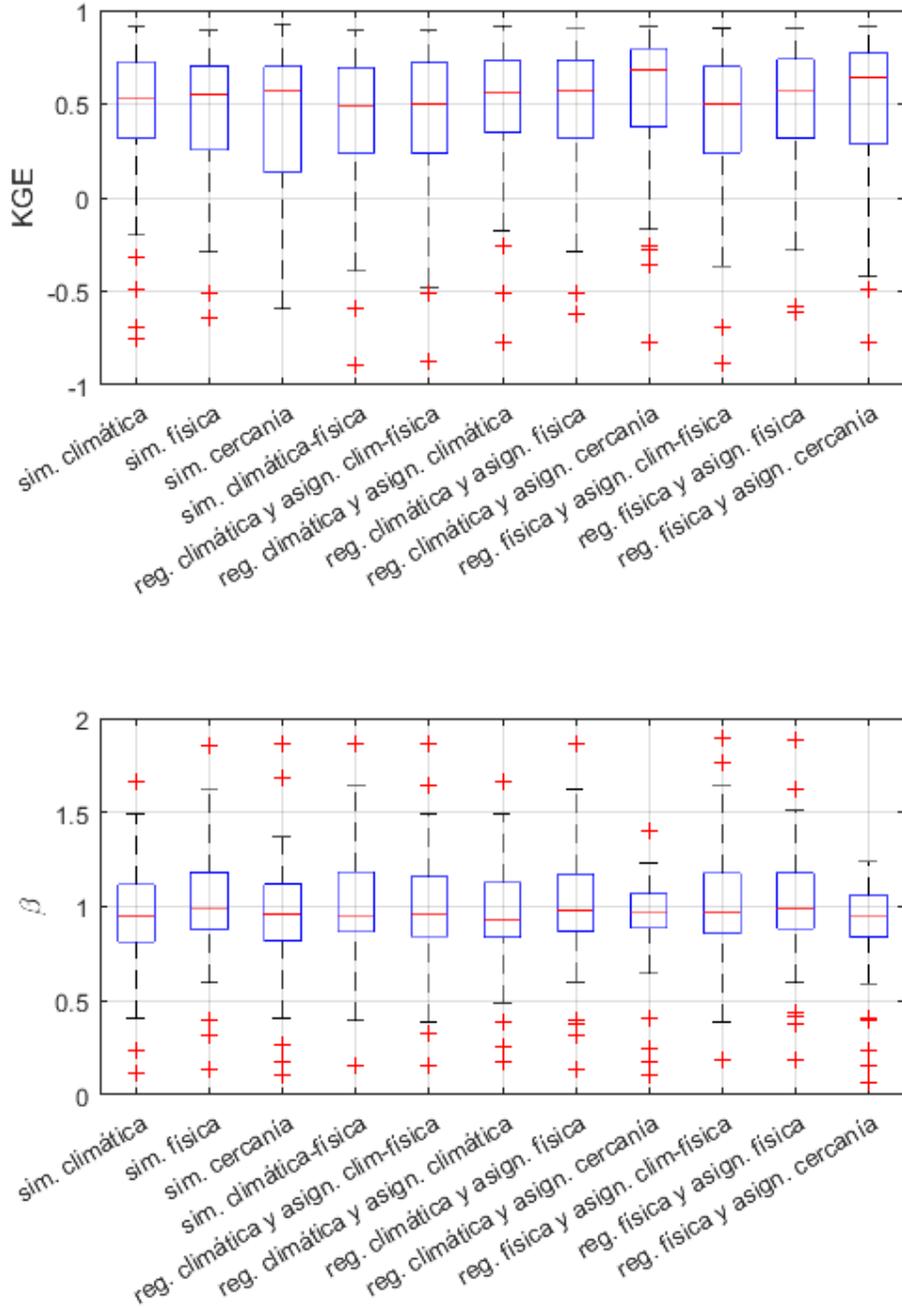


Figura 6.11: Variación de los índices KGE (panel superior) y  $\beta = \bar{Q}_{mod}/\bar{Q}_{obs}$  (panel inferior) para las cuencas en régimen natural

### 6.3 CONCLUSIONES CAPÍTULO VI

El análisis de sensibilidad es una labor esencial antes de cualquier simulación numérica, pues permite reducir el número de parámetros a optimizar, trabajando con aquellos que provoquen más variaciones en la función objetivo. Para la zona de estudio, se redujo la dimensión desde 34 parámetros a 14. Este resultado puede ser utilizado en otras zonas geográficas para facilitar una adecuada modelación mediante VIC.

De las simulaciones realizadas en cuencas en régimen natural, se desprende que más del 70% de las cuencas representan adecuadamente la temporalidad, los promedios y los volúmenes de las observaciones, lo que da seguridad en la estimación del balance hídrico para cada una de estas cuencas.

Respecto a la modelación glaciar, fue posible observar que la metodología propuesta no asegura una modelación adecuada de los procesos glaciares, pues se encontraron casos en donde el modelo permite seguir la dinámica de la superficie glaciar como casos en los que se tiene una mayor dispersión, existiendo una gran variabilidad entre estos. Por lo anterior se sugiere utilizar los resultados de las simulaciones glaciares de modo referencial, sugiriéndose que a futuro se resuelvan de mejor forma estos procesos.

Dada la naturaleza del estudio, fue posible realizar adecuadamente la modelación en cuencas con presencia de lagos, sin considerar la capacidad reguladora de todos estos cuerpos de agua. Una mejora en este sentido requerirá, necesariamente, una curva de embalse para cada cuerpo de agua simulado junto con altura de agua en cada uno de ellos, o una muestra representativa que permita regionalizar los parámetros encontrados. Al desconocer esta información, no fue posible realizar simulaciones numéricas en este tipo de hoyas hidrográficas.

Del resultado de validación cruzada se desprende que la mediana de todas las regionalizaciones realizadas reproduce de forma casi perfecta el volumen de agua observado, en el caso del KGE también se encuentra que todos los métodos testeados entregan medianas de KGE sobre 0,5; sin embargo, existen outliers importantes en donde incluyéndose casos en que el volumen como el KGE se vuelven negativos. La forma de reducir esta incertidumbre requiere, necesariamente, una mayor cantidad de estaciones fluviométricas en zonas no intervenidas.

Finalmente, del resultado de regionalización se estima que en promedio se puede confiar en la regionalización de parámetros, pues el 75% de las cuencas en donde se realizó validación cruzada mostró un comportamiento satisfactorio, sin embargo, existe un número no menor de cuencas regionalizadas en donde no se logra un comportamiento satisfactorio. Como recomendación se sugiere considerar las estimaciones de caudales medios como representativas en aquellas cuencas que recibieron parámetros, y aquellas de caudales extremos (máximos y mínimos), tenerlas como referenciales.

## 7 ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO PARA LA ZONA DE ESTUDIO

En esta sección se detalla la estimación del balance hídrico, así como las estimaciones bajo cambio climático, para toda la zona de estudio. Se detalla el proceso de regionalización y la comparación con el balance propuesto por DGA (1987). Los resultados se muestran como mapas y montos acumulados por cuencas definidas por DGA-CIREN (2014).

### 7.1 BALANCE HÍDRICO PARA LA ZONA DE ESTUDIO

Para estimar el balance en la zona de estudio que no fue calibrada, se opta por el traspaso de parámetros desde cuencas calibradas hacia los pixeles sin calibrar, por lo que es necesario definir un set de cuencas donantes de parámetros que cumplan con requisitos de índices de eficiencia (para asegurar que los parámetros representen adecuadamente los procesos hidrológicos de la cuenca) y que no contengan lagos, pues es un proceso no incorporado explícitamente en la modelación y que influye en los parámetros para subsanar esta deficiencia. En consecuencia, la totalidad de la zona de estudio se separa en dos grupos: (i) aquellos pixeles calibrados que mantienen sus parámetros (pues fueron calibrados, incluyendo cuencas con lagos) y (ii) aquellos pixeles no calibrados que reciben parámetros desde cuencas calibradas, donde algunas de ellas se encuentran anidadas, es decir, un pixel tiene tantos conjuntos de parámetros como veces se haya usado para calibrar alguna cuenca que lo contenga. Este es el caso de las cuencas anidadas, es decir, donde una cuenca contiene a otra. En estos casos, el pixel que tiene más de un set de parámetros calibrado recibe el set proveniente de la cuenca calibrada más grande que lo contenga (aunque la cuenca tenga lagos, pues es un pixel calibrado). Los conjuntos de parámetros calibrados restantes para dicho pixel, se usan como donantes potenciales de pixeles no calibrados, si se cumplen los criterios antes mencionados (índices de eficiencia  $KGE > 0,4$  y ausencia de lagos). Esta diferenciación produce dos grupos de cuencas calibradas: (i) aquellas que donan parámetros a sus pixeles por ser las más grandes (con o sin lagos), privilegiando una mayor área calibrada y que pueden, potencialmente, donar a otros pixeles y (ii) aquellas que fueron calibradas, pero cuyos set de parámetros solo se transfieren a pixeles no afectados a la calibración y que no están incluidos en la cuenca (cuencas donde  $KGE$  sea mayor a  $0,4$  y no contengan lagos). Así, una cuenca calibrada puede estar en ambos grupos, es decir, los pixeles que la contienen mantienen sus parámetros y, al mismo tiempo, el set de parámetros calibrado puede ser usado en pixeles no afectados a calibración.

En la Figura 7.1 se muestra el caso de un pixel  $i,j$  que fue calibrado para dos cuencas distintas: cuencas A y B. En el caso del pixel  $i,j$ , éste recibiría los parámetros de la cuenca B (pues es la cuenca calibrada más grande que contiene al pixel  $i,j$ ). En el caso del pixel  $i',j'$ , que no fue calibrado, existen dos opciones (según el ejemplo propuesto): recibe los parámetros calibrados para la cuenca A o recibe el set de parámetros calibrados para la cuenca B. Si A y B cumplen con índices de eficiencia  $KGE > 0,4$  y ni A ni B tienen lagos, entonces ambas cuencas podrían donar sus parámetros la pixel  $(i',j')$ . La que efectivamente donde sus parámetros, se resuelve mediante los criterios de regionalización propuestos en la sección 2.3.3. En consecuencia, una cuenca anidada que está contenida en otra cuenca calibrada más grande, no dona parámetros a los pixeles que la componen (pues se prefiere el set de parámetros de la cuenca calibrada más grande, como es el caso del pixel  $(i,j)$  en la Figura 7.1), aunque si es posible que done parámetros a un pixel que no fue calibrado (y que cumple las condiciones expuestas).

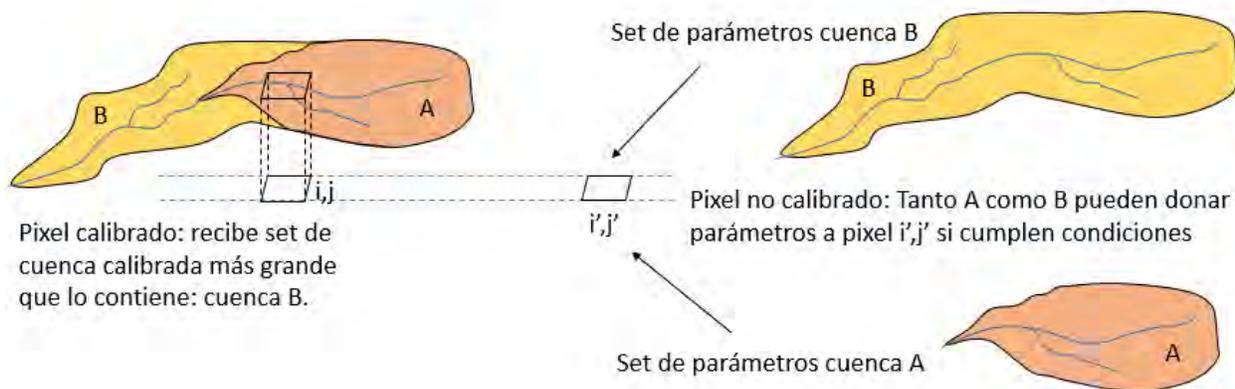


Figura 7.1: Ejemplo de traspaso de parámetros en cuencas anidadas.

A modo de ejemplo de la Figura 7.2, se aprecia que cuencas en el panel izquierdo no aparecen en el panel derecho, esto indica que dichas cuencas mantienen sus parámetros de calibración, pero que, debido al desempeño de la calibración no satisfactorio en términos de NSE y KGE, estas cuencas no son candidatas a donar parámetros a otras cuencas sin información fluviométrica o con alto grado de intervención.

En la Figura 7.2 se muestran ambos grupos de cuencas calibradas. En el panel izquierdo están aquellas cuencas calibradas que donan parámetros a sus pixeles (es decir, las cuencas que mantienen sus parámetros), entre las que se encuentran las cuencas con lagos y, en el panel derecho, aquellas cuencas que pasan por filtros de índices de eficiencia NSE y KGE mayores a 0,4 y que no contengan lagos (debido a que los parámetros calibrados intentan compensar la exclusión de la modelación directa de los cuerpos de agua) y que donan sus parámetros a otros pixeles. Los lagos que no están incluidos en el set de cuencas calibradas son: Llanquihue, Todos los Santos, Yelcho, Verde y Rosselot. Estos lagos presentan incertidumbre pues no fueron calibrados y el traspaso de parámetros resulta, en consecuencia, incierto debido a la complejidad de los procesos inherentes a estos cuerpos de agua.

Considerando el criterio de regionalización seleccionado en la sección 6.2.4, es posible estimar los principales flujos de interés hidrológico: escorrentía, evapotranspiración y precipitación, los cuales se muestran en la Figura 7.3.

Otros flujos que se pueden estimar con la metodología propuesta corresponden a la evapotranspiración potencial, la demanda evapotranspirativa en zonas cultivadas y la recarga, las que se muestran en la Figura 7.4. Para el caso del riego, (cuya metodología se encuentra detallada en el Anexo A y DGA, 2018), se considera que durante los meses de invierno (de abril a agosto) no existe riego. La demanda evapotranspirativa es, conceptualmente, el agua necesaria que requieren los cultivos para crecer a su tasa potencial, es decir, que tienen toda el agua disponible para sus requerimientos, y que no es aportada de manera natural:

$$Dda_{ET} = PET - ET$$

Donde  $Dd_{aET}$  corresponde a la demanda evapotranspirativa o, equivalentemente, al agua que se requiere añadir para que la planta crezca a su potencial, PET es la evapotranspiración potencial y ET la evapotranspiración natural estimada por VIC. Para obtener el requerimiento anual, se suman las demandas diarias entre los meses de septiembre a marzo.

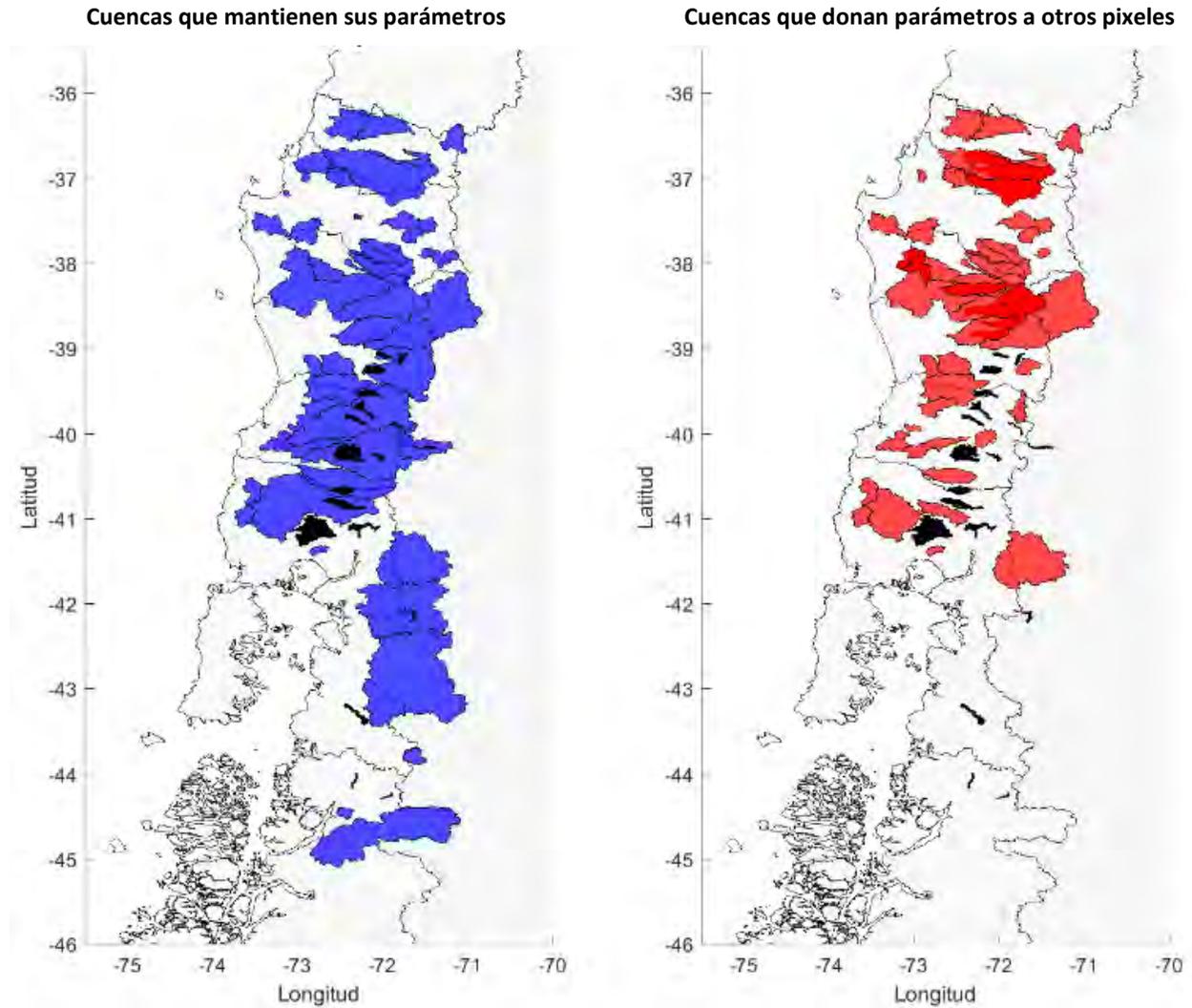


Figura 7.2: Grupos de cuencas calibradas que donan parámetros a sus pixeles (panel izquierdo) y aquellas cuencas que fueron calibradas que cumplen con las exigencias para donar parámetros a pixeles que no fueron calibrados (panel derecho).

