



**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**

**RESUMEN EJECUTIVO**

**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.**

**Notas:**

- 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 de 1987 y el presente estudio, 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 como a variaciones reales en el balance.

## TABLA DE CONTENIDO

|                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Índice de Tablas .....                                                                      | viii      |
| Índice de Figuras .....                                                                     | ix        |
| <b>1. Introducción.....</b>                                                                 | <b>1</b>  |
| <b>2. Consideraciones metodológicas.....</b>                                                | <b>3</b>  |
| 2.1. Modificaciones en la modelación hidrológica .....                                      | 4         |
| 2.2. Modificaciones en las Forzantes Meteorológicas.....                                    | 5         |
| 2.3. Modificaciones en la evaluación de potenciales impactos del cambio climático.....      | 8         |
| <b>3. Balance Hídrico en periodo histórico.....</b>                                         | <b>12</b> |
| 3.1. Calibración de Cuencas en régimen natural .....                                        | 13        |
| 3.2. Regionalización de parámetros.....                                                     | 13        |
| 3.3. Estimación del Balance Hídrico 1985-2015 para cuencas DARH en la zona de estudio ..... | 15        |
| 3.4. Comparación con Balance de 1987.....                                                   | 15        |
| <b>4. Balance Hídrico bajo cambio climático .....</b>                                       | <b>24</b> |
| <b>5. Proyecto SIG.....</b>                                                                 | <b>28</b> |
| <b>6. Conclusiones .....</b>                                                                | <b>29</b> |
| 6.1. Recomendaciones.....                                                                   | 30        |
| <b>Referencias .....</b>                                                                    | <b>31</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 2-1: Modelos globales de clima seleccionados para representar las proyecciones de cambio climático en el presente estudio. ....                    | 8  |
| Tabla 3-1: Principales flujos hidrológicos para las cuencas DARH según el criterio de regionalización .....                                              | 16 |
| Tabla 3-2: Variaciones de distintas componentes del balance hídrico entre los periodos DGA periodo actual (1985-2015) y periodo pasado (1955-1985). .... | 23 |

## Índice de Figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2-1: Resumen metodológico propuesto en el estudio DGA (2017) .....                                                                                                                                                                                                                                                                      | 3  |
| Figura 2-2: Resumen de los ajustes metodológicos propuestos en el estudio DGA (2018). .....                                                                                                                                                                                                                                                    | 4  |
| Figura 2-3: Representación de los principales procesos para obtener el caudal efluente de lagos según la metodología propuesta. ....                                                                                                                                                                                                           | 5  |
| Figura 2-4: Climatologías de precipitación media anual de los productos de precipitación CR2MET v1.4.2 (izquierda), v2.0 (centro) y diferencia entre ambos productos (derecha). ....                                                                                                                                                           | 6  |
| Figura 2-5: Precipitación anual media para el periodo 1979-2016 obtenido de la red de estaciones DMC-DGA (izquierda) y del producto CR2MET (derecha). En el panel derecho, el cuadrado negro superior encierra la Cordillera de Nahuelbuta, mientras que el cuadrado inferior la selva Valdiviana. ....                                        | 7  |
| Figura 2-6: 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. ....                                                                                                                          | 8  |
| Figura 2-7: 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. ....                                                                                                                           | 10 |
| Figura 2-8: Cambios proyectados en la media anual de temperatura diurnas máximas (izquierda) y mínimas (derecha) por los cuatro GCMs hacia 2030-2060, respecto al periodo 1985-2015. ....                                                                                                                                                      | 11 |
| Figura 3-1: Identificación de cuencas DARH de la zona de estudio. ....                                                                                                                                                                                                                                                                         | 12 |
| Figura 3-2: Mapa de índice KGE calibrado y el valor de NSE correspondiente para las 78 cuencas en régimen natural. ....                                                                                                                                                                                                                        | 13 |
| Figura 3-3: Variación de los índices KGE (panel superior) y $\beta = Q_{mod}/Q_{obs}$ (panel inferior) para validación cruzada en las cuencas en régimen natural. ....                                                                                                                                                                         | 14 |
| Figura 3-4: Escorrentía, Evapotranspiración natural (sin efecto de riego) y Precipitación media anual. Período abr-1985 a mar-2015. ....                                                                                                                                                                                                       | 18 |
| Figura 3-5: Balance hídrico adimensional y análisis de Budyko para cuencas DARH en período 1985-2015. ....                                                                                                                                                                                                                                     | 19 |
| Figura 3-6: Climatología de precipitaciones anuales promedio para los estudios DGA (1987) y proyecto actual (paneles a y b) y diferencia de precipitaciones (panel c). ....                                                                                                                                                                    | 20 |
| Figura 3-7: Climatología de temperatura media anual para los estudios DGA (1987) y proyecto actual (paneles a y b) y diferencia de temperaturas. ....                                                                                                                                                                                          | 22 |
| Figura 4-1: Balance de masa adimensional para las cuencas DARH bajo cambio climático. El balance considera el período 2030-2060, mientras que la variación porcentual de escorrentía ( $\Delta Q$ ) compara dicho período con el período 1985-2015. Panel inferior, variación promedio entre los cuatro GCMs: CCSM4, CSIRO, IPSL y MIROC. .... | 25 |
| Figura 4-2: Variación de la precipitación, escorrentía y evapotranspiración para cada uno de los modelos seleccionados en las cuencas DGA-CIREN. El cambio se realiza entre los periodos abr/2030-mar/2060 y abr/1985-mar/2015 para GCMs CCSM4, CSIRO, IPSL y MIROC. ....                                                                      | 26 |
| Figura 4-3: 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. ....                                                                | 27 |

# 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 hoya en un periodo de tiempo determinado. 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).

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 dicho estudio se propuso 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, la Fundación para la Transferencia Tecnológica, UNTEC, en colaboración con la Pontificia Universidad Católica de Chile (DGA, 2018) aplica esta metodología para las macrozonas Norte y Centro efectuándose algunas modificaciones a la metodología originalmente propuesta. En este último estudio, se exploran distintas técnicas de regionalización en cuencas no controladas y con alto índice de intervención; así como algoritmos de optimización global para maximizar la eficiencia de los modelos hidrológicos, marcando un hito sin precedentes en el país.

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>1</sup> (código BNA 1101) y cuenca Archipiélagos de las Guaitecas y de los Chonos (código BNA 1102), al sur. Para lograr este objetivo, se recopilan datos hidrometeorológicos complementarios a los obtenidos en el estudio anterior (DGA, 2018) y se adapta la metodología de estimación del balance hídrico, desarrollada anteriormente (DGA, 2017), a las características de las cuencas de las macrozonas en estudio.

La estimación del balance hídrico a nivel de cuenca, en función de las condiciones geográficas, climáticas y datos hidrometeorológicos disponibles, se realiza para el período 1985 a 2015 mediante el modelo hidrológico Variable Infiltration Capacity (VIC; Liang *et al.*, 1996) en las cuencas definidas en régimen natural. Posteriormente, se procede a regionalizar los parámetros para extender el análisis al resto de las cuencas de interés. Además, en función de proyecciones de variables meteorológicas dadas por cuatro modelos climáticos globales, seleccionados en etapas anteriores (DGA, 2017) para el escenario RCP8.5, se realiza también esta estimación considerando como horizonte el período 2030 a 2060.

---

<sup>1</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 como “río Cisnes”.

Se comparan también los resultados del balance hídrico vigente (DGA, 1987) con aquellos obtenidos en el presente estudio para el período histórico en las cuencas DARH. Es necesario tomar en cuenta que existen elementos metodológicos en la obtención de valores medios anuales 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.

Finalmente, para la presentación y despliegue de las distintas componentes del balance, con su distribución espacial y temporal, se elabora un proyecto SIG (Sistema de Información Geográfica), implementado en ArcGIS 10.2.

En este informe, se presenta una síntesis tanto de los principales aspectos metodológicos como de los resultados asociados al ejercicio de calibración y regionalización. Se presenta un resumen de los resultados del balance hídrico, a escala de cuencas hidrográficas reconocidas en el DARH, para el período 1985 – 2015 y su comparación con el producto actualmente vigente (DGA, 1987) y las proyecciones para el período 2030 a 2060. Finalmente se muestran las principales conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio.

**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. CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS

La metodología planteada en el estudio de actualización del balance hídrico nacional (DGA, 2017) se sintetiza en la Figura 2-1. En resumen, para obtener los caudales medios diarios en cada sistema se utilizan variables meteorológicas espacialmente distribuidas para forzar el modelo hidrológico VIC a una escala temporal de 3 horas. Este modelo 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, tomando en cuenta diversas unidades de almacenamiento, destacándose el contenido de agua en el manto nival. Adicionalmente, el modelo hidrológico permite realizar análisis de variabilidad climática.

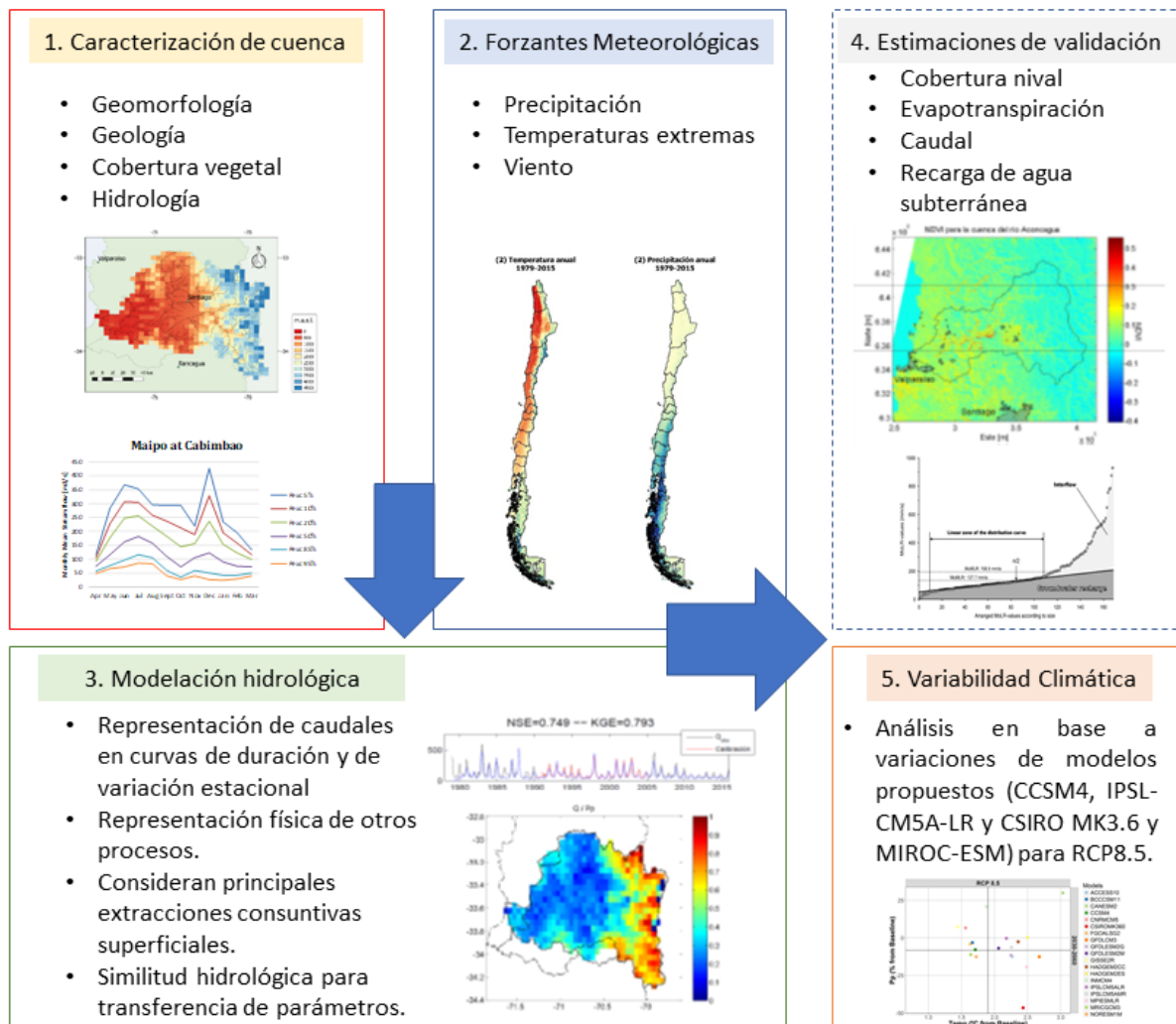


Figura 2-1: Resumen metodológico propuesto en el estudio DGA (2017)