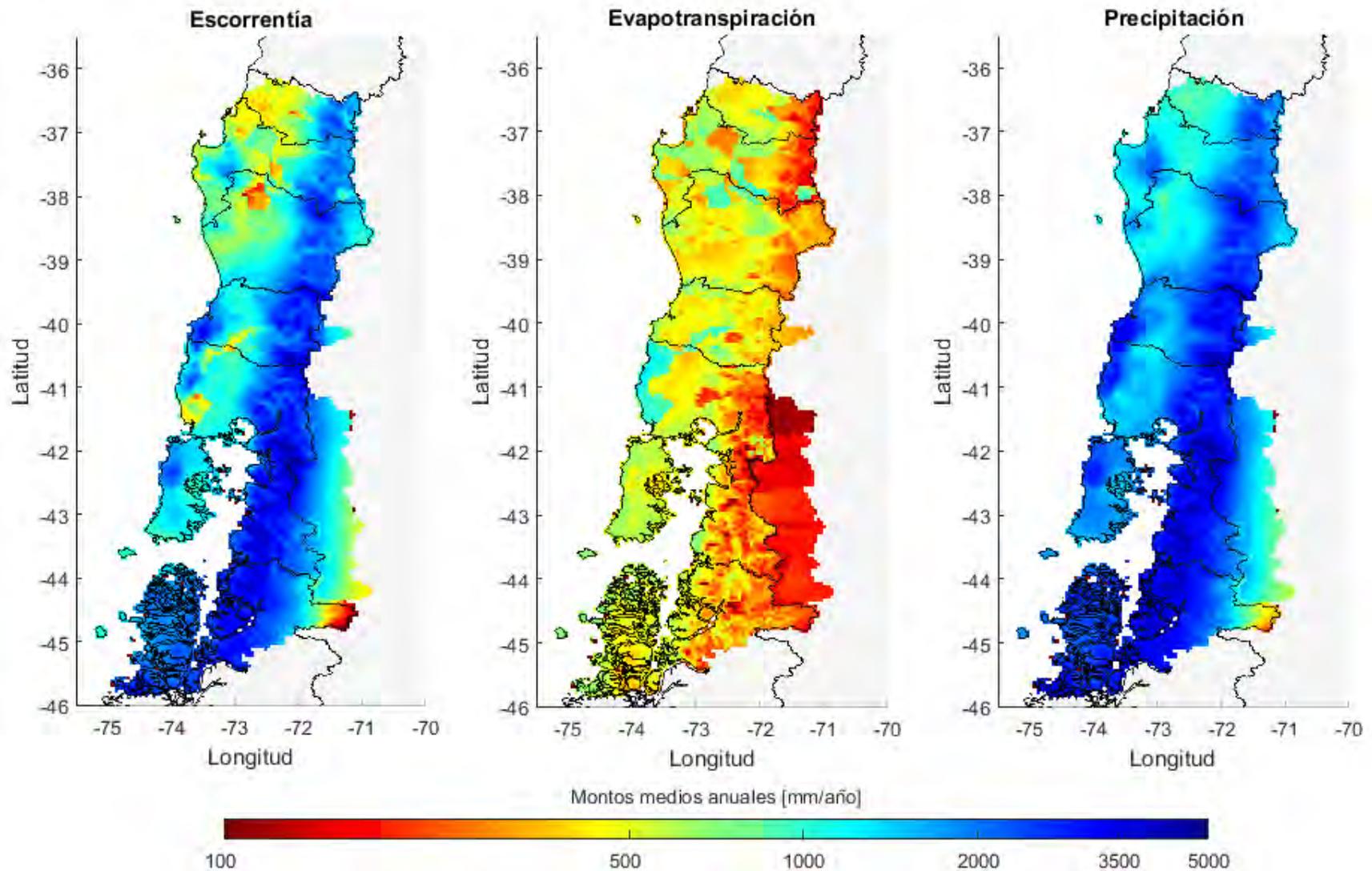


Figura 7.3: Montos medios anuales de evapotranspiración natural (no incluye efecto del riego), escorrentía y precipitación considerando el período abr-1985 a mar-2015.

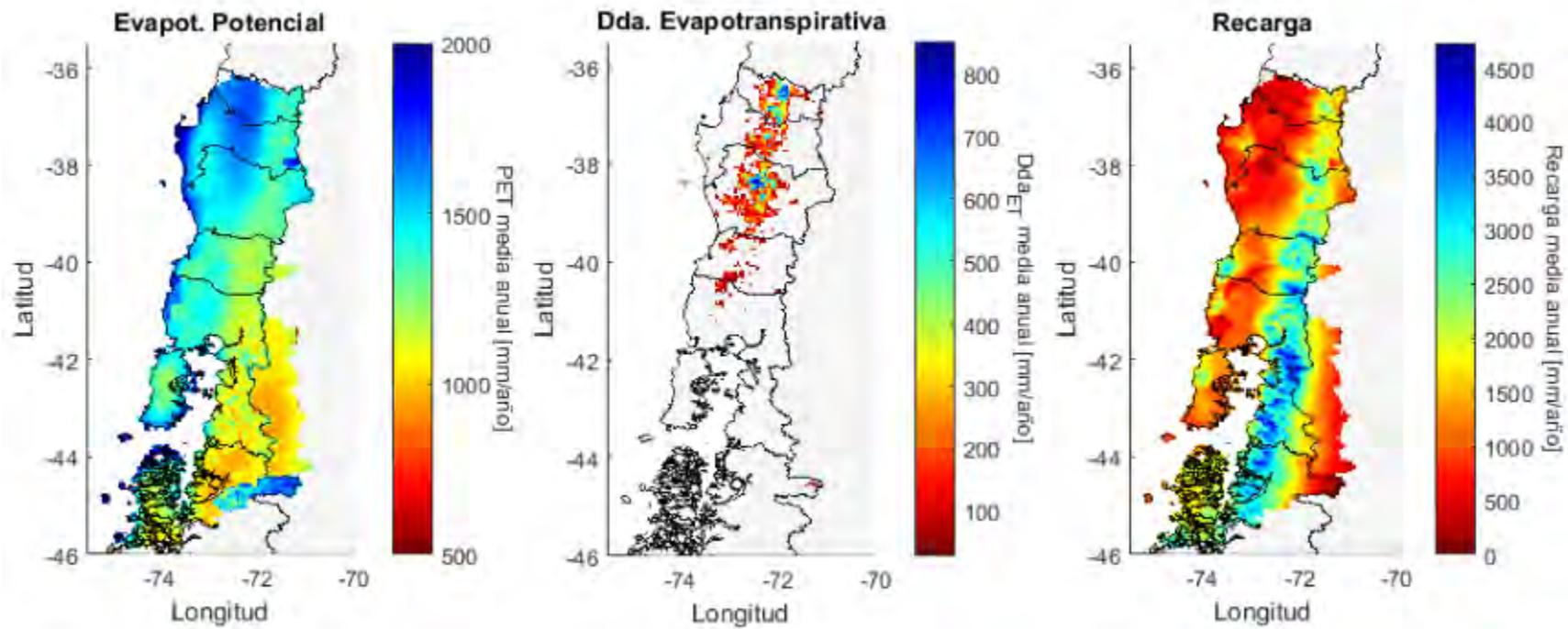


Figura 7.4: Estimación de la evapotranspiración potencial, la demanda evapotranspirativa en las zonas de cultivo y la recarga según las metodologías propuestas. Los mapas consideran medias anuales para el periodo abr-1985 a mar-2015. Para la demanda evapotranspirativa, se considera que no hay riego entre los meses de abril a agosto.

## 7.2 BALANCE HÍDRICO EN CUENCAS DARH

Mediante la regionalización de parámetros (sección 7.1), es posible obtener los valores medios de las variables hidrológicas incluidas por el modelo VIC para cualquier cuenca de la zona de estudio. En particular, se presenta en la Tabla 7.1 los montos medios para las cuencas definidas en el Atlas del Agua (DGA, 2015d). Los flujos que se muestran corresponden a la precipitación media anual ( $P$ ), evapotranspiración natural ( $ET$ ), escorrentía natural ( $Q$  VIC), a la estimación de la demanda evapotranspirativa por riego ( $D_{da}$  ET), al aporte glacial en cada cuenca, a la estimación de la recarga, la evapotranspiración potencial ( $PET$ ) según el modelo VIC (que ocupa la ecuación de Penmann-Monteith) y la fórmula de Hargreaves. Finalmente, se presenta la temperatura media de cada uno de las zonas definidas en el Atlas de Aguas y la variación del almacenamiento adimensional, el cual se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\Delta = 100 \cdot \frac{1}{P} \cdot \frac{dS}{dt} = \frac{100}{P} (P - Q - ET - Q_g)$$

donde  $S$  corresponde al almacenamiento (en mm) y  $dt$  a la variación temporal, que para la Tabla 7.1 abarca desde abril del año 1985 hasta marzo de 2015 (30 años hidrológicos). Valores de  $\Delta$  negativos indican que la cuenca pierde agua (en términos totales), mientras que valores positivos indican que los almacenamientos en la cuenca aumentan.

Adicionalmente, en la Figura 7.5 se presenta el balance de masa adimensional para cada una de las cuencas definidas en el Atlas del Agua (panel superior). Para además comprender si las cuencas están dominadas por un clima árido o húmedo se superponen las componentes del balance hídrico en la curva de Budyko (Budyko, 1971), según este autor, la magnitud de  $ET$  real se relaciona con que muestra la interacción entre la precipitación y la evapotranspiración potencial de cada cuenca. Si el índice de aridez, definido como  $ET/P$  entrega un valor sobre uno entonces se trata de una cuenca árida, mientras que si  $ET/P$  entrega un valor cercano a cero, se trata de una cuenca húmeda y por ende con mayor escorrentía superficial. Este análisis se muestra en el panel inferior de la Figura 7.5. En ambos casos, los números representan a las cuencas más importantes, cuyos códigos se encuentran en la Tabla 7.1. Del balance de masa adimensional se desprende que prácticamente todas las cuencas tienen escorrentías cercanas o mayores a la mitad de la precipitación, llegando en algunos casos a ser más del 90%. Por otro lado, el índice de aridez ( $ET/P$ ) indica si la cuenca tiene un déficit de masa ( $PET/P > 1$ ) o si no existe limitación de agua para evapotranspirar ( $PET/P < 1$ ).

Se observa que todas las cuencas tienen más precipitación que la que es posible evapotranspirar con la energía disponible, lo que remarca el carácter húmedo de la zona de estudio. Se aprecia, además, que la aridez tiene un fuerte gradiente latitudinal, donde la humedad de las cuencas aumenta, en términos generales, hacia el sur.

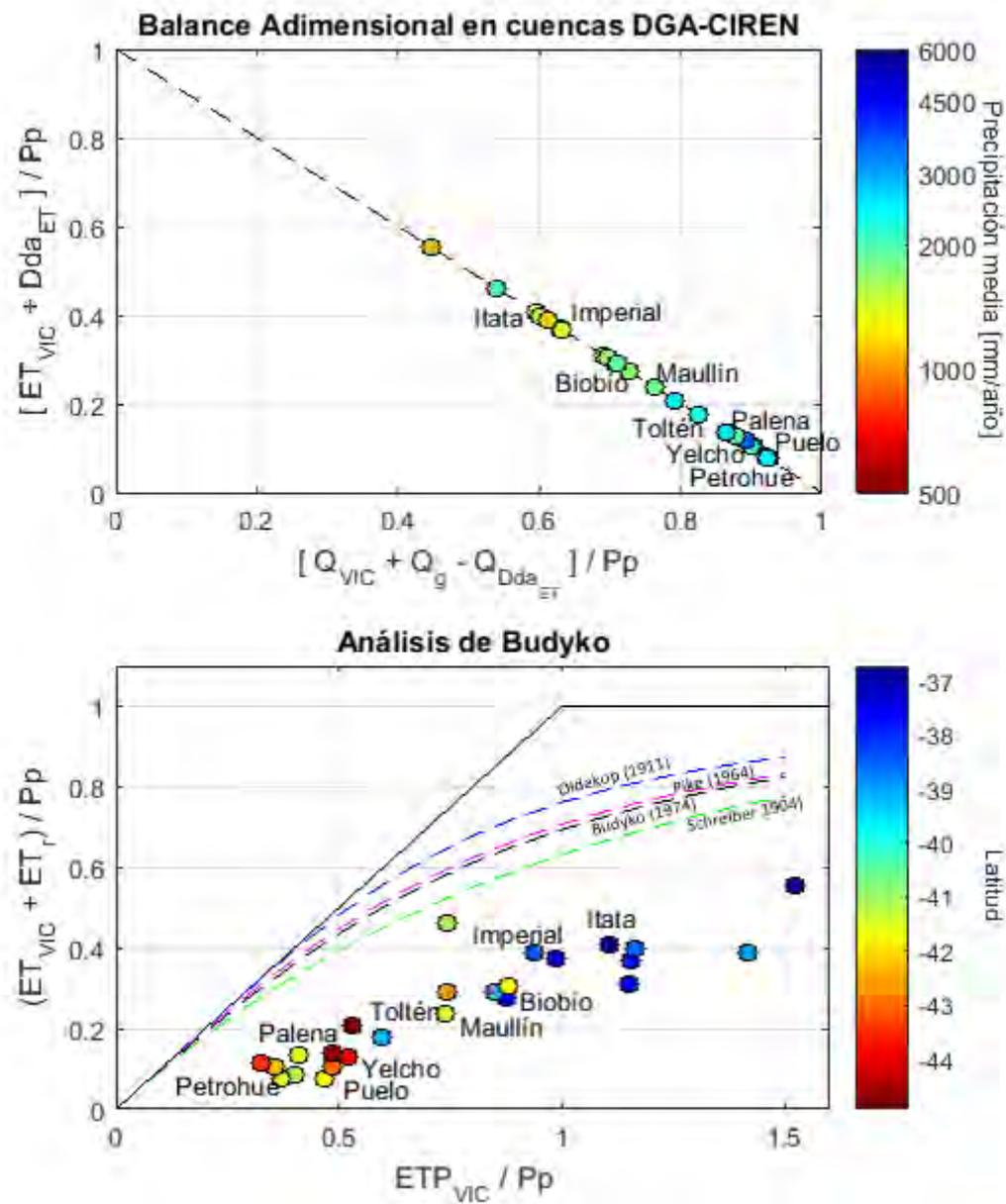


Figura 7.5: Balance adimensional y análisis de Budyko para las áreas definidas en el Atlas de Agua (DGA, 2015d). La Evapotranspiración potencial adoptada es la ETP reportada por VIC.

Tabla 7.1: Principales flujos hidrológicos para las cuencas definidas en el Atlas del Agua según el criterio de regionalización

DARH	Nombre	P	Q	ET	Riego	Glaciar	Recarga	ETP (VIC)	ETP (Hargreaves)
		mm/año							
800	Cuencas Costeras entre límite región y río Itata	1024,9	488,8	536,5	0	0	487,7	1686,3	1279,5
801	Río Itata	1413,4	969,8	444,6	130,3	0,4	966,7	1563,9	1321,1
802	Costeras e Islas entre Río Itata y Río Biobío	1060,8	473,3	588,5	0,0	0,0	472,7	1616,2	1310,6
803	Río Biobío	1709,9	1277,3	435,0	35,1	1,6	1269,2	1498,1	1234,8
804	Arauco	1637,2	1030,8	608,7	0,5	0,0	1027,7	1612,7	1245,8
805	Costeras entre Punta Lavapié y Río Lebu	1537,9	1062,3	477,1	0,2	0,0	1058,5	1766,0	1224,9
806	Costeras entre Lebu y Tirúa	1382,3	874,9	508,9	0,6	0,0	872,5	1593,9	1223,4
900	Río Imperial	1561,8	1091,1	472,6	135,6	0,7	1089,0	1463,9	1233,7
901	Cuencas Costeras entre límite Región y Río Imperial	1493,6	897,6	597,2	0,0	0,0	895,4	1738,9	1177,3
902	Cuencas Costeras entre Río Imperial y Río Toltén	1156,5	721,4	435,9	12,7	0,0	720,1	1639,4	1221,7
903	Río Toltén	2260,5	1888,9	374,3	26,4	5,1	1883,2	1347,5	1210,3
904	Río Queule	1718,4	1217,1	501,8	0,0	0,0	1215,3	1456,7	1193,4
1400	Cuencas Costeras Los Ríos Norte	1864,3	1275,3	589,2	2,1	0,0	1272,8	1435,6	1177,7
1401	Río Valdivia	2279,7	1828,9	451,7	14,0	1,8	1822,5	1292,6	1161,8
1402	Cuencas Costeras entre Río Valdivia y Río Bueno	2995,6	2450,2	544,5	0,0	0,0	2446,3	1473,9	1140,3
1403	Río Bueno	2198,6	1723,8	475,9	10,7	0,5	1717,6	1311,9	1162,1
1000	Cuencas Costeras entre Río Bueno y Río Maullín	2026,7	1090,6	935,7	0,0	0,0	1086,3	1508,3	1126,4
1001	Río Maullín	1855,0	1417,4	437,2	0,2	0,6	1416,0	1368,4	1110,7
1002	Cuencas Costeras e Islas entre Río Maullín y Río Chamiza	1679,8	1168,6	510,8	0,0	0,0	1167,4	1480,8	1092,5
1003	Cuencas Costeras entre Río Chamiza y Río Petrohué	2938,2	2544,1	394,4	0,0	0,4	2541,3	1205,9	1114,3
1004	Río Petrohué y Lago Todos Los Santos	2921,1	2676,7	245,2	0,0	11,4	2672,8	1166,9	1116,4
1005	Cuencas Costeras entre Río Petrohué y Río Puelo	3024,3	2794,9	229,8	0,0	2,5	2791,6	1124,1	1107,9
1006	Río Puelo	2372,9	2179,0	183,9	0,0	12,6	2171,2	1112,2	961,6

DARH	Nombre	P	Q	ET	Riego	Glaciar	Recarga	ETP (VIC)	ETP (Hargreaves)
		mm/año							
1007	Cuencas Costeras entre Río Puelo y Río Yelcho	3282,5	2936,2	338,5	0,0	31,3	2930,5	1171,2	1091,6
1008	Río Yelcho	2144,0	1923,2	224,3	0,1	9,1	1882,5	1040,4	941,9
1009	Cuencas Costeras entre Río Yelcho y límite Regional	3553,3	3137,3	416,4	0,0	30,0	3133,6	1164,4	1111,9
1010	Cuencas Islas Chiloé y Circundantes	1924,5	1365,3	558,7	0,0	0,0	1363,4	1430,9	1073,4
1100	Río Palena y Costera hasta límite Décima Región	2022,2	1763,4	258,7	0,0	12,2	1760,5	1052,0	987,1
1101	Cuencas Costeras e Islas entre Río Palena y Río Aysén	2622,0	2254,1	358,0	1,7	13,8	2250,6	1274,4	1043,4
1102	Cuencas del Archipiélago de Las Guaitecas y de los Chonos	2501,3	1979,1	521,8	0,0	0,0	1977,1	1324,4	1041,8

### 7.3 COMPARACIÓN CON BALANCE DE 1987

#### COMPARACIÓN DE PRECIPITACIÓN

La Figura 7.7 muestra que las climatologías de precipitación anual promedio han tenido cambios considerables entre los distintos periodos analizados. Esta diferencia muestra que, en promedio, se tienen 866 mm de precipitación anual menos, respecto al estudio (DGA, 1987). Esta tendencia al secamiento es dramática en toda la zona de estudio, pudiendo alcanzar en algunas zonas disminuciones por sobre 1000 [mm/año] (Figura 7.6 y Tabla 7.2).

Un aspecto a tener en consideración al mostrar cambios en las variables meteorológicas de los estudios DGA (1987) y del presente estudio, es que estos cambios en la precipitación anual promedio no se pueden explicar exclusivamente a efectos de un cambio en el clima, sino que también responden a diferencias metodológicas en la obtención de las mismas (isoyetas versus producto grillado regional), lo que explicaría por ejemplo por qué existe un pixel con una diferencia negativa en precipitación anual por sobre los 5.000 [mm] (Tabla 7.2).

Se observa también una disminución de la desviación estándar de la climatología actual con respecto a la correspondiente al estudio DGA (1987)- Esto puede deberse principalmente a dos aspectos:

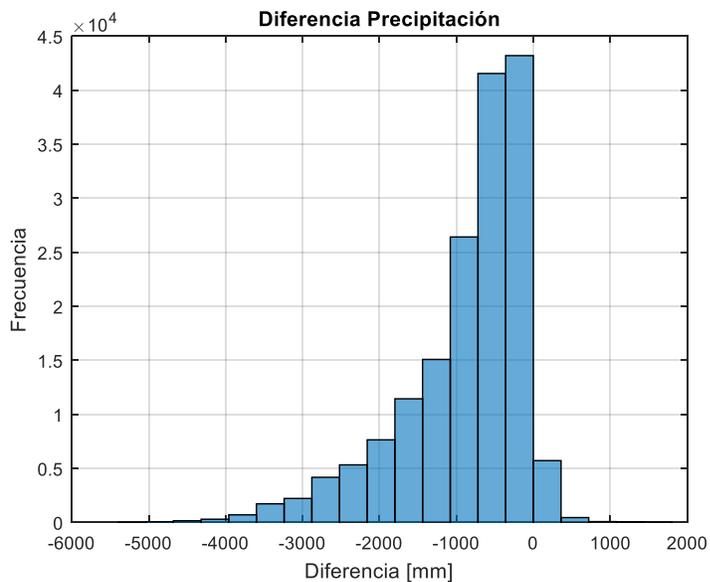
- Disminución de amplitudes de precipitación, al disminuir en casi 1.500 [mm] la precipitación máxima, naturalmente la desviación estándar disminuirá, aunque la precipitación mínima se haya reducido a la mitad respecto al periodo (1950-1980).
- Precipitaciones interpoladas y extrapoladas en base a las isolíneas del estudio DGA (1987) genera valores en zonas “sin información”, con un efecto propio de este tipo de geo procesos. En el caso del producto (1985-2015) la metodología genera forzantes en todo el dominio con lo que se minimizan estos efectos.

Tabla 7.2: Estadísticos de mapas de precipitación media anual ( $P_{ma}$ ) y de mapa de diferencias de la Figura 7.7, restringidas solo al área de estudio.

Estadístico	Climatología anual de precipitación [mm]		
	$P_{ma}$ (1950-1980)	$P_{ma}$ (1985-2015)	Diferencia $P_{ma}$ (1985-2015)- $P_{ma}$ (1950-1980)
Máximo	7.000	5.563	1.761
Mínimo	500	252	-5.111
Media	2.611	1.729	-866
Desviación	1.325	774	804

Resulta interesante notar que existen pixeles con diferencias importantes (entre -5.111 [mm] y 1.761 [mm]), que serían explicadas principalmente por las diferentes técnicas utilizadas para estimar precipitaciones en cada balance. Los valores de climatología de precipitación del periodo 1950-1980 fueron calculados para cada celda por medio de interpolación espacial desde las isoyetas, las cuales entregan campos continuos y relativamente suaves de esta variable. Por otro lado, las climatologías del periodo 1985-2015 son calculadas a

partir del producto CR2MET (v2), cuya resolución de 0,05x0,05° permite un nivel de detalle mucho mayor. A pesar de lo anteriormente expuesto, resulta interesante ver como hay una tendencia a una menor variabilidad natural, lo cual se refleja en que la desviación de los valores medios disminuye en poco más de un 40%.



**Figura 7.6: Histograma del ráster de diferencias entre precipitaciones anuales promedio de los periodos climatológicos (1985-2015) y (1950-1980).**

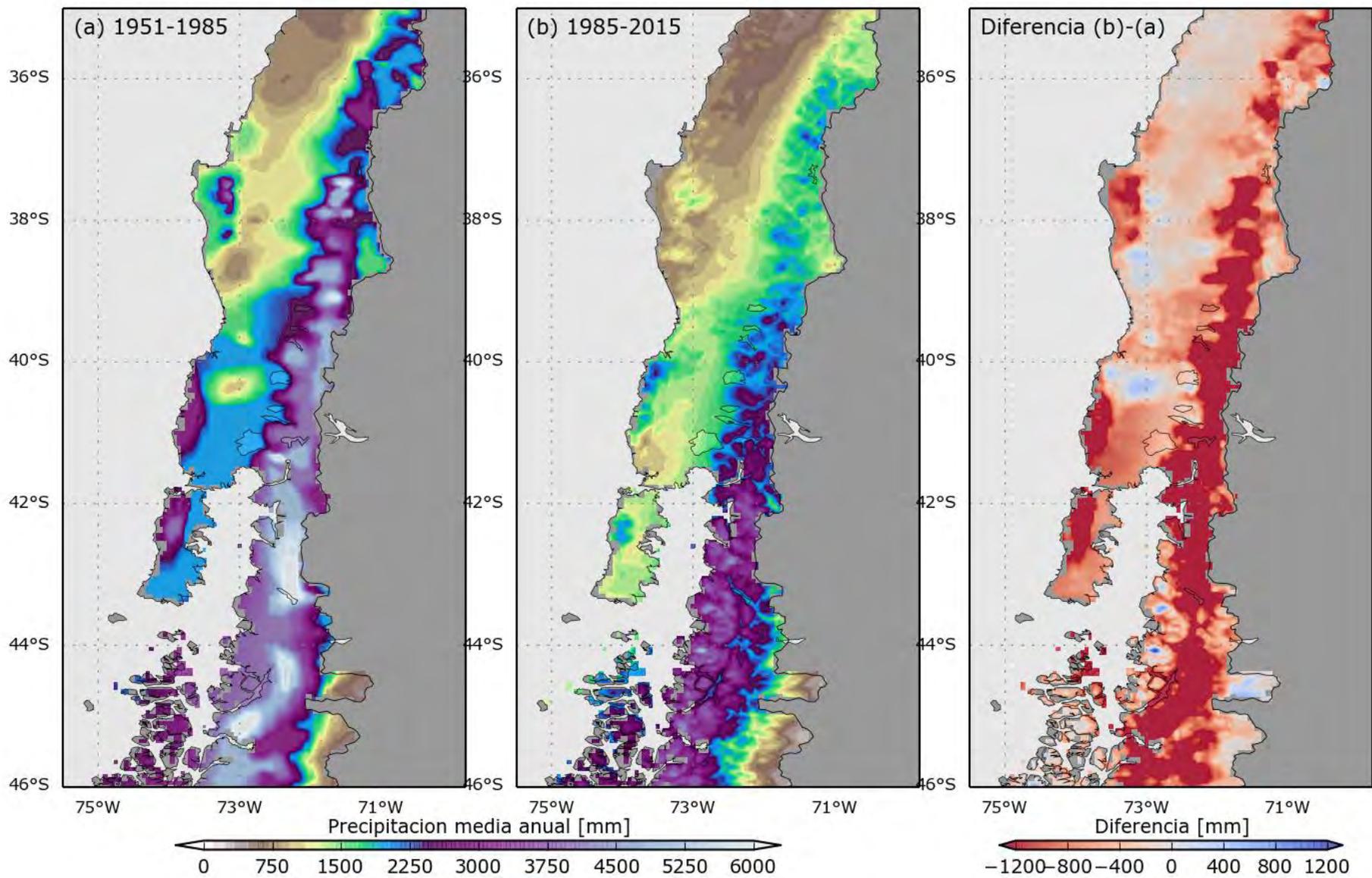


Figura 7.7: Climatología de precipitaciones anuales promedio para los estudios DGA (1987) y proyecto actual (paneles a y b) y diferencia de precipitaciones (panel c).

## COMPARACIÓN DE TEMPERATURAS

En el caso de las temperaturas, se aprecia un calentamiento evidente, especialmente en la zona de la Cordillera de Los Andes. Sin embargo, existen zonas donde la temperatura habría disminuido respecto al periodo climatológico DGA (1987) (Figura 7.9). El histograma de cambio (Figura 7.8) muestra este desfase positivo en la distribución, con respecto a una condición estacionaria de temperaturas supuesta en el estudio DGA (1987).

En relación con los estadísticos, se tiene que habría aumentado la temperatura en la zona de estudio en 0,5 °C, aunque se tienen variaciones amplias, observándose cambios que van desde un enfriamiento de 7,8 °C hasta aumentos de temperatura de 5,9 °C. Se observa, además, que hay una tendencia al aumento de las temperaturas, tanto en los valores de temperaturas máximas, medias y mínimas. Sin embargo, la variación de valores disminuye, lo que representa condiciones con menor variabilidad natural en los valores (Tabla 7.3).

Las diferencias de desviación estándar se explican de modo similar al caso de la precipitación, sin embargo, al tener la temperatura un comportamiento característico y cuantificable con la elevación, las desviaciones son significativamente menores en comparación al promedio que la variable precipitación.

En términos de las diferencias observadas entre las climatologías de los estudios DGA (1987) y el presente, al igual que en el caso de la precipitación, no son atribuibles exclusivamente a un cambio en el clima, sino además a diferencias metodológicas en la obtención de estas, lo que explicaría por ejemplo que el pixel con mayor diferencia sea de 7,8°C más cálido, lo que generaría impactos importantes en los recursos hídricos.

**Tabla 7.3: Estadísticos de mapas de temperatura media anual (T<sub>ma</sub>) y de mapa de diferencias de la Figura 7.9**

Estadístico	Climatología anual de temperaturas [°C]		
	T <sub>ma</sub> (1950-1980)	T <sub>ma</sub> (1985-2015)	Diferencia T <sub>ma</sub> (1985-2015)- T <sub>ma</sub> (1950-1980)
Máximo	14	14,4	7,8
Mínimo	0	0,9	-5,9
Media	9,2	9,7	0,5
Desviación	2,9	2,4	1,4

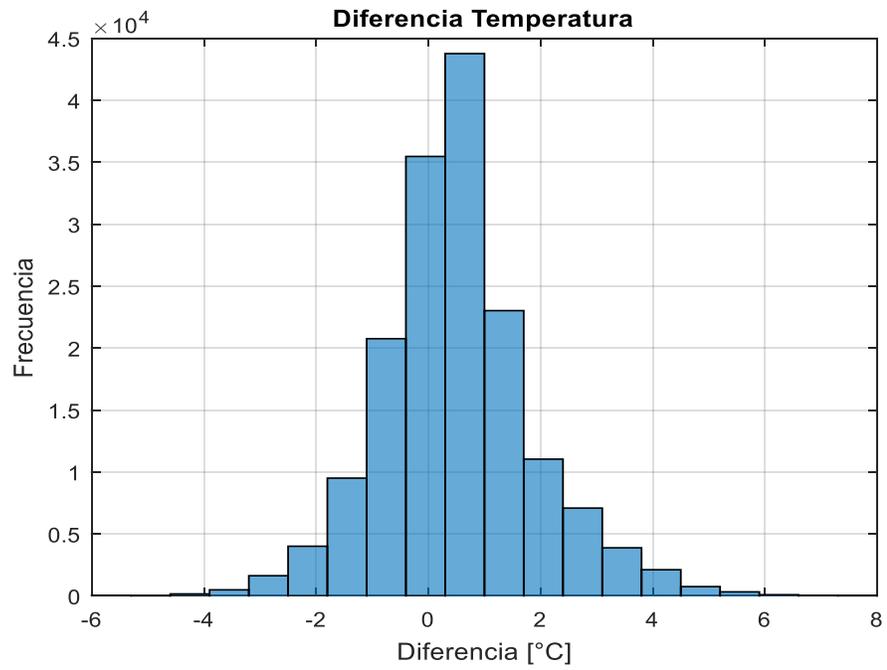


Figura 7.8: Histograma del ráster de diferencias entre temperaturas medias anuales de los periodos climatológicos (1985-2015) y (1950-1980).