En el estudio de actualización del balance hídrico en cuencas en las macrozonas norte y centro del país (DGA, 2018), se realizó un ajuste a la metodología sintetizada en el párrafo anterior. Por una parte, se automatiza la calibración de parámetros del modelo hidrológico mediante el algoritmo *Shuffled*

*Complex Evolution* (SCE-UA; Duan *et al.*, 1993) y, además, se plantea 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). 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 (Condom *et al.*, 2012).

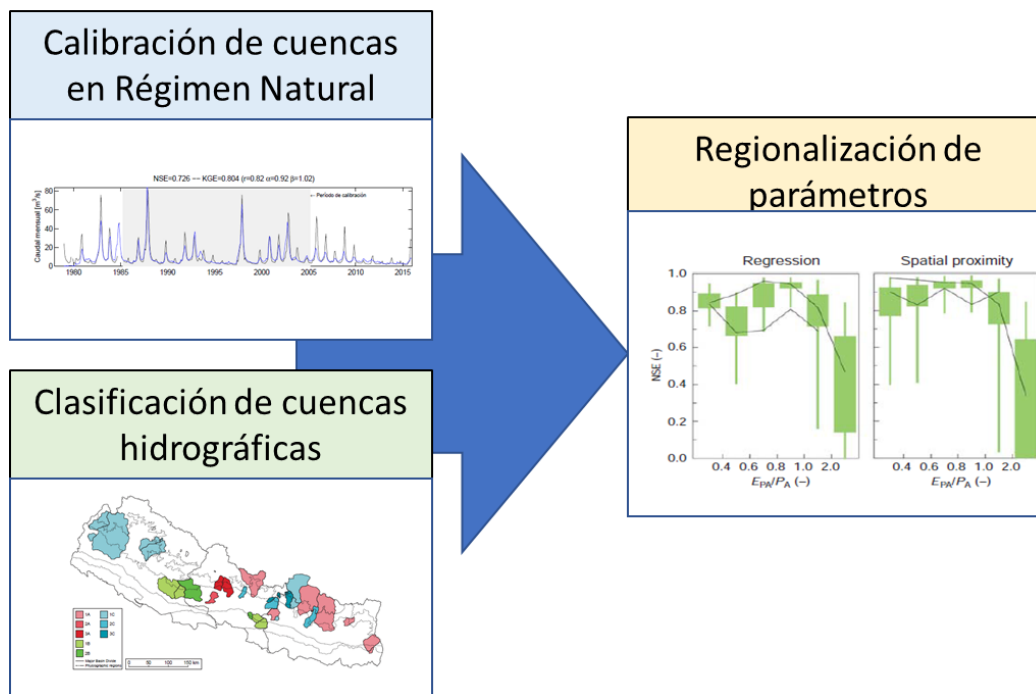


Figura 2-2: Resumen de los ajustes metodológicos propuestos en el estudio DGA (2018).

## 2.1. Modificaciones en la modelación hidrológica

Debido a las restricciones del modelo hidrológico, la presencia de grandes cuerpos de agua en la zona en estudio y la necesidad de mejorar la evolución de los glaciares, se plantearon las siguientes mejoras:

- Se calibran de manera secuencial las cuencas que contienen lagos con información fluviométrica en su punto de descarga, siguiendo la metodología que se sintetiza en la Figura 2-3 para obtener el caudal efluente. Para ello, se asigna a un pixel el área del lago y se estiman las forzantes meteorológicas promediadas sobre dicha superficie (input vertical). Se estima el caudal afluente al lago, usando el modelo VIC (input horizontal) en la cuenca aportante. 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.

- Para estimar el aporte individual de cada glaciar, se propone considerar diferente el exponente  $b$  de la relación Volumen- Área (Ecuación 2.1) según la magnitud del área del glaciar  $A_g$  mayor ( $b=1,36$ ) o menor ( $b=1,27$ ) a  $30 \text{ Km}^2$ . Además, se permite que la nieve remanente sobre el glaciar al final del año hidrológico se incorpore al volumen de hielo.

$$V_g = c \cdot A_g^b \quad (2.1)$$

Adicionalmente, en este proyecto fue posible contar con la información de suelos proveniente de CIREN<sup>2</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 pudo distribuir espacialmente la conductividad hidráulica ( $K$ ) en aquellas zonas con información. En aquellas zonas donde no hay información disponible, se impone un valor de conductividad hidráulica igual a  $100 \text{ mm/d}$  proveniente de una estimación usando el Mapa Geológico Nacional, cuyos valores se obtuvieron en el estudio DGA (2018).

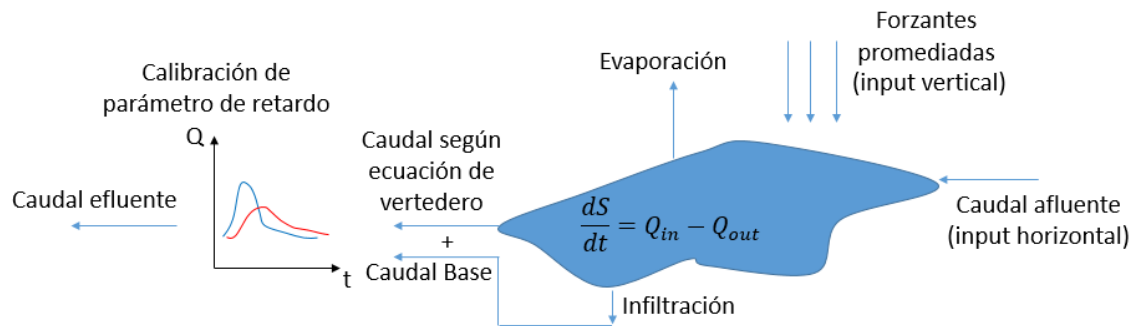


**Figura 2-3: Representación de los principales procesos para obtener el caudal efluente de lagos según la metodología propuesta.**

## 2.2. Modificaciones en las Forzantes Meteorológicas

Al igual que en la etapa anterior (DGA, 2018), al detectarse falta de representatividad de los procesos hidrológicos en algunos de los sistemas analizados, se realizó un levantamiento general de la información meteorológica disponible, productos atmosféricos e información hidrogeológica relevante para la zona de estudio. En particular, el producto CR2MET vigente al inicio del estudio (versiones 1.3 para temperatura y 1.4.2 para precipitación) se basaba tanto en datos registrados en estaciones meteorológicas como en el producto que se denominó ERAblend, que mezclaba la información del reanálisis ERA Interim (Dee *et al.*, 2011), disponible para todo el período de análisis con una resolución temporal tri-horaria y horizontal del orden de  $80 \text{ Km}$ , con la del reanálisis ERA5 (Copernicus Climate Change Service (C3S), 2017), disponible para el período 2010-2016 con una resolución temporal horaria y horizontal de  $30 \text{ Km}$ . Durante el período el ECMWF<sup>3</sup> liberó un nuevo set de datos para ERA5

<sup>2</sup> CIREN. Centro de Información de Recursos Naturales

<sup>3</sup> Siglas en inglés para la institución *European Center for Medium Range Weather Forecasts*

(Copernicus Climate Change Service (C3S), 2017), con información disponible para todo el periodo de tiempo en estudio (1979-2015) que fue usado para actualizar el producto CR2MET de precipitaciones, generándose la versión CR2MET v2.0.

La Figura 2-4 muestra una comparación de los valores climatológicos medios anuales de precipitación estimados estas versiones de CR2MET en la zona de estudio.

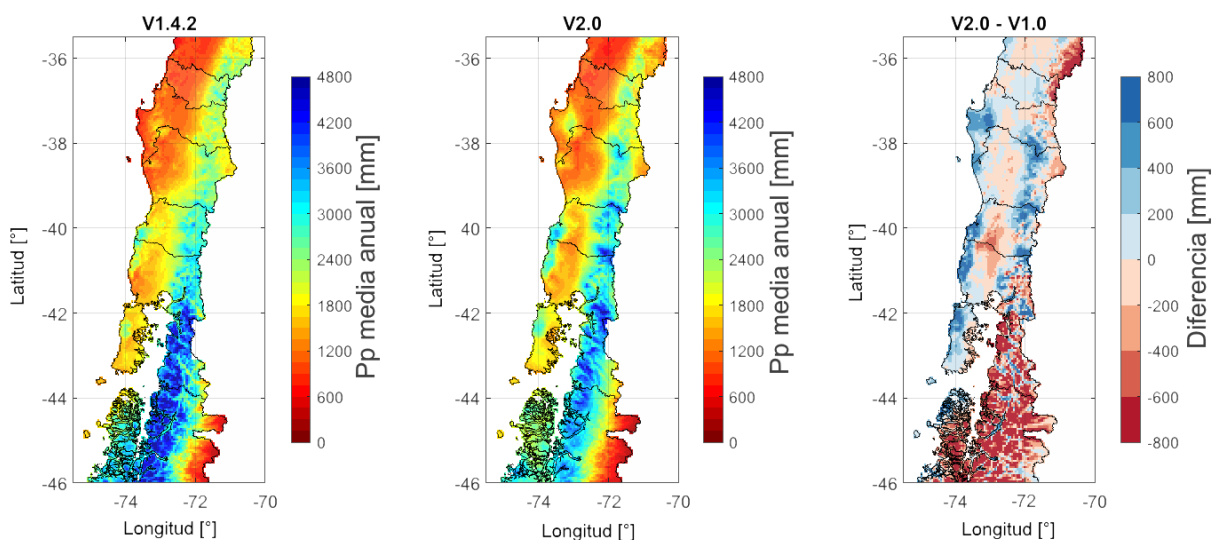


**Figura 2-4: Climatologías de precipitación media anual de los productos de precipitación CR2MET v1.4.2 (izquierda), v2.0 (centro) y diferencia entre ambos productos (derecha).**

Se aprecia que, entre las latitudes 36°S y 42°S, con el nuevo producto se generan mayores precipitaciones en la cordillera de la Costa, 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.

Es conveniente hacer notar que, en el producto de precipitación, se incluyen dos nuevos predictores (presión a nivel del mar y altura geopotencial en 300 hectopascales), lo que permite incorporar información de patrones de circulación de gran escala. Además, en cada modelo calculado ya no sólo se exige un mínimo de observaciones, sino que también un mínimo de días con precipitación y utilizando un ajuste de análisis de correlación canónico, se incorporan al producto tendencias observadas de largo plazo. La precipitación anual media (1979-2016) obtenida para la zona de estudio se ilustra en la Figura 2-5. 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 de la figura). El detalle obtenido en la grilla muestra una importante heterogeneidad espacial en la precipitación media en zonas climáticas similares, como se aprecia en los valles centrales del sur de

Chile, así como también en sectores como la cordillera de Nahuelbuta (recuadro negro superior) y la selva Valdiviana (recuadro negro inferior).