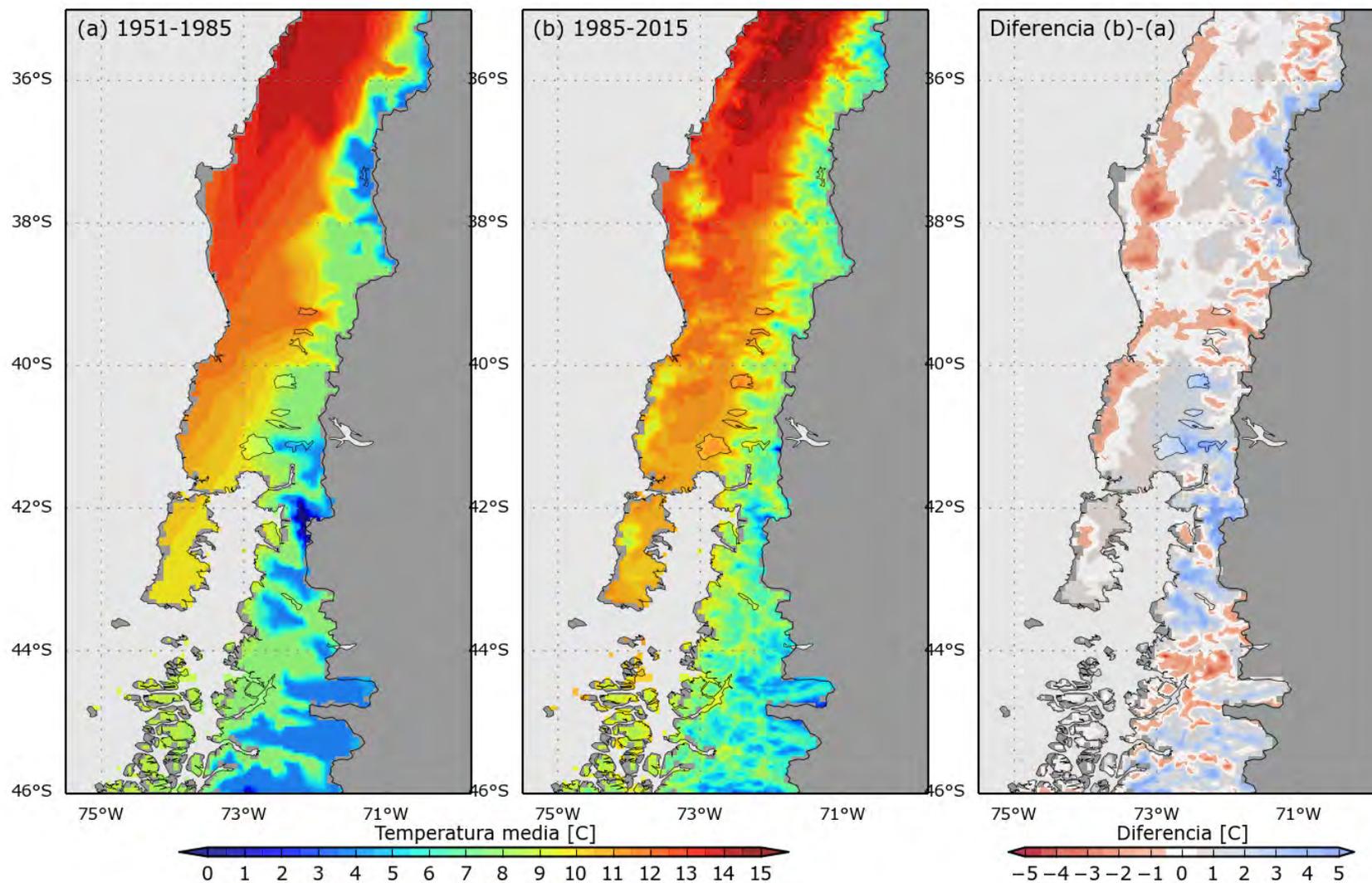


Figura 7.9: Climatología de temperatura media anual para los estudios DGA (1987) y proyecto actual (paneles a) y b) y diferencia de temperaturas.

## COMPARACIÓN BALANCE HÍDRICO

Antes de realizar la comparación entre los estudios presente y el balance DGA (1987), es importante tener en consideración que este último se realizó para las cuencas BNA, que son distintas en su delimitación a las cuencas DARH, delimitadas por CIREN. La equivalencia entre ambas cuencas no es directa, pues existen casos en que una cuenca DARH muestra el territorio hidrográfico que es compartido entre Chile y Argentina (eg. Yelcho, Puelo), mientras que existen otras cuencas BNA que ahora son varias cuencas DARH y viceversa. La equivalencia espacial basados en un criterio de máxima superposición de superficies se muestra en la Tabla 7.4. Para favorecer la comprensión de lo anteriormente expuesto se muestra de forma esquemática se muestra en la Figura 7.10 la superposición entre los polígonos BNA (Coloreados) y las cuencas DARH (línea negra).

Dado lo anteriormente expuesto, y las equivalencias planteadas en la Tabla 7.4, sólo se muestra la comparación entre cuencas DARH que tienen un único equivalente BNA, con el fin de evitar interpretaciones sobre cambios en los nombres de estas y/o diferencias significativas en las superficies territoriales reportadas en este capítulo.

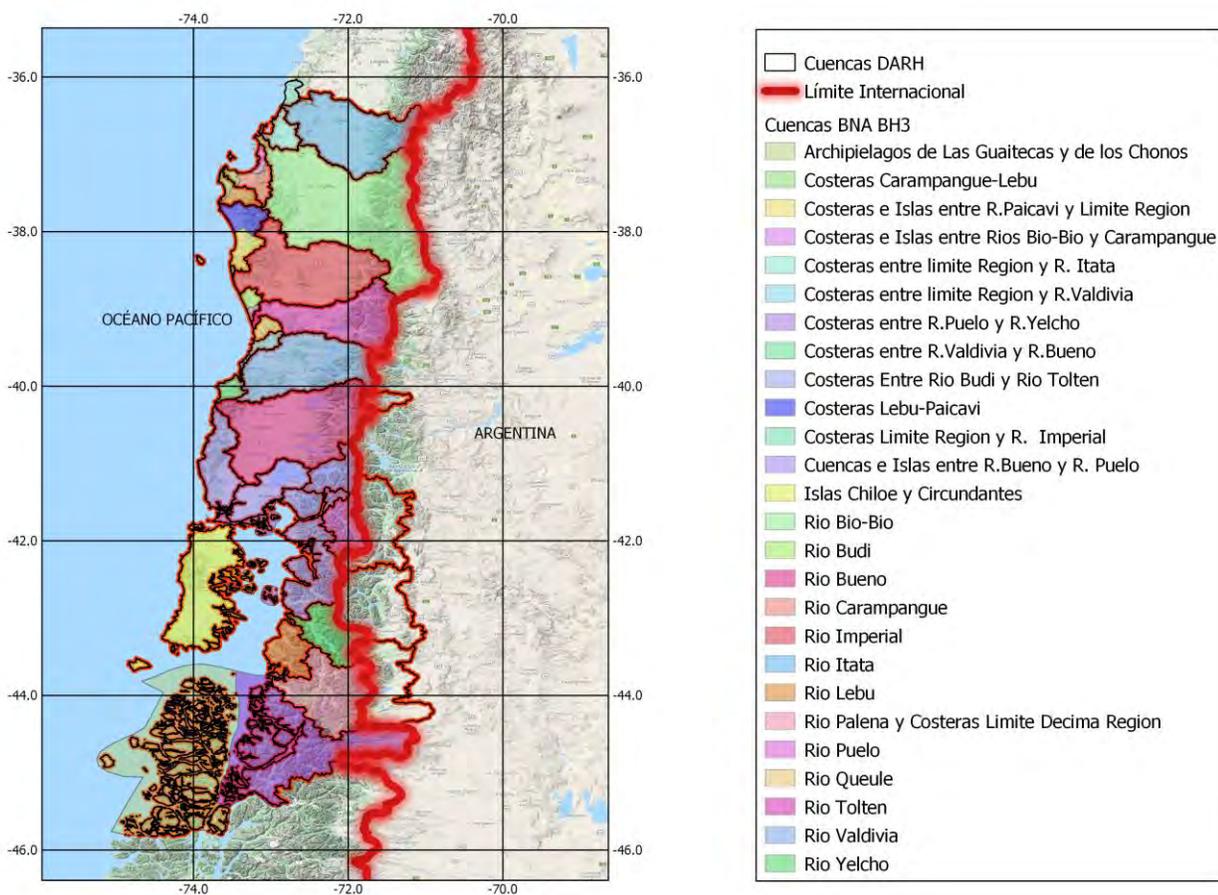


Figura 7.10: Esquema de superposición entre cuencas DARH y cuencas BNA. Para efectos de visualización, se suprimen de la leyenda algunas cuencas Costeras.

Tabla 7.4: Equivalencia entre cuencas DARH y cuencas BNA y sus respectivas superficies.

Código DARH	Nombre DARH	Área DARH [km <sup>2</sup> ]	Código BNA	Nombre BNA	Área BNA <sup>16</sup> [km <sup>2</sup> ]	Diferencia en superficie
800	Costeras entre límite Regional e R. Itata	548	80	Costeras entre límite Region y R, Itata	615	-12,3%
801	Río Itata	11432	81	Río Itata	11316	1,0%
802	Costeras e Islas entre Río Itata y Río Biobío	1497	82	Costeras e Islas entre Río Itata y Río Bio-Bio	1500	-0,2%
803	Río Biobío	24309	83	Río Bio-Bio	24346	-0,2%
804	Arauco	1919	84	Costeras e Islas entre Ríos Bio-Bio y Carampangue	394	-2,3%
			85	Río Carampangue	1259	
			86	Costeras Carampangue-Lebu <sup>17</sup>	622	
805	Costeras entre Punta Lavapié y Río Lebu	1197	87	Río Lebu	855	2,6%
806	Costeras entre Lebu y Tirúa	3054	88	Costeras Lebu-Paicavi	1691	-0,8%
			89	Costeras e Islas entre R,Paicavi y Limite Region	1387	

<sup>16</sup> La superficie de las cuencas BNA se calcula mediante los polígonos georeferenciados entregados en este estudio y no corresponden necesariamente a las superficie terrestre pues incorpora en algunos casos parte del océano.

<sup>17</sup> La cuenca de código BNA 86, comparte su territorio en las cuencas DARH códigos 804 y 805, para determinar la diferencia de superficie simplemente se divide la superficie de la cuenca BNA 86 en dos.

Código DARH	Nombre DARH	Área DARH [km <sup>2</sup> ]	Código BNA	Nombre BNA	Área BNA <sup>16</sup> [km <sup>2</sup> ]	Diferencia en superficie
900	Río Imperial	12647	91	Río Imperial	12648	0,0%
901	Cuencas Costeras entre límite Región y Río Imperial	52	90	Costeras Limite Region y R. Imperial	67	-29,9%
902	Cuencas Costeras entre Río Imperial y Río Toltén	660	92	Rio Budi	496	0,2%
			93	Costeras Entre Rio Budi y Rio Tolten	163	
903	Río Toltén	8508	94	Río Toltén	8440	0,8%
904	Río Queule	696	95	Río Queule	698	-0,3%
1000	Cuencas Costeras entre Río Bueno y Río Maullín	4094	104	Cuencas e Islas entre R. Bueno y R. Puelo	13580	-3,6%
1001	Río Maullín	3866				
1002	Cuencas Costeras e Islas entre Río Maullín y Río Chamiza	638				
1003	Cuencas Costeras entre Río Chamiza y Río Petrohué	1382				
1004	Río Petrohué y Lago Todos Los Santos	2656				

Código DARH	Nombre DARH	Área DARH [km <sup>2</sup> ]	Código BNA	Nombre BNA	Área BNA <sup>16</sup> [km <sup>2</sup> ]	Diferencia en superficie
1005	Cuencas Costeras entre Río Petrohué y Río Puelo	477				
1006	Río Puelo	9186	105	Río Puelo	3092	197,1%
1007	Cuencas Costeras entre Río Puelo y Río Yelcho	5876	106	Costeras entre R,Puelo y R,Yelcho	6224	-5,6%
1008	Río Yelcho	11398	107	Río Yelcho	4081	179,3%
1009	Cuencas Costeras entre Río Yelcho y límite Regional	2710	108	Costeras entre R,Yelcho y limite Regional	2733	-0,9%
1010	Cuencas Islas Chiloé y Circundantes	9262	109	Islas Chiloe y Circundantes	10009	-7,5%
1100	Río Palena y Costera hasta límite Decima Región	13724	110	Rio Palena y Costeras Limite Decima Region	7725	77,7%
1101	Cuencas Costeras e Islas entre Río Palena y Río Aysén	12533	111	Costeras e Islas entre R,Palena y R,Aisen	17174	-27,0%
1102	Cuencas del Archipiélago de Las Guaitecas y de los Chonos	9363	112	Archipiélagos de Las Guaitecas y de los Chonos	24196	-61,3%

Código DARH	Nombre DARH	Área DARH [km <sup>2</sup> ]	Código BNA	Nombre BNA	Área BNA <sup>16</sup> [km <sup>2</sup> ]	Diferencia en superficie
1400	Cuencas Costeras Los Ríos Norte	726	100	Costeras entre limite Region y R. Valdivia	742	-2,1%
1401	Río Valdivia	10324	101	Río Valdivia	10229	0,9%
1402	Cuencas Costeras entre Río Valdivia y Río Bueno	762	102	Costeras entre R. Valdivia y R. Bueno <sup>18</sup>	760	0,2%
1403	Río Bueno	15159	103	Río Bueno	15340	-1,2%

La comparación de balances a nivel de cuencas DARH (CIREN) realizado entre el periodo de tiempo de análisis del presente estudio y DGA (1987) muestra que para gran parte de las cuencas analizadas tendría entre un 3% y un 32% menos de disponibilidad de caudal, y que en los ríos Bio-Bío, Imperial y Queule se habría tenido aumentos muy significativos en escorrentía (Tabla 7.5). Visualmente los cambios en las principales componentes del balance se muestran en la Figura 7.11.

---

<sup>18</sup> En el estudio DGA (1987), no fue posible encontrar el valor informado para la cuenca BNA 102.