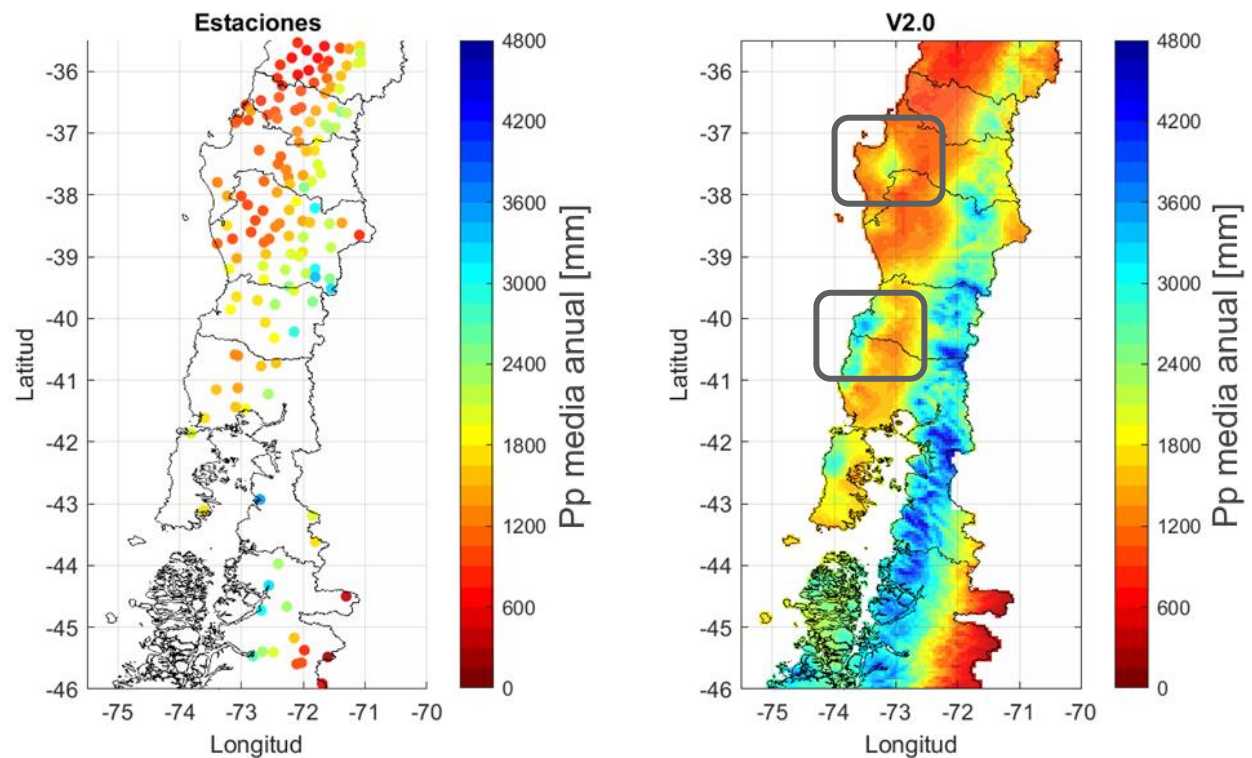


**Figura 2-5:** Precipitación anual media para el periodo 1979-2016 obtenido de la red de estaciones DMC-DGA (izquierda) y del producto CR2MET (derecha). En el panel derecho, el cuadrado negro superior encierra la Cordillera de Nahuelbuta, mientras que el cuadrado inferior la selva Valdiviana.

El producto de temperaturas utilizado corresponde a la versión 1.3 (DGA, 2018). La Figura 2-6 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 (temperatura decae con la elevación).

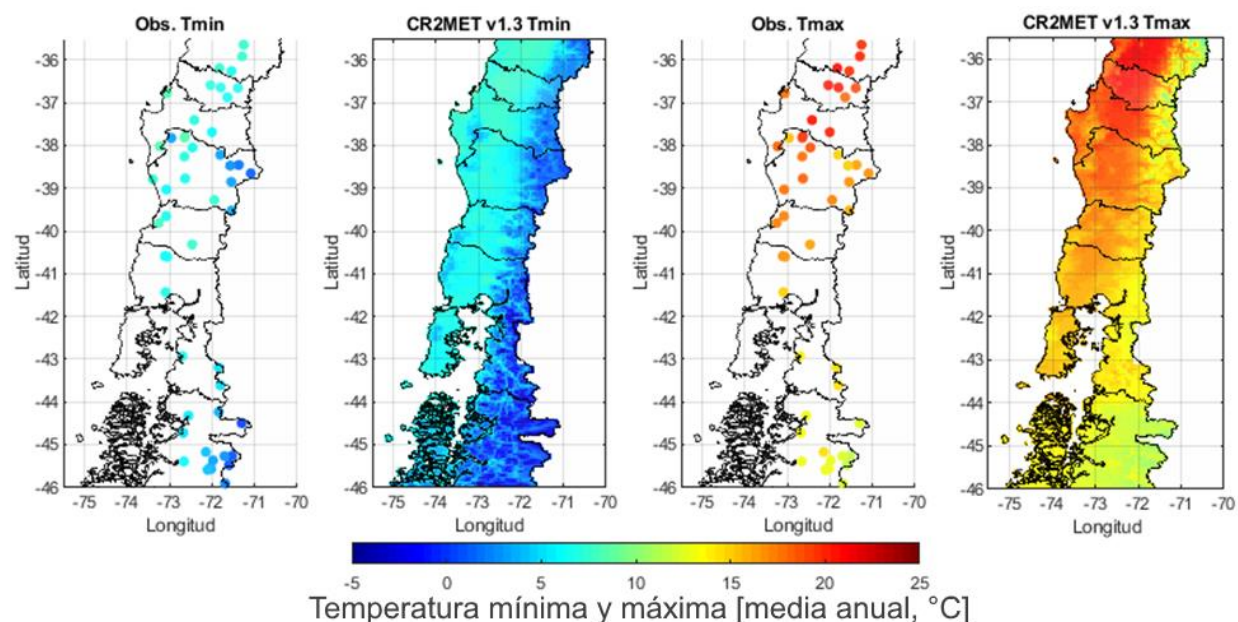


Figura 2-6: Promedios anuales de temperatura diaria mínima (paneles de la izquierda) y máxima (paneles del lado derecho) en el periodo 1979-2016 obtenido de la red de estaciones DMC-DGA y del producto CR2MET.