**Tabla 7.5: Variaciones de distintas componentes del balance hídrico entre los periodos DGA periodo actual (1985-2015) y periodo pasado (1955-1985).**

Código DARH	Nombre	$\Delta P$ [mm]	$\Delta Q$ [mm]	$\Delta ET$ [mm]	$\Delta P$ [%]	$\Delta Q$ [%]	$\Delta ET$ [%]
800	Costeras entre límite Regional e R. Itata	214,9	230,8	-15,5	27%	89%	-3%
801	Río Itata	-136,6	-31,2	-133,4	-9%	-3%	-23%
802	Costeras e Islas entre Río Itata y Río Biobío	-139,2	-76,7	-61,5	-12%	-14%	-9%
803	Río Biobío	-181,1	273,3	-164	-10%	27%	-27%
900	Río Imperial	-76,2	27,1	-106,4	-5%	3%	-18%
901	Cuencas Costeras entre límite Región y Río Imperial	-315,4	-333,4	-35,8	-17%	-27%	-6%
903	Río Toltén	-609,5	-398,1	-214,5	-21%	-17%	-36%
904	Río Queule	196,4	323,1	-126,2	13%	36%	-20%
1400	Cuencas Costeras Los Ríos Norte	342,3	381,3	-38,8	22%	43%	-6%
1401	Río Valdivia	-394,3	-278,3	-136,3	-15%	-13%	-23%
1403	Río Bueno	-145,4	-132,9	-27,1	-6%	-7%	-5%
1006	Río Puelo	-602,1	-339	-269,5	-20%	-13%	-59%
1007	Cuencas Costeras entre Río Puelo y Río Yelcho	-1566,5	-1397,8	-174,5	-32%	-32%	-34%
1008	Río Yelcho	-759	-557,8	-183,7	-26%	-22%	-45%
1009	Cuencas Costeras entre Río Yelcho y límite Regional	-95,7	-24,7	7,4	-3%	-1%	2%
1010	Cuencas Islas Chiloé y Circundantes	-520,5	-514,7	-3,1	-21%	-27%	-1%
1100	Río Palena y Costera hasta límite Décima Región	-557,8	-368,6	-191,5	-22%	-17%	-43%
1101	Cuencas Costeras e Islas entre Río Palena y Río Aysén	-939	-914,9	-33,02	-26%	-29%	-8%
1102	Cuencas del Archipiélago de Las Guaitecas y de los Chonos	-269,7	-291,9	25,8	-10%	-13%	5%

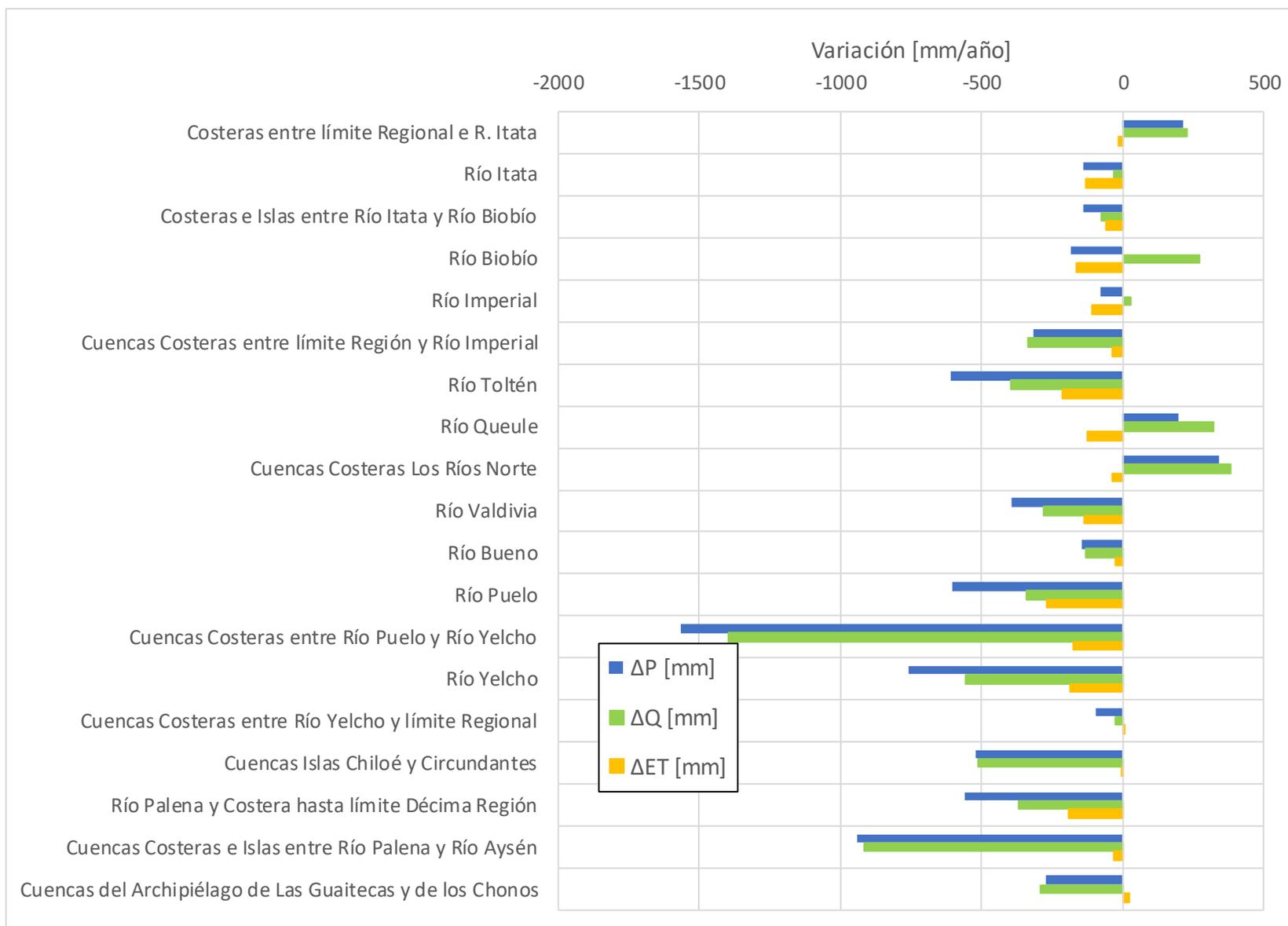


Figura 7.11 Comparación principales componentes del balance hídrico en zona de estudio para las cuencas donde se encontró equivalencia entre códigos BNA y DARH

## 7.4 BALANCE HÍDRICO BAJO CAMBIO CLIMÁTICO

Con la regionalización de parámetros y las forzantes de cambio climático, es posible correr el modelo VIC para toda la zona de estudio. Se obtiene para cada una de las cuencas DGA-CIREN, la variación en precipitación, temperatura y escorrentía. En la Figura 7.12 se presenta el balance de masa adimensional según los cuatro GCMs considerados. Se aprecia que, respecto al balance de masa de la Figura 7.5, existe un aumento de la importancia de la evapotranspiración y una disminución del volumen de escorrentía, siendo el más severo en las reducciones de caudal el modelo IPSL-CM5A-LR (“IPSL”). Para simplificar la notación, al GCM CSIRO-Mk3.6.0 se le denota como “CSIRO” y MIROC-ESM como “MIROC”.

Otro de los aspectos a analizar, son las estimaciones de la variación de los tres flujos hidrológicos más importante: precipitación, escorrentía y evapotranspiración. Debido al efecto del cambio climático, se espera una reducción generalizada de la precipitación en toda la zona de estudio, tal como se aprecia en la Figura 7.13. Esta reducción provoca, en todas las cuencas y para todos los GCMs, una reducción en la escorrentía, no así de la evapotranspiración. Esta última variable tiene un comportamiento variable según la cuenca que se analice.

Para encontrar patrones espaciales de reducción en escorrentía y evapotranspiración, se muestra en la Figura 7.14 las variaciones promedio según los cuatro GCMs de la precipitación ( $\Delta P$ , panel izquierdo, la evapotranspiración anual ( $\Delta ET$ , panel central) y escorrentía ( $\Delta Q$ , panel derecho). Se aprecian grandes disminuciones de escorrentía en (i) aquellas zonas de mayor precipitación (zonas cordilleranas) y (ii) zonas con aumentos de evapotranspiración natural. Se aprecia que existen diferencias en las variaciones entre zonas de valle y cordillera, donde las precipitaciones suelen ser mayores. Los cambios por cuenca, por variable y GCM se presentan en el Anexo G, en donde además se muestran las proyecciones por periodos 2030-2040, 2040-2050 y 2050-2060 así como para el periodo histórico de cada GCM.

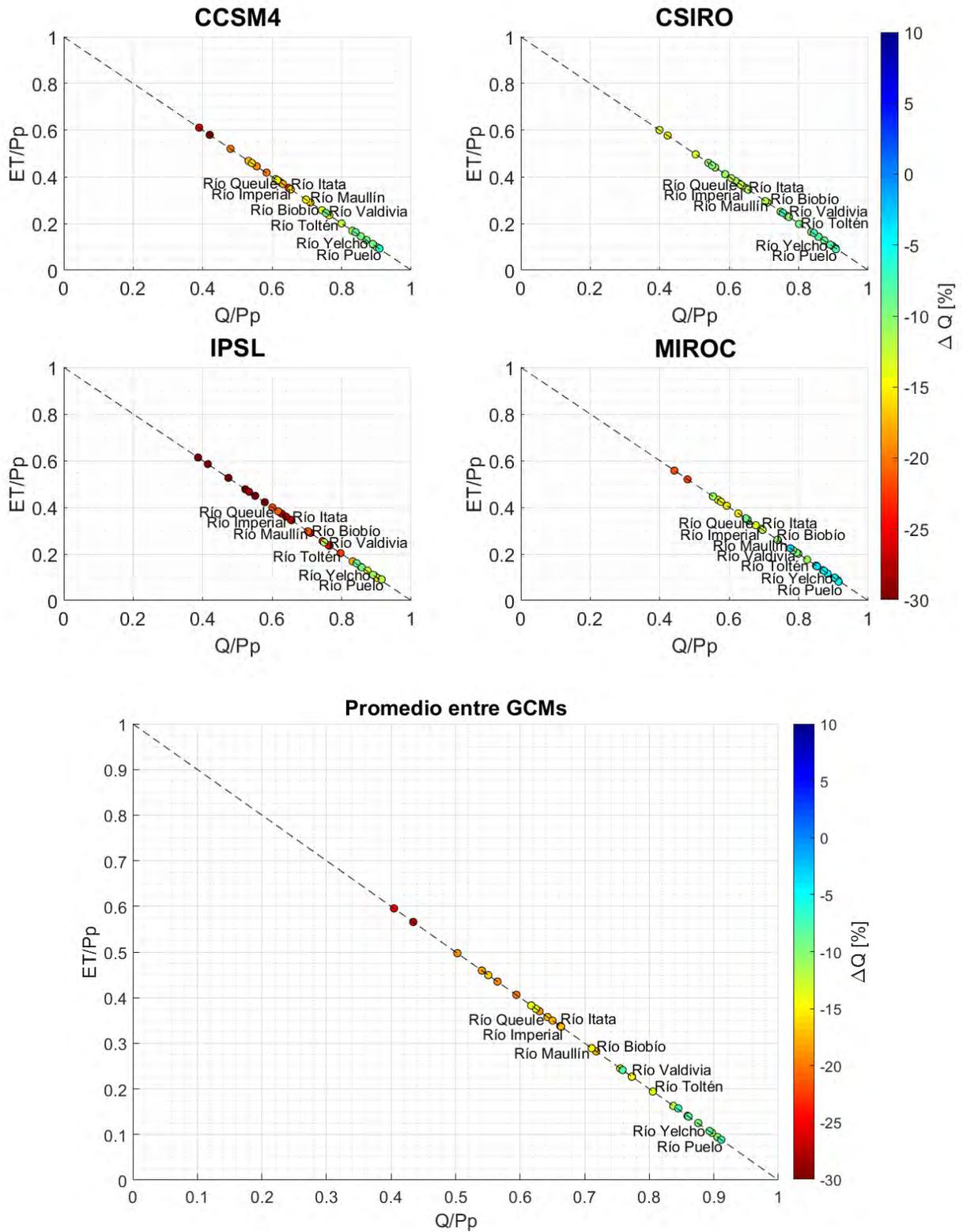


Figura 7.12: Balance de masa adimensional para las cuencas DARH-CIREN bajo cambio climático. Periodo abr/2030-mar/2060. Variación de escorrentía respecto al periodo abr/1985-mar/2015. GCMs CCSM4, CSIRO Mk3.6.0 (CSIRO), IPSL-CM5A-LR (IPSL) y MIROC-ESM (MIROC). Panel inferior, variación promedio entre los cuatro GCMs.

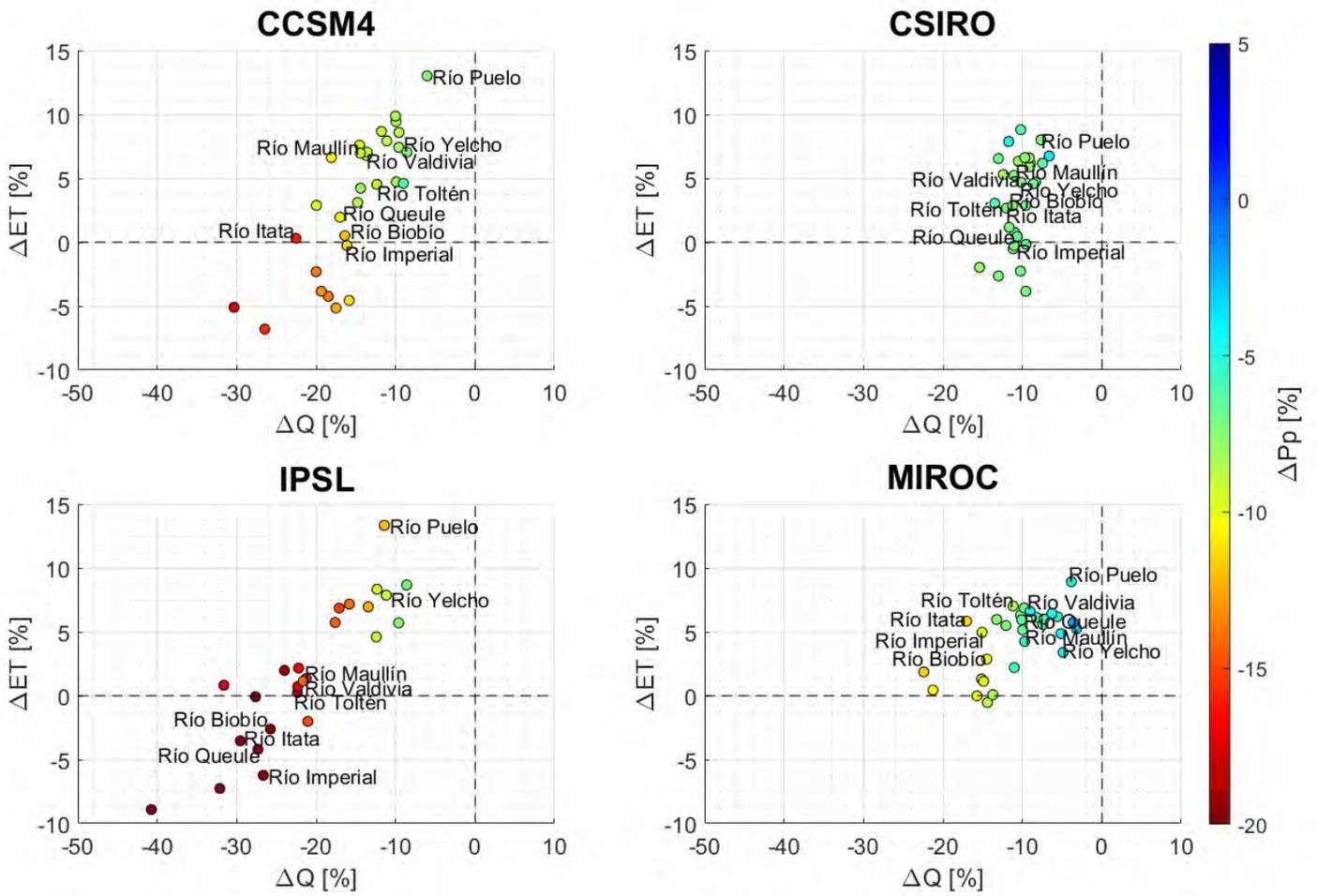


Figura 7.13: Variación de la precipitación, escorrentía y evapotranspiración para cada uno de los modelos seleccionados en las cuencas DGA-CIREN. El contraste se realiza entre los periodos abr/2030-mar2060 y abr/1985-mar/2015. GCMs CCSM4, CSIRO Mk3.6.0 (CSIRO), IPSL-CM5A-LR (IPSL) y MIROC-ESM (MIROC).

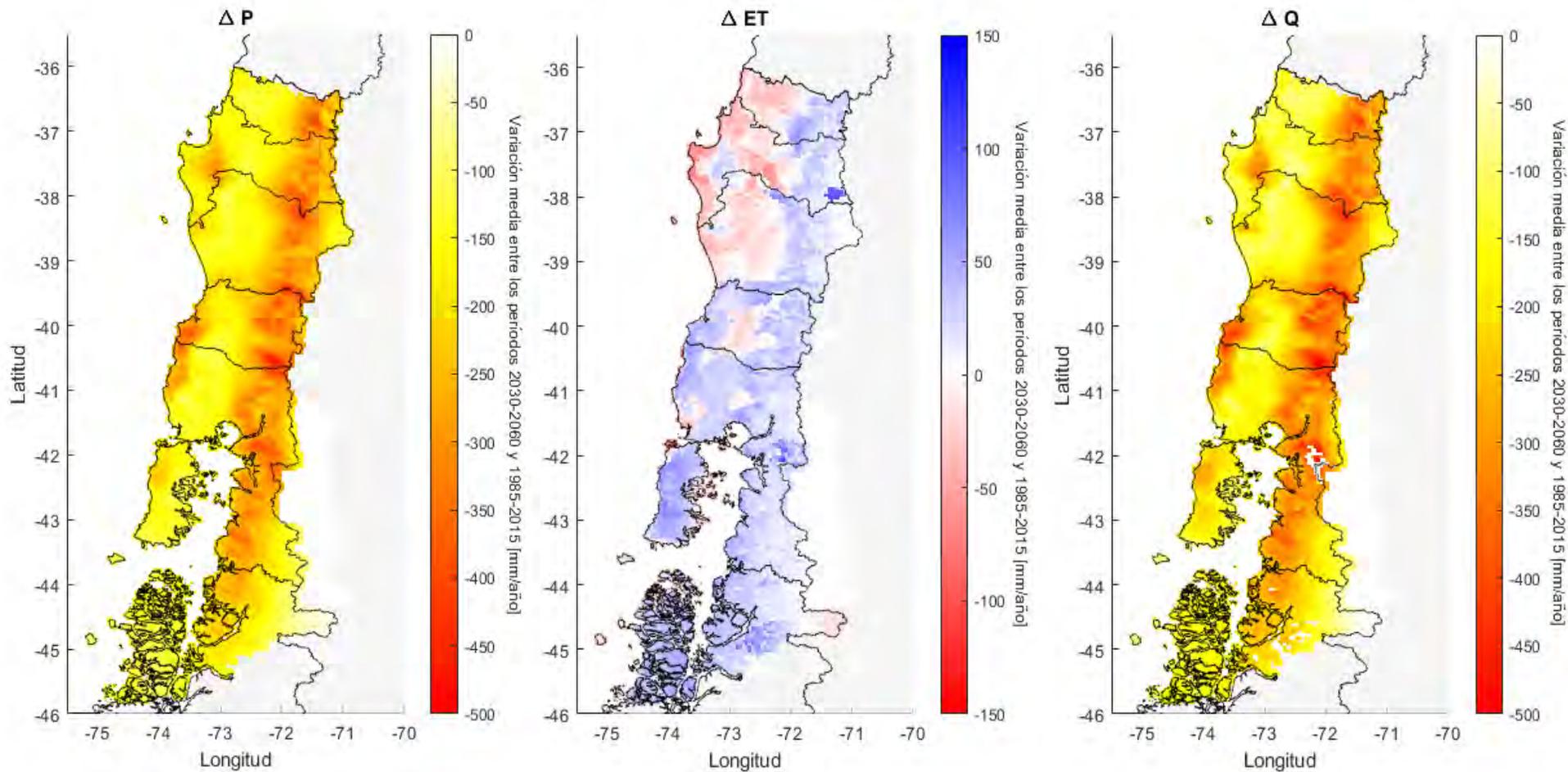


Figura 7.14: Variación promedio entre los cuatro GCMs seleccionados para los flujos de precipitación (panel izquierdo), evapotranspiración (panel central) y escorrentía (panel derecho). Los periodos de comparación corresponden a abr/2030-mar/2060 y abr/1985-mar/2015.

## 7.5 CONCLUSIONES CAPÍTULO VII

Los principales resultados de este capítulo comprenden la estimación del balance hídrico propiamente tal en todas las cuencas DARH de la zona de estudio. Los resultados muestran una fuerte dependencia en la escorrentía respecto a la magnitud de precipitación, tendiendo a ser mayor en las zonas cordilleranas, sin embargo, se aprecia también el efecto de la evapotranspiración, especialmente en sectores con presencia de riego en donde las tasas de flujo de agua hacia la atmósfera son mayores.

En la medida en que se avanza hacia el sur, el balance hídrico está dominado por un coeficiente de escorrentía superior a 0,5, indicando que la mayor parte de la precipitación se transforma en escorrentía. Mientras que aquellas cuencas de latitudes cercanas a la zona centro, aún están dominadas por la evapotranspiración.

Al comparar el balance hídrico presente con el histórico (DGA, 1987), es posible notar que prácticamente para todo el territorio, ha disminuido la escorrentía media en promedio un -17%. En las cuencas donde se reporta un incremento respecto al balance antiguo el promedio es de un 40%, valor fuertemente influenciado por la cuenca DARH 800. Dada la diferencia entre las proyecciones, se recalca una vez más, que estas diferencias no necesariamente son atribuibles a cambio climático, sino que además a un cambio metodológico desde la concepción de las forzantes, y distintas componentes del ciclo hidrológico.

Finalmente, en términos de cambio climático, en todas las cuencas y para todos los escenarios se proyecta una disminución en escorrentía y precipitación media, teniendo proyecciones tanto al incremento de ET como de menores flujos de esta componente. Dada la importancia de estos resultados, resulta fundamental visitar la gobernanza del agua en escenarios en donde una demanda creciente de agua, sumados a una disminución natural en la oferta, generarían para los cuatro GCMs analizados condiciones medias de estrés hídrico.

## 8 PROYECTO SIG

Un sistema de información geográfica (SIG) es un sistema que permite la organización, almacenamiento, manipulación y análisis de la información espacial de aspectos temáticos como características biofísicas de un territorio, con la finalidad de comprender las dinámicas espaciales de estas variables y así mejorar la toma de decisiones dentro del territorio.

A lo largo del presente estudio, se ha entregado información sobre forzantes hidrometeorológicas, el principal insumo para realizar el balance hídrico. Del mismo modo se realizó modelación hidrológica a paso temporal cada tres horas, calibrando en cuencas definidas en régimen natural, para posteriormente regionalizar parámetros calibrados al resto de la zona de estudio. Tanto las forzantes meteorológicas como los modelos hidrológicos parten de una unidad de modelación cuadrada de  $0,05^{\circ} \times 0,05^{\circ}$  de latitud/longitud. El plasmar toda esta información espacial y temporal de forma concisa en un proyecto SIG, requiere un diseño que permita reproducir la mayor cantidad de información generada.

Con el fin de cumplir con el objetivo anteriormente expuesto, se desarrolló un proyecto SIG con el fin de organizar la información espacio/temporal generada en el proyecto. Esta herramienta garantiza la disponibilidad de la información de una manera clara e intuitiva, de modo que, el usuario pueda acceder fácilmente y resolver una consulta de manera eficaz. Para ello, la información contenida en el SIG fue dispuesta en diferentes formatos, vectoriales, ráster y en Geodatabases, para que pueda ser consultada por usuarios con distinto nivel de expertiz en SIG.

Con el fin de proporcionar las suficientes indicaciones para el correcto funcionamiento del proyecto SIG, este capítulo está dividido en 4 sub temas, en primer lugar, se presentan los antecedentes de la elaboración del proyecto SIG, en segundo lugar, se presenta un resumen de las variables representadas, posteriormente, se explican los diferentes formatos utilizadas para presentar la información y finalmente se expone la estructura de ubicación de la información, de manera que el acceso sea claro e intuitivo.

### 8.1 ANTECEDENTES DEL PROYECTOS SIG

El presente proyecto mantiene la estructura de DGA (2018), pero aplicado a otra zona geográfica. De esta forma, es posible compatibilizar la información desarrollada en ambos estudios. Un resumen del flujo de trabajo desarrollado en DGA (2018) se presenta en la Figura 8.1. e involucra los siguientes pasos:

- i. Reunión de coordinación, para definir alcances y recibir retroalimentación de la contraparte.
- ii. Recopilación y sistematización de resultados
- iii. Creación de árbol de directorios y ordenamiento general de la información.
- iv. Estructuración del proyecto en ArcGIS v10.2 por medio de *geodatabases*.
- v. Creación de mapas en formatos de almacenamiento de información (mxd y png).

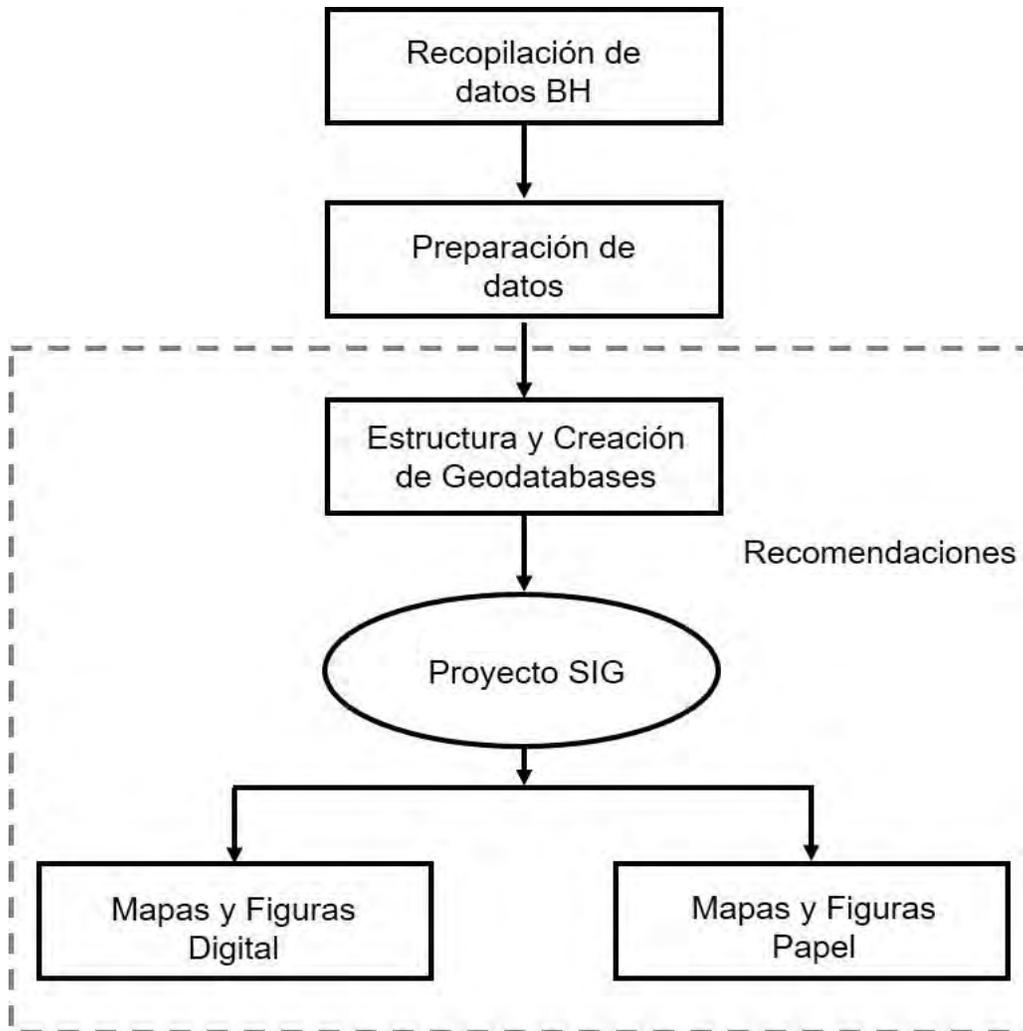


Figura 8.1: Pasos metodológicos para la creación del proyecto SIG propuesto. Fuente: DGA (2017)

## 8.2 RESUMEN DE VARIABLES PRESENTADAS

Una vez acordados los antecedentes con la contraparte, y para no sobrecargar el proyecto SIG con información a escala tan fina se resuelve presentar los resultados de las forzantes meteorológicas, así como flujos y almacenamientos del modelo hidrológico VIC a escala mensual para toda la macrozona de estudio, manteniendo la resolución espacial de  $0,05^{\circ} \times 0,05^{\circ}$  LatitudxLongitud. Esta información se presenta para el periodo histórico (1985-2015) y para proyecciones futuras en el escenario climático RCP8.5 para el periodo (2030-2060) en cuatro modelos de circulación general: IPSL, CCSM4, MIROC y CSIRO.

Las variables analizadas en este proyecto se organizan en dos grupos, las primeras corresponden a las forzantes meteorológicas, las cuales fueron utilizadas como entradas del modelo VIC. Mientras que las segundas corresponden a variables de estado o flujos del modelo hidrológico VIC. Aquellas variables que se recopilan en el proyecto SIG se describen en los siguientes numerales.

### 8.2.1 FORZANTES METEOROLÓGICAS

Las forzantes meteorológicas contenidas en el proyecto SIG corresponden a:

- i. **Temperaturas: media, mínima y máxima:** En ráster y en vector [°C], promedios para cada mes. Del mismo modo se presentan archivos NetCDF a escala media diaria diaria.
- i. **Precipitación acumulada:** En ráster y en vector [mm/mes], en formato NetCDF en [mm/día]
- ii. **Humedad relativa:** En ráster y en vector [%] promedio mensual, en formato NetCDF [%] medio diario.
- iii. **Velocidad de viento:** En ráster y en vector [m/s] promedio mensual, en nc [m/s] medio diario.

Las variables mencionadas fueron espacializadas para el área de estudio, comprendida entre las latitudes -45,85° a los -55,15° y las longitudes -75,20 a los -67,50°, utilizando una resolución espacial de 0,05° decimales, equivalentes a 5 km aproximadamente.

### 8.2.2 RESULTADOS DE MODELO VIC

Se procesan ocho variables de salida del modelo VIC. Estas fueron seleccionadas dado que representan procesos y estados del ciclo hidrológico que permiten caracterizar el balance hídrico de una cuenca. Las variables seleccionadas son:

- ii. **ET:** evapotranspiración natural según VIC. En ráster y en vector [mm/mes], en nc [mm/d]
- iii. **fsca:** *Fractional Snow Covered Area*, fracción de área cubierta por nieve [adimensional, 0-1]
- iv. **Escorrentía (Runoff):** escorrentía superficial. En ráster y en vector [mm/mes], en nc [mm/d]
- v. **Recarga:** En ráster [mm/mes], en vector y nc [mm/d]<sup>19</sup>
- vi. **Riego:** Riego mensual. En ráster y en vector [mm/mes], en nc [mm/d]
- vii. **SM:** *Soil moisture* suma del agua en las 3 capas de suelo. En ráster y en vector [mm/mes], en nc [mm/d]
- viii. **SWE:** Snow Water Equivalent. En ráster y en vector [mm/mes], en nc [mm/d]

Al igual que para las forzantes meteorológicas, estas variables poseen las mismas características espaciales y temporales. El periodo de tiempo utilizado corresponde a 1985-2015 y análogamente, se presentan también las proyecciones de estas variables para cada uno de los cuatro modelos de cambio climático durante el periodo 2030-2060.

### 8.2.3 INFORMACIÓN BALANCE HÍDRICO DGA (1987)

Con el fin de tener condensada en un solo proyecto SIG información obtenida del presente estudio con el balance DGA (1987), existiendo información tanto vectorial como rasterizada y sus respectivas geodatabases según las salidas correspondientes a dicho estudio, siendo las principales: Precipitación anual promedio, Temperatura media anual y escorrentía anual promedio.

---

<sup>19</sup> Esta variable se calcula de manera externa, según lo presentado en la sección 7.1.

### 8.3 FORMATOS DISPONIBLES

El Proyecto SIG ha sido condicionado para que pueda ser consultado rápida y eficazmente por un usuario experto y por un usuario general. Para ello, la información fue dispuesta en diferentes formatos a modo de satisfacer los requerimientos de cada usuario. A continuación, se describen los formatos disponibles presentados en el proyecto SIG

- **Netcdf:** corresponden a los archivos con extensión “.nc” y es un formato utilizado para comprimir grandes volúmenes de información. En estos archivos están contenida la información mensualizada de las forzantes meteorológicas y las variables obtenidas del modelo VIC
- **Ráster:** son los archivos con extensión “.tif” y corresponden a matrices que almacenan información espacial georreferenciada de una variable numérica del territorio, por ejemplo, la temperatura media. De esta manera, cada celda de la matriz representa una superficie del territorio, en este caso, la superficie representada por cada celda es un cuadrado de lado de 0,5°decimales, 5 km aproximadamente.

En el presente proyecto a partir de los archivos “.nc” se crearon 13 ráster con las composiciones históricas mensuales (enero a diciembre) y un promedio anual, de cada variable para el periodo 1985-2015 y para el escenario de cambio climático 2030-2060

- **Vectores:** Corresponden a archivos con la extensión “.shp” y son archivos espaciales georreferenciados de puntos, líneas o polígonos que almacenan información numérica y de caracteres. Su ventaja es que cada figura del archivo puede almacenar varios atributos (tabla de atributos), por ejemplo, un polígono de una cuenca hidrográfica puede tener asociada la información histórica de su caudal efluente.

En este proyecto se utilizaron archivos vectoriales para presentar la información desagregada por mes/año de las variables analizadas. Es decir, que para cada variable se creó una capa vectorial con celdas equivalentes a los productos ráster, de manera que, en la tabla de atributos aparece cada celda con el registro de sus magnitudes históricas con un periodo mensual y una composición anual histórica para el periodo 1985-2015 y para 2030-2060. De esta manera, estos archivos permiten acceder de manera rápida a los registros históricos de cada variables y realizar cálculos estadísticos para cada zona de área estudiada. Por consiguiente, un usuario puede ahorrar tiempo para realizar sus consultas.

Otros atributos presentes en los archivos vectoriales corresponden a región, comuna, provincia, código de cuenca BNA (Cuenca\_BNA) y código de cuenca DARH (Cuenca\_DAR) para cada celda presente en la zona estudio.

- **Gdb:** Es un formato de archivo propio de ArcGIS, el cual es ampliamente utilizado para comprimir y administrar la información geográfica tanto ráster como vectorial. De esta manera, la información puede ser fácilmente administrada, editada y transferible a otro usuario evitando el

riesgo de pérdida de información. Existen archivos “Gdb” de los productos raster y vectoriales descritos anteriormente, condensados todos en un único archivo.