### 2.3. Modificaciones en la evaluación de potenciales impactos del cambio climático

En este estudio, se utilizan los modelos climáticos globales (GCMs por sus siglas en inglés) descritos en detalle en DGA (2017) bajo el escenario futuro denominado 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  $8,5 \text{ W/m}^2$  en el año 2100 con respecto a niveles preindustriales. Estos GCMs son consecuentes con los utilizados en la etapa anterior (DGA, 2018) y se presentan en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Modelos globales de clima seleccionados para caracterizar los impactos del cambio climático proyectados en la hidrología.

| 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           |

Considerando el cambio de las forzantes meteorológicas descrito en el acápite anterior, se hace necesario modificar las proyecciones futuras utilizando la técnica de mapeo de delta por cuantiles (QDM por sus siglas en inglés; Cannon *et al.*, 2015) para realizar el escalamiento de las precipitaciones y temperaturas con el fin de evaluar el impacto del cambio climático en la zona de estudio.

La Figura 2-7 muestra los cambios medios netos proyectados, en el período 2030-2060, en precipitación media anual utilizando el método de escalamiento QDM. En este caso, la metodología de escalamiento 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.

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 Figura 2-8, que señala al modelo IPSL como el de mayor sensibilidad climática.

La Figura 2-8 muestra las proyecciones de cambio en el valor medio anual de temperaturas diurnas máximas y mínimas entregadas por los cuatro GCMs hacia 2030-2060, respecto al periodo 1985-2015. 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, la temperatura mínima no alcanza aumentos comparables a 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. Asimismo, 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). Dicho aumento 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.

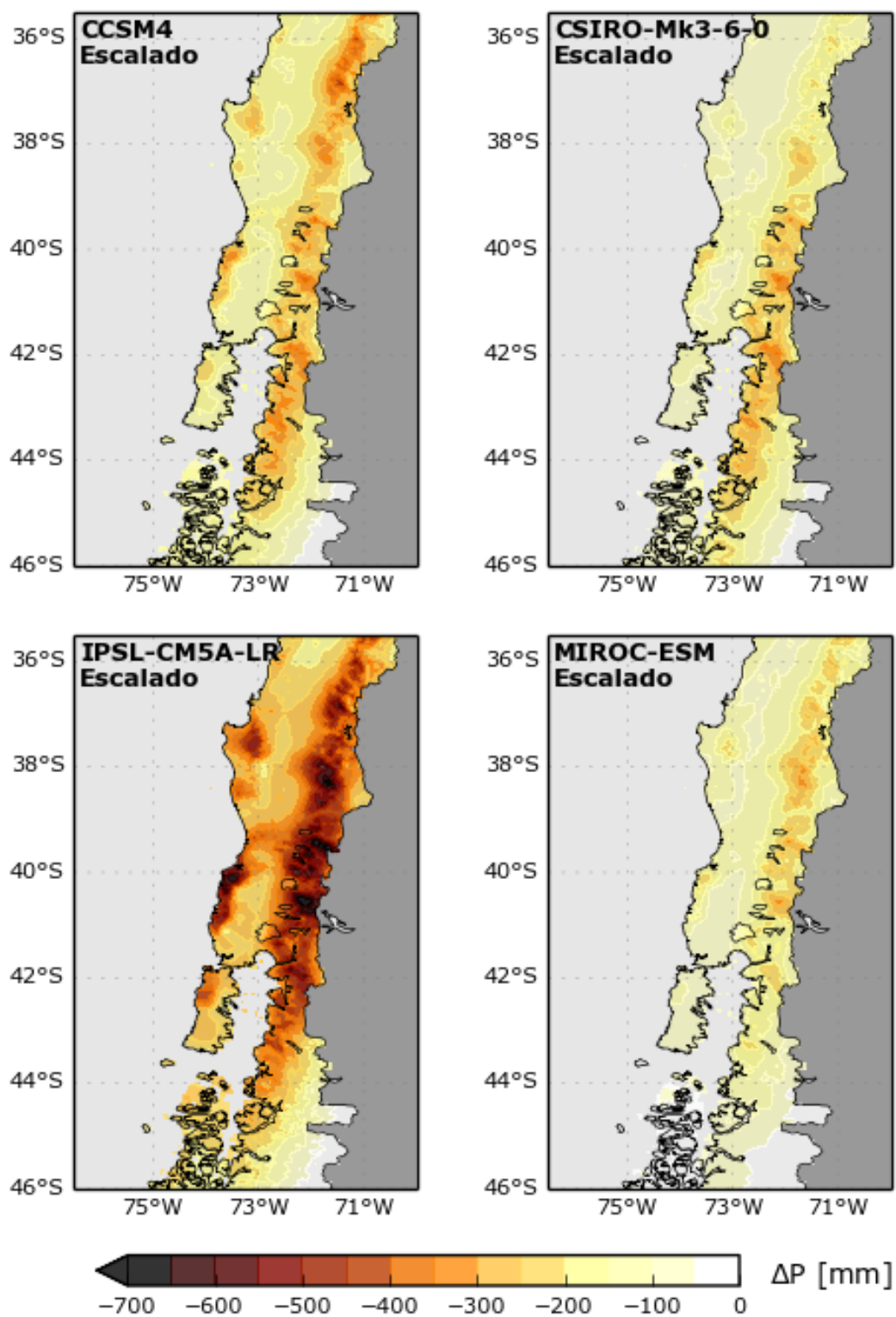


Figura 2-7: Cambios de precipitación anual media, proyectado hacia 2030-2060 con respecto al periodo 1985-2015. Para cada modelo evaluado, se presentan las diferencias con respecto al periodo base 1985-2015.

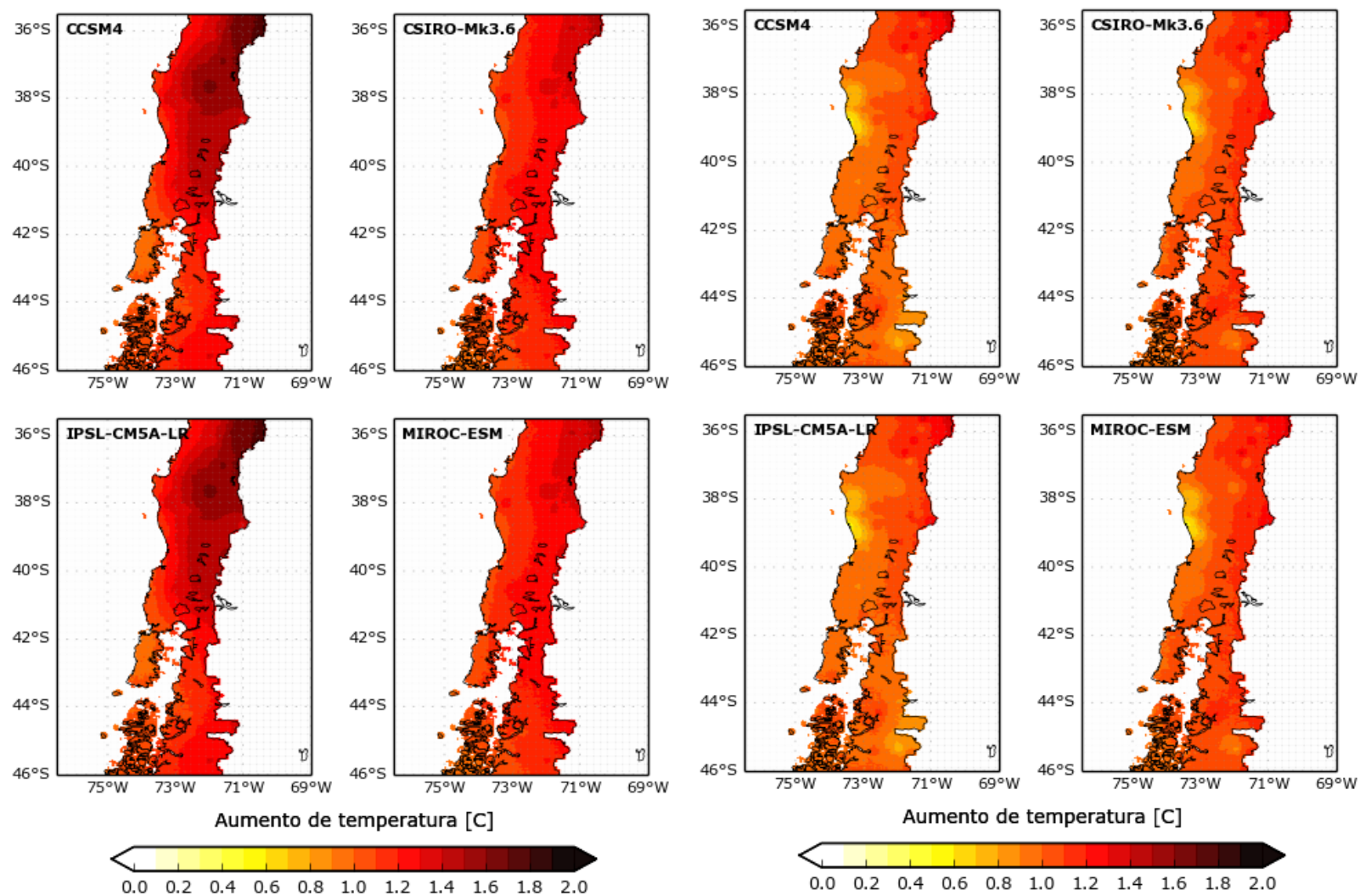


Figura 2-8: Cambios proyectados en la media anual de temperatura diurnas máximas (izquierda) y mínimas (derecha) por los cuatro GCMs hacia 2030-2060, respecto al periodo 1985-2015.

### 3. BALANCE HÍDRICO EN PERIODO HISTÓRICO

Para llevar a cabo el balance hídrico en las cuencas de las macrozonas de interés, se consideraron dos etapas previas. La primera se refiere a la calibración de las cuencas en régimen natural o con escasa intervención según lo obtenido de la base de datos CAMELS-CL. La segunda etapa contempló la modelación de las cuencas DARH de las macrozonas de interés identificadas en la Figura 3-1, regionalizando los parámetros del modelo VIC. Posteriormente se obtuvo el balance hídrico en todas estas cuencas.