- **Mxd:** los archivos con extensión “.mxd” son propios del software ArcGIS, contruidos para la versión 10.2 y tienen la función de visualizar de manera interactiva los archivos ráster y vectoriales utilizados para la construcción de los mapas que se realizaron para cada variable. Este tipo de archivos no se generó para cada una de las variables del balance, sino que para aquellas presentadas en el Anexo K: Atlas de Mapas correspondientes a información relevante generada en el proyecto como:
  - Demanda de cultivos
  - Evapotranspiración.
  - Cobertura de nieve.
  - Humedad de suelo.
  - Equivalente en agua de nieve.
  - Precipitación.
  - Temperaturas extremas y media.
  - Cuencas DARH representativas de la zona de estudio.

Esta información existe tanto para el periodo histórico como para proyecciones futuras.

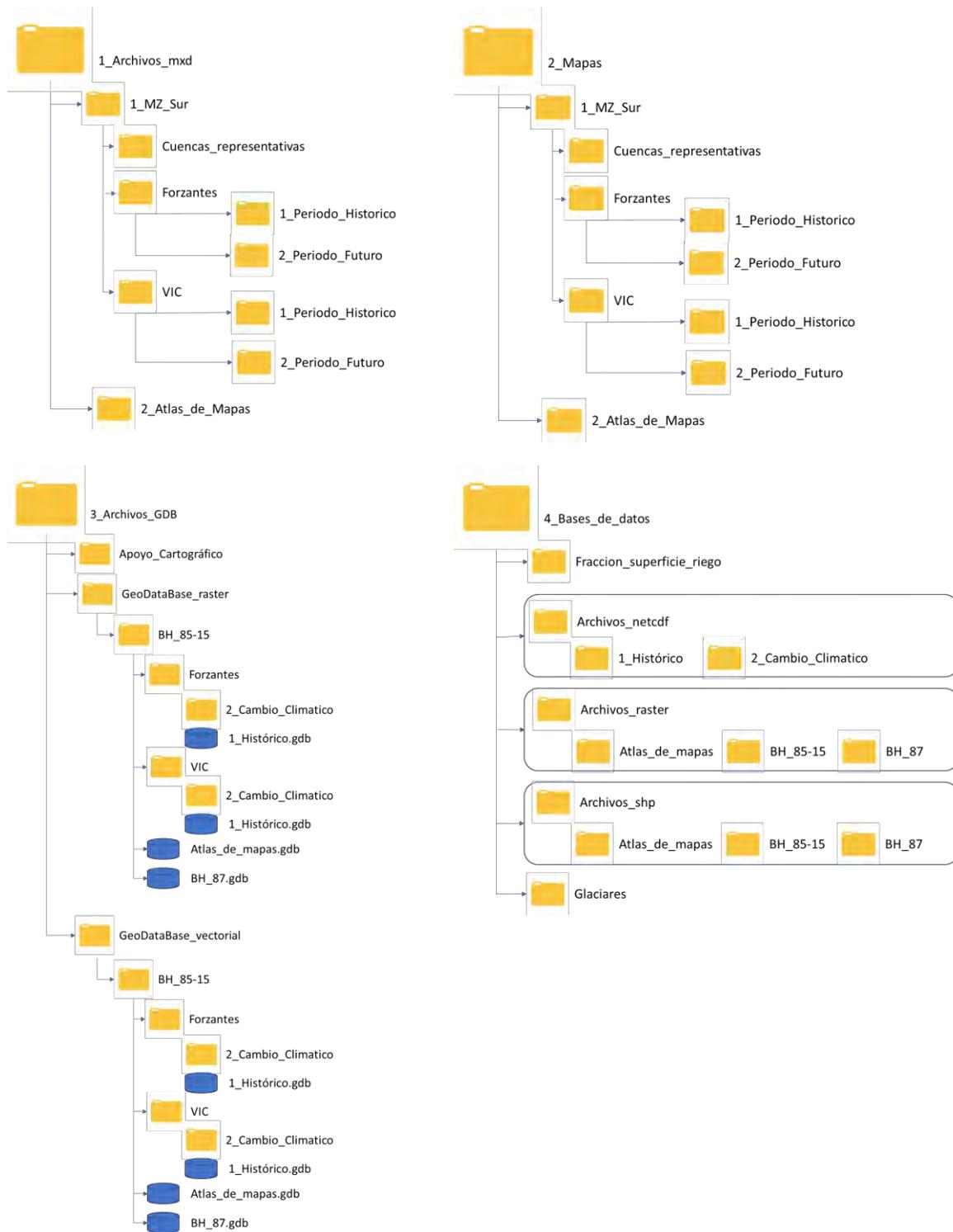
- **Mapas:** corresponden a las cartografías en formato png y pdf de las composiciones finales que se realizaron para presentar los resultados de cada variable y que se encuentran disponibles en el cuerpo de este informe como en el Anexo K (Anexo Cartográfico): Atlas de Mapas.

## 8.4 ESTRUCTURA DE DIRECTORIOS

Los productos mencionados anteriormente, se encuentran organizados en el Proyecto SIG mediante un árbol de directorios compuesto de 4 carpetas principales, que se detalla en la Figura 8.2. Este árbol de directorios busca acceder a la información temática del proyecto SIG de forma rápida e intuitiva, de esta manera, considera una organización en carpetas temáticas, las cuales presentan una estructura base, de acuerdo con las variables obtenidas durante el proyecto. En general, la estructura consiste en una primera ramificación que separa los resultados de las composiciones del atlas de mapas y por otra parte, los resultados generados de las forzantes y salidas del VIC, las que a su vez, se ramifican en el periodo histórico y futuro. A continuación, se presentan las carpetas principales del Proyecto SIG.

- 1) **1\_Archivos mxd:** En esta carpeta se encuentran los archivos. mxd de las composiciones generadas. En esta carpeta se pueden encontrar los directorios 1\_MZ\_Sur y 2\_Atlas\_de\_Mapas. La primera de las carpetas despliega la información de cuencas representativas, forzantes meteorológicas y salidas de VIC, tanto para el periodo histórico como para el periodo futuro.
- 2) **2\_Mapas:** En este directorio se encuentran los mapas generados por los archivos .mxd en formato png pdf. Los subdirectorios corresponden a: 1\_MZ\_Sur y 2\_Atlas\_de\_Mapas. La información es idéntica a la existente en el directorio “1\_Archivos\_mxd” con la diferencia que al interior de cada carpeta se encuentran archivos pdf y png de los mapas en formato Atlas del Agua (DGA, 2015).

- 3) 3\_Archivos GBD:** Directorio donde se encuentran los archivos .gdb correspondiente a la base de datos espacial que contienen a los archivos ráster y vectores generados para cada variable. Los subdirectorios de esta carpeta son: Apoyo\_Cartográfico, GeoDataBase\_raster y GeoDataBase\_vectorial.
- a. Dentro de la carpeta “Apoyo\_Cartográfico”, es posible encontrar información necesaria para la creación de los Mapas como: Archivos lyr (para etiquetas), Carta base, Cuencas representativas, esquicios y el DEM SRTM en datum 19S.
  - b. En la carpeta GeoDataBase\_raster se encuentran directorios del presente proyecto (BH\_85-15), y archivos GDB con los Atlas de mapas y resultados del balance DGA (1987). La subcarpeta BH\_85-15 tiene salidas de Forzantes y del modelo VIC. Dentro de las carpetas tituladas “2\_Cambio\_Climatico” se encuentran los archivos GDB obtenidos al escalar los 4 GCMs al productoCR2MET para el periodo futuro y las salidas de VIC al ser forzados con cada uno de los GCMs usados en este estudio. Por estética no se muestran los archivos GDB en la Figura 8.2.
  - c. En la GeoDataBase\_vectorial, se encuentran exactamente el mismo tipo de archivos que los descritos en la GeoDataBase\_raster, con la diferencia que los archivos vectoriales poseen mayor cantidad de atributos y la serie temporal tanto de forzantes como de simulaciones de VIC según lo descrito en el numeral 8.3.
- 4) 4\_ Base de datos:** Presenta los mismos archivos almacenados en la Geodatabase y las salidas de glaciares en su formato original (tif, shp, netcdf) De este modo, los archivos pueden ser utilizadas por cualquier usuario que no maneje estructuras Geodatabase, ni ArcGIS.
- a. La carpeta Fracción\_superficie\_riego, contiene el archivo raster con la máscara utilizada en la modelación para estimar el riego en cada una de las cuencas.
  - b. La carpeta Archivos netcdf, contiene para el periodo histórico y futuro, los archivos con extensión NetCDF mensuales utilizados para construir la información vectorial y raster.
  - c. En Archivos\_raster, encontramos el archivos en formato .tif del Anexo K (Atlas\_de\_mapas), BH\_85-15, contiene el resto de la información ráster del proyecto SIG descrita en este capítulo, existiendo resultados tanto para el periodo histórico como para cada uno de los GCM en el periodo futuro. Por último, en BH\_87, se muestran los ráster generados a partir del estudio DGA (1987).
  - d. Archivos\_shp, muestra los archivos vectoriales descritos en el numeral 8.3, con las capas utilizadas para el Atlas de mapas (Anexo K), forzantes y salidas de VIC para el presente proyecto en el periodo histórico y futuro (BH\_85\_15) y finalmente en BH\_87 los archivos vectoriales del estudio DGA (1987).



**Figura 8.2: Estructura del árbol de directorios del proyecto SIG para la macrozona Sur y parte norte de la macrozona Austral. En la carpeta 4, se muestra encuadrado lo que pertenece a las carpetas pertenecientes al directorio que se muestra en el primer nivel.**

Se menciona que, a diferencia del proyecto SIG del proyecto DGA (2018), en donde se diseñó una herramienta de consulta en ArcGIS con su respectivo manual, en esta ocasión no se incluye dicha información, puesto que en el marco del proyecto “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” se está implementando una herramienta de consulta que permite para diversas cuencas, y regiones administrativas consultar los productos derivados de el presente proyecto y su etapa pervia (DGA, 2018).

Dentro de cada directorio de la Figura 8.2, no se muestran subdirectorios que incluyen principalmente archivos GDB de los distintos modelos de circulación general. Esta información sumados al número de archivos y peso estimado de cada carpeta, se encuentran disponibles en la carpeta “Proyecto\_SIG\_B4”, junto al archivo “5\_Contenido\_Carpeta\_SIG\_HB4.xlsx”, el cual resume el contenido de estas. Finalmente, los archivos que condensan demasiada información (.nc) se presentan comprimidos en formato RAR. De esta manera, es el usuario quien debe, en primer lugar, verificar las limitantes de espacio en disco del equipo que utilice, y luego descomprimir los archivos para luego analizarlos con alguna herramienta de consulta.

## 9 CONCLUSIONES

La información de forzantes meteorológicas actual permite realizar adecuadamente simulaciones hidrológicas como una primera aproximación para abordar este proyecto, pues se obtienen resultados satisfactorios para gran parte de las cuencas. No se observan sesgos considerables ni inconsistencias con los regímenes hidro-climáticos. Sin embargo, existen potenciales mejoras, como la actualización de productos intermedios de reanálisis, que podrían beneficiar el proceso de calibración y subsanar la subestimación de caudales simulados respecto a observaciones en cuencas en régimen natural. Adicionalmente, resulta necesario evaluar cuáles son las zonas de mayor incertidumbre, en base a los procesos usados para desarrollar las forzantes.

Con relación a la modelación hidrológica, es importante recalcar que la modelación simplificada de lagos como cuerpo de agua sin capacidad de regulación presentó el mejor desempeño de todas las metodologías expuestas, supuesto que parece razonable dado que se desconocen las curvas de embalse de los cuerpos de agua y sus vertimientos, que permitirían mejorar un ajuste bajo otra conceptualización de los modelos. Las consecuencias de este supuesto pueden implicar la pérdida de la capacidad de almacenamiento de estos cuerpos en la vida real en la modelación simplificada, lo anterior implicará que por ejemplo bajo condiciones de sequía meteorológica, los lagos podrían suplir este déficit, pero en términos de la modelación no sería posible incorporar este efecto regulador en los modelos adaptados.

Para la modelación glaciar, se presentaron nuevos puntos de control para estimar el aporte glaciar en el territorio de análisis, acogiendo las sugerencias presentadas por la unidad de glaciología y nieves de la DGA. Los resultados no son concluyentes pues se abarca un número reducido de glaciares donde la metodología se ajusta, en algunos casos, a las estimaciones de área mediante imágenes Landsat. Del mismo modo la incertidumbre será mayor en glaciares de menor superficie.

Respecto a la estimación del aporte de los cuerpos de hielo, se obtiene que, durante los meses de verano, el aporte medio no supera el 10%. No obstante, en algunos días de años secos, el aporte porcentual de los cuerpos de hielo al caudal total puede ser mayor al 50%. Sobre la metodología de estimación del aporte glaciar, se puede concluir que la estimación de la evolución de cada uno de los cuerpos de hielo es una tarea extensa de realizar, por lo que sólo se muestran estimaciones para algunos de ellos. El proceso anterior evidencia que: (i) es difícil estimar el área glaciar para cada año, pues los cálculos de ésta mediante las imágenes satelitales muestran variaciones que pueden ser importantes, (ii) que la metodología en algunos casos representa razonablemente el aporte glaciar mientras que en otros cuerpos de hielo no, y (iii) que la metodología sobrestima (si los pocos casos son extrapolables) el área glaciar inicial en el año 1979, es decir, implica un derretimiento más acentuado.

Otro aspecto posible de mejorar es la representación de cada uno de los cuerpos de hielo. En este informe, cada glaciar se modeló como un punto en el espacio, lo que podría modificarse si se considerara bandas de elevación por glaciar, aunque con un mayor costo computacional. El aporte de los cuerpos de hielo presenta en este trabajo un derretimiento superior al esperado, por lo que hay espacio para mejoras en ese aspecto.

El ámbito hidrogeológico muestra que la diferencia entre los cálculos de las recargas con métodos distintos es considerable en algunas cuencas, y es similar a la obtenida en DGA (2018) sin exceder un orden de magnitud. Las diferencias se deben fundamentalmente a que las metodologías usadas se centran en distintas partes del registro del caudal. De hecho, mientras MoMLRr utiliza el valor mínimo mensual, RORA toma la parte del registro que se ve afectada luego de un evento de precipitaciones. Además, el hecho de que los registros no sean continuos afecta finalmente a la estimación, al igual que considerar que los eventos de recarga ocurren por igual en toda la extensión de cada cuenca y no en sitios específicos. Los resultados entonces permiten fijar un rango de valores estimados para la recarga potencial en las 78 cuencas incluidas en este informe.

Como resultado del proceso de calibración, se logra representar adecuadamente el 80% de las cuencas consideradas en régimen natural, con un índice KGE superior a 0,5. De los resultados se desprende que existe una relación entre mayor precipitación media de la cuenca y un coeficiente de escurrimiento más alto. Se observa, de los resultados de calibración, que hay una tendencia a la subestimación de los caudales observados. Esto sugiere la necesidad de revisar la incertidumbre de las forzantes meteorológicas, en especial la precipitación, pues es posible que existan sesgos importantes que se propaguen en la modelación de la escurrimiento. Algunas correcciones pueden realizarse producto del proceso iterativo entre modelación y generación de forzantes, en caso de ser necesario, en cuencas poco instrumentadas meteorológicamente, pero donde se cuenta con información fluviométrica que puede dar luces de potenciales sesgos. Al comparar los resultados de las forzantes del balance de 1987 y el actual, se observan ciertos cambios en sus climatologías. En el caso de las precipitaciones anuales, estas habrían disminuido en 866 [mm/año], mientras que la temperatura habría aumentado 0,5 °C/año. Estos resultados son consistentes con el análisis de tendencias realizado en DGA (2017). Sin embargo, es importante destacar que estos resultados no necesariamente son atribuibles a cambio climático, sino que también a diferencias metodológicas entre el presente estudio y el DGA (1987), diferencias en la cantidad de información, o una mezcla de todos estos factores.

Respecto a los cambios en las distintas componentes del balance hídrico durante los periodos históricos, se aprecian cambios significativos tanto en incremento como en disminución de escurrimiento directa, precipitación y evapotranspiración. Sin embargo, dado que las metodologías entre DGA (1987) y la actual son distintas, estas comparaciones tienen un carácter referencial y no pueden asociarse necesariamente a cambio climático. Es importante tener en consideración que las modelaciones hidrológicas presentan un sesgo seco respecto a las observaciones, por lo que es probable que parte importante de estas diferencias se explique por una falta de una adecuada representación de la precipitación.

En términos de cambio climático es posible apreciar que para todas las cuencas DARH analizadas en la zona de estudio, los 4 GCM analizados proyectan una disminución de caudal medio anual, y para gran parte de ellas un aumento en evapotranspiración. El modelo IPSL es aquel que entrega una mayor variabilidad con cambios entre -10% y -40% en caudal medio anual, mientras que el menos severo CSIRO proyecta una disminución entre -5% y -15% para la misma variable. Esto último tiene implicancias en el cambio del régimen hidrológico, en donde en un inicio todas las cuencas analizadas tenían coeficiente de escurrimiento mayor a 0,5 y de mediana 0,7; según las proyecciones climáticas el promedio de los 4 GCM

desplaza esta mediana a 0,65 y deja a algunas cuencas menores con un coeficiente de escurrentía menor a 0,5. En términos espaciales el cambio más significativo se da en las zonas cordilleranas.

Es importante recalcar que, debido a que lo que se presenta son los resultados de una metodología, ésta puede ser mejorada en etapas sucesivas. Por ejemplo, la representación de glaciares o la inclusión de cuencas de otras etapas del balance en el proceso de regionalización de parámetros modificarían los resultados presentados.

La estructura propuesta del proyecto SIG mantiene los lineamientos de versiones previas presentadas en estudios relacionados a la actualización del balance hídrico nacional. Sin embargo, dado el gran volumen de información involucrado, se hace necesario explorar plataformas de acceso remoto para facilitar el acceso y la disponibilidad de la información a todo público.

## **9.1 RECOMENDACIONES**

A modo general es posible establecer líneas de trabajo prioritario para este estudio como recomendaciones generales para la Dirección General de Aguas y su plan de instrumentación y monitoreo de cuerpos de agua, así como proyectos de mejora de los resultados presentados en este informe:

- i. Disponibilidad de información: La información de conductividades de uso de suelo provista por CIREN es un parámetro clave a la hora de contrastar parámetros de calibración en cuencas naturales, por lo que, de realizarse una homologación de los diversos proyectos de actualización del balance hídrico nacional, este insumo es clave.
- ii. Evaluación de sesgos meteorológicos: Información meteorológica en altura o en zonas no controladas, es algo clave que permitirá reducir la incertidumbre producida de la regionalización de estas variables. De forma especial se sugiere a DGA implementar una política de instrumentación de equipos adecuados para medir precipitación sólida.
- iii. Modelación de glaciares: Se sugiere, en etapas futuras, considerar estos resultados como parte de las mejoras en la metodología, lo que se puede lograr aumentando la cantidad de glaciares con series de evolución temporal de área y/o volumen.
- iv. Modelación hidrológica: Se sugiere evaluar la posibilidad de incorporar otros modelos hidrológicos con estructura flexible que permitan mejorar la representatividad de flujo horizontal entre celdas, entre otros procesos que no han sido representados por el modelo VIC.

## REFERENCIAS

- Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., ... Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-23>
- Beck, H. E., van Dijk, A. I. J. M., de Roo, A., Miralles, D. G., McVicar, T. R., Schellekens, J., & Bruijnzeel, L. A. (2016). Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1002/2015WR018247>
- Blöschl, G., & Montanari, A. (2010). Climate change impacts - throwing the dice? *Hydrological Processes*, 24, 374–381. <https://doi.org/10.1002/hyp.7574>
- Budyko, M. (1971). *Klimat i yiziñ (Clima y vida)*. 472 p. *Gidromeot. Izdat, L.*
- Castillo, Y. (2015). Caracterización de la hidrología glaciar de la cuenca del río Maipo mediante la implementación de un modelo glacio-hidrológico semi-distribuido físicamente basado. *Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Universidad de Chile*. <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/132835/Caracterizacion-de-la-hidrologia-glaciar-de-la-cuenca-del-rio-maipo-mediante....pdf;sequence=1>
- Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate . Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), **date of access**. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>
- Clark, M. P., Nijssen, B., Lundquist, J. D., Kavetski, D., Rupp, D. E., Woods, R. A., ... Rasmussen, R. M. (2015). A unified approach for process-based hydrologic modeling: 1. Modeling concept. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1002/2015WR017198>
- Clark, M. P., Slater, A. G., Rupp, D. E., Woods, R. A., Vrugt, J. A., Gupta, H. V., ... Hay, L. E. (2008). Framework for Understanding Structural Errors (FUSE): A modular framework to diagnose differences between hydrological models. *Water Resources Research*, 44, W00B02. <https://doi.org/10.1029/2007WR006735>
- Clark, M. P., Wilby, R. L., Gutmann, E. D., Vano, J. A., Gangopadhyay, S., Wood, A. W., ... Brekke, L. D. (2016). Characterizing Uncertainty of the Hydrologic Impacts of Climate Change. *Current Climate Change Reports*, 2(2), 55–64. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0034-x>
- Coron, L., Andréassian, V., Perrin, C., Lerat, J., Vaze, J., Bourqui, M., & Hendrickx, F. (2012). Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments. *Water Resources Research*, 48, W05552. <https://doi.org/10.1029/2011WR011721>
- Cortés, G. and Margulis, S., (2017) Impacts of El Niño and La Niña on interannual snow accumulation in the Andes: Results from a high-resolution 31 year reanalysis. *Geophys. Res. Lett.* 44, 6859–6867. <https://doi.org/10.1002/2017GL073826>
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.J., Park,

- B.K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.N., Vitart, F., (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. Q. J. R. Meteorol. Soc. 137, 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- DGA, (1984). Balance hidrológico nacional: X región. Informe final. Dirección General de Aguas, Santiago, Chile. Elaborado por Ricardo Edwards G.-Ingenieros Consultores Asociados Ltda.
- DGA, (1987). Balance Hídrico de Chile. Balance hídrico de Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile.
- DGA, (2008a). Levantamiento de parámetros para la modelación de cuencas pluviales no controladas en la IX región de la Araucanía. Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, elaborado por RODHOS Asesorías y Proyectos Ltda. Santiago, Chile.
- DGA, (2008b). Levantamiento de parámetros para modelación hidrológica de cuencas pluviales no controladas en la VII y VIII región. Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, elaborado por RODHOS Asesorías y Proyectos Ltda Santiago, Chile.
- DGA, (2008c). Dinámica de cobertura nival entre las cuencas de los ríos Copiapó y Petrohué utilizando imágenes satelitales. Santiago, Chile.
- DGA, (2008d). Balance glaciológico del glaciar Nef, Campo de Hielo Norte y catastro de glaciares de algunas cuencas de la zona central y sur del país. Dirección General de Aguas, Unidad de Glaciología y Nieves, Santiago, Chile. SIT N°169. Elaborado por Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Geografía, Geografía UC-Proyectos.
- DGA, (2008e). Investigaciones y escorrentía de deshielo en la cuenca alta del río Aconcagua. Aplicación de modelos de simulación nival y pronóstico de volúmenes de deshielo. Dirección General de Aguas, Unidad de Glaciología y Nieves, Santiago, Chile. SIT N° 165. Elaborado por Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente.
- DGA, (2009). Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona Norte de Chile, regiones XV, I, II y III, Informe Final etapa VII: Medición de la Evaporación mediante el Método del "Domo". SIT N°. 195. Elaborado por la Pontificia Universidad Católica de Chile.
- DGA, (2011a). Catastro, exploración y estudio de glaciares en Chile central. Dirección General de Aguas, Unidad de Glaciología y Nieves. Santiago, Chile. SIT N° 265. Elaborado por Geoestudios.
- DGA, (2011b). Investigación de los aportes nivoglaciares en algunas cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo y Rapel; y estimación de los efectos del cambio climático. Dirección General de Aguas, Unidad de Glaciología y Nieves. Santiago, Chile. SIT N° 266. Elaborado por Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente.
- DGA, (2011c). Variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas. Dirección General de Aguas, Unidad de Glaciología y Nieves. Santiago, Chile. SIT N° 261. Elaborado por Centro de Estudios Científicos.
- DGA, (2012a). Modelación del balance de masa y descarga de agua en glaciares de Chile central. . Dirección General de Aguas. Unidad de Glaciología y Nieves. Santiago, Chile. SIT N° 307. Elaborado por Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente.

- DGA, (2012b). Caracterización y monitoreo de glaciares rocosos en la cuenca del río Elqui y balance de masa del glaciar Tapado. Dirección General de Aguas. Unidad de Glaciología y Nieves. Santiago, Chile. SIT N° 285. Elaborado por CEAZA.
- DGA, (2012c). Variaciones recientes de glaciares en respuesta al cambio climático: Características glaciológicas de los glaciares San Rafael, NEf y Colonia, Campo de Hielo Norte. Dirección General de Aguas. Unidad de Glaciología y Nieves Santiago, Chile. SIT N° 305. Elaborado por Centro de Estudios Científicos.
- DGA, (2013a). Modelación hidrogeológico cuenca Itata bajo. Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Santiago, Chile. SIT N° 320. Elaborado por Aqualogy Medioambiente Chile S.A.
- DGA, (2013b). Implementación nivel 2 Estrategia Nacional de Glaciares: Mediciones glaciológicas terrestres en Chile central, zona Sur y Patagonia. Dirección General de Aguas. Unidad de Glaciología y Nieves. Santiago, Chile. SIT N° 327. Elaborado por Geoestudios.
- DGA, (2014a). Estimación preliminar de las recargas de aguas subterráneas y determinación de los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común en las cuencas de las regiones del Maule, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos. Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Santiago, Chile. SIT N° 359.
- DGA, (2014b). Redefinición de la clasificación red hidrogeográfica a nivel nacional. Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos. Santiago, Chile. SIT N° 356. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN).
- DGA, (2015a). Análisis y modelación hidrológica del río Palena. Dirección General de Aguas. Undécima Región. Chile. SIT N° 388. Elaborado por CFC Ingeniería Limitada.
- DGA, (2015b). Modelación del balance de masa y descarga de agua en glaciares del norte chico y Chile central. Dirección General de Aguas. Unidad de Glaciología y Nieves. Santiago, Chile. SIT N° 382. Elaborado por CEAZA.
- DGA, (2015c). Análisis y modelación hidrológica cuenca del río Cisnes. Dirección General de Aguas. Undécima Región, Chile. SIT N° 387. Elaborado por CFC Ingeniería Limitada.
- DGA, (2015d). Atlas del Agua - Chile 2016. Santiago, Chile. S.E.B. N°6.
- DGA, (2016a). Estudio hidrogeológico, región de la Araucanía. Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Santiago, Chile. SIT N° 396. Elaborado por Arcadis Chile S.A.
- DGA, (2016b). Análisis efecto en el régimen hídrico por el cambio en patrones meteorológicos. Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Santiago, Chile. SIT N° 400. Elaborado por Hídrica Consultores SPA.
- DGA,(2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Elaborado por Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T. 417.
- DGA,(2018). Aplicación de La Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de la Macrozona Norte y Centro. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Elaborado por Fundación para la Transferencia Tecnológica y Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T. 435

- Duan, Q.Y., Gupta, V.K., Sorooshian, S., (1993). Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *J. Optim. Theory Appl.* 76, 501–521. <https://doi.org/10.1007/BF00939380>
- Emerton, R. E., Stephens, E. M., Pappenberger, F., Pagano, T. C., Weerts, A. H., Wood, A. W., ... Cloke, H. L. (2016). Continental and global scale flood forecasting systems. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(June), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/wat2.1137>
- Essery, R., & Pomeroy, J. (2004). Vegetation and Topographic Control of Wind-Blown Snow Distributions in Distributed and Aggregated Simulations for an Arctic Tundra Basin. *Journal of Hydrometeorology*, 5(5), 735–744. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005<0735:VATCOW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005<0735:VATCOW>2.0.CO;2)
- Freeze, R. A., & Harlan, R. (1969). Blueprint for a physically-based, digitally simulated hydrologic response model. *Journal of Hydrology*, 9, 237–258.
- Gupta, H. V., Perrin, C., Blöschl, G., Montanari, A., Kumar, R., Clark, M., & Andréassian, V. (2014). Large-sample hydrology: A need to balance depth with breadth. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(2). <https://doi.org/10.5194/hess-18-463-2014>
- Gupta, H. V., Wagener, T., & Liu, Y. (2008). Reconciling theory with observations : elements of a diagnostic approach to model evaluation. *Hydrological Processes*, 22(March), 3802–3813. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Hrachowitz, M., Fovet, O., Ruiz, L., Euser, T., Gharari, S., Nijzink, R., ... Gascuel-Oudou, C. (2014). Process consistency in models: The importance of system signatures, expert knowledge, and process complexity. *Water Resources Research*, 50(9), 7445–7469. <https://doi.org/10.1002/2014WR015484>
- Hrachowitz, M., Savenije, H. H. G., Blöschl, G., McDonnell, J. J., Sivapalan, M., Pomeroy, J. W., ... Cudennec, C. (2013). A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)—a review. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6), 1198–1255. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.803183>
- Huntington, T. G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319(1–4), 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.003>
- IPCC. (2013). *Climate Change (2013): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, ... P. M. Midgley, Eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Kinar, N. J., & Pomeroy, J. W. (2015). Measurement of the physical properties of the snowpack. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 481–544. <https://doi.org/10.1002/2015RG000481>
- Martinez, G. F., & Gupta, H. V. (2011). Hydrologic consistency as a basis for assessing complexity of monthly water balance models for the continental United States. *Water Resources Research*, 47(12), W12540. <https://doi.org/10.1029/2011WR011229>
- McCabe, M. R., Alsdorf, D. E., Miralles, D. G., Uijlenhoet, R., Wagner, W., Lucieer, A., ... Wood, E. F. (2017). The Future of Earth Observation in Hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences* (under review). *Hydrology and Earth System Sciences (under Review)*, 3879–3914.
- Mendoza, P. A., Clark, M. P., Barlage, M., Rajagopalan, B., Samaniego, L., Abramowitz, G., & Gupta, H. (2015). Are we unnecessarily constraining the agility of complex process-based models? *Water Resources Research*, 51. <https://doi.org/10.1002/2014WR015820>

- Milly, P. C. D., Dunne, K. A., & Vecchia, A. V. (2005). Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438(7066), 347–350. <https://doi.org/10.1038/nature04312>
- Mizukami, N., Clark, M. P., Gutmann, E. D., Mendoza, P. A., Newman, A. J., Nijssen, B., ... Brekke, L. D. (2016). Implications of the Methodological Choices for Hydrologic Portrayals of Climate Change over the Contiguous United States: Statistically Downscaled Forcing Data and Hydrologic Models. *Journal of Hydrometeorology*, 17(1), 73–98. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0187.1>
- Niu, G.-Y., Yang, Z.-L., Mitchell, K. E., Chen, F., Ek, M. B., Barlage, M., ... Xia, Y. (2011). The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research*, 116(D12), D12109. <https://doi.org/10.1029/2010JD015139>
- Oleson, K. W., Lawrence, D. M., Gordon, B., Flanner, M. G., Kluzek, E., Peter, J., ... Zeng, X. (2010). *Technical Description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM)*. Atmospheric Research. Boulder, Colorado, USA.
- Parajka, J., Viglione, A., Rogger, M., Salinas, J. L., Sivapalan, M., & Blöschl, G. (2013). Comparative assessment of predictions in ungauged basins - Part 1: Runoff-hydrograph studies. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(5), 1783–1795. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1783-2013>
- Pokhrel, P., Yilmaz, K. K., & Gupta, H. V. (2012). Multiple-criteria calibration of a distributed watershed model using spatial regularization and response signatures. *Journal of Hydrology*, 418–419, 49–60. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.004>
- Pomeroy, J. W., Gray, D. M., Brown, T., Hedstrom, N. R., Quinton, W. L., Granger, R. J., & Carey, S. K. (2007). The cold regions hydrological model : a platform for basing process representation and model structure on physical evidence. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Shafii, M., & Tolson, B. A. (2015). Optimizing hydrological consistency by incorporating hydrological signatures into model calibration objectives. *Water Resources Research*, 51(5), 3796–3814. <https://doi.org/10.1002/2014WR016520>
- Singh, R., Archfield, S. A., & Wagener, T. (2014). Identifying dominant controls on hydrologic parameter transfer from gauged to ungauged catchments - A comparative hydrology approach. *Journal of Hydrology*, 517, 985–996. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.030>
- van Werkhoven, K., Wagener, T., Reed, P., & Tang, Y. (2008). Characterization of watershed model behavior across a hydroclimatic gradient. *Water Resources Research*, 44(1), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2007WR006271>
- Wigmosta, M., Vail, L., & Lettenmaier, D. (1994). A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research*, 30(6), 1665–1679.
- Yilmaz, K. K., Gupta, H. V., & Wagener, T. (2008). A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model. *Water Resources Research*, 44(9), W09417. <https://doi.org/10.1029/2007WR006716>
- Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., Hernandez, H.J., Galleguillos, M., Estades, C., Biging, G.S., Radke, J.D., Gong, P., (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote Sens. Environ.* 183, 170–185. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.016>