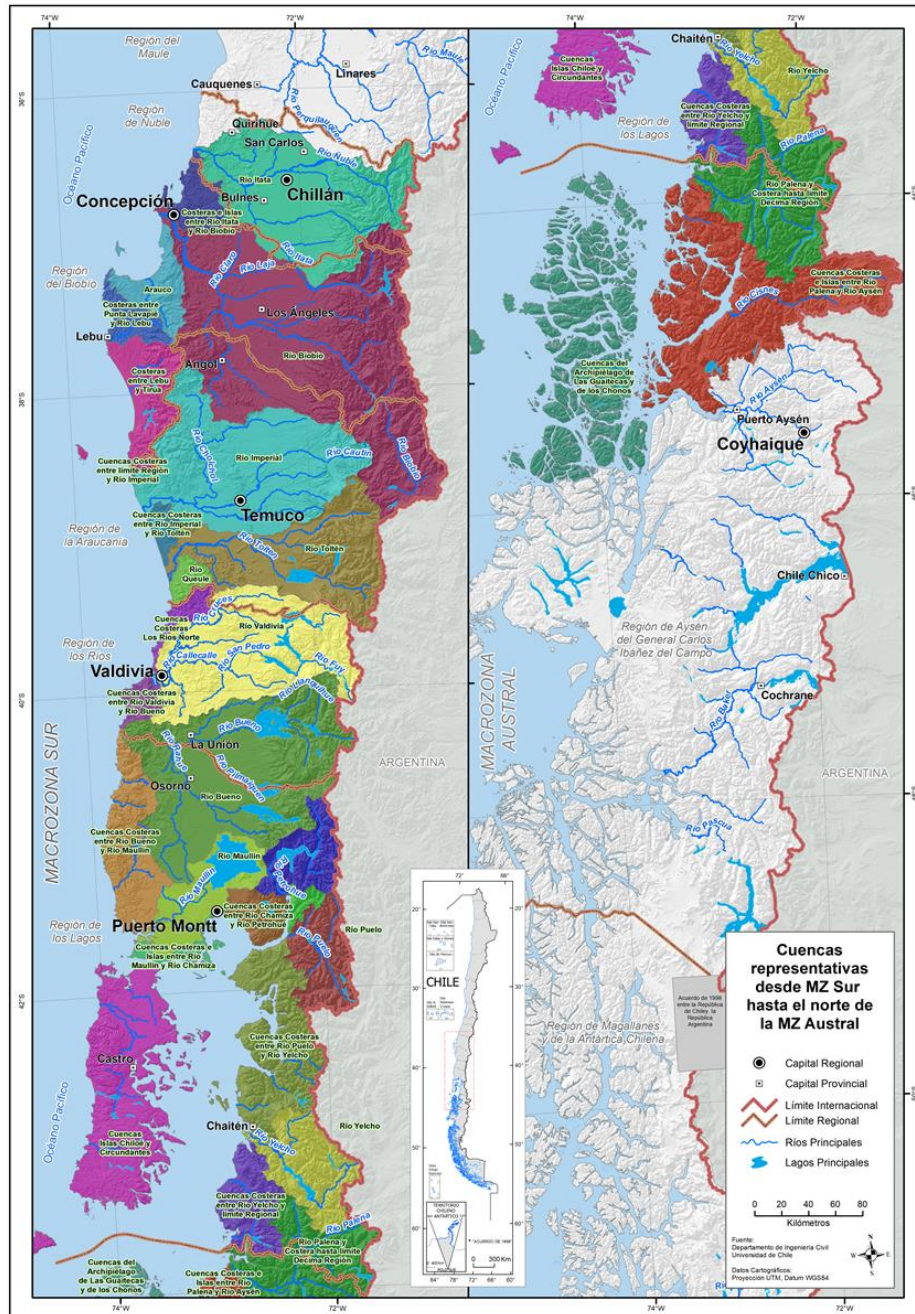


**Figura 3-1: Identificación de cuencas DARH de la zona de estudio.**

### 3.1. Calibración de Cuencas en régimen natural

Se identificaron en la zona de interés (región de Ñuble y la cuenca del río Cisnes, en la Región de Aysén) 78 cuencas con baja intervención y con al menos cinco años de información fluviométrica. En la Figura 3-2 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 estas cuencas.

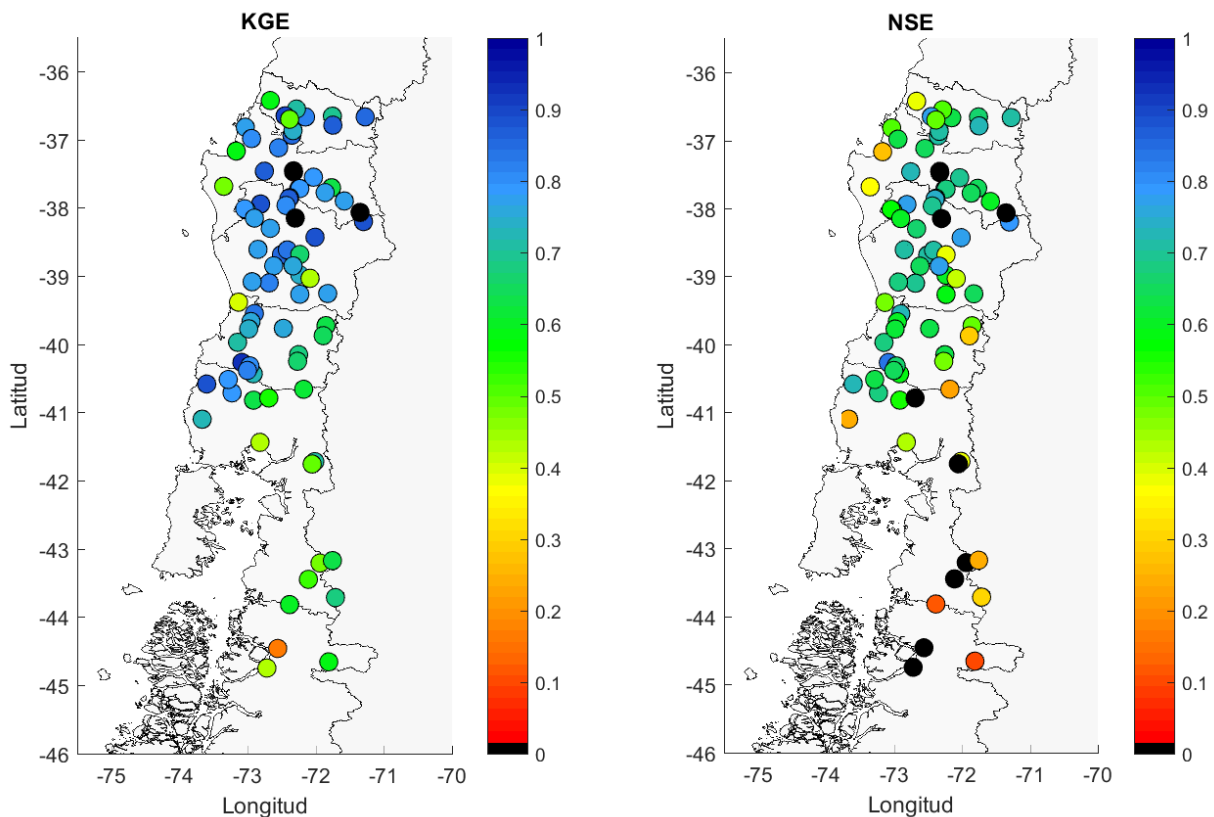


Figura 3-2: Mapa de índice KGE calibrado y el valor de NSE correspondiente para las 78 cuencas en régimen natural.

Los resultados señalan 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. Cabe mencionar que hay algunas cuencas con escasa información registrada o con pequeñas áreas aportantes que presentan índices de eficiencia inferiores a cero.

### 3.2. Regionalización de parámetros

El análisis realizado para estos efectos considera como potenciales donantes a aquellas que no tienen lagos. Lo anterior se debe a que las cuencas calibradas con presencia de lagos (ocho en total), poseen un comportamiento hidrológico distinto al resto de las cuencas, generando un volumen de regulación y evaporación. De este modo, si cuencas con lagos transfirieran 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.

En base a los resultados obtenidos en un proceso de validación cruzada (Figura 3-3) con las cuencas ya calibradas, se obtuvo que la clasificación óptima es aquella que considera pixeles según atributos climáticos y una asignación de cuencas por cercanía. Se decide, adicionalmente, que aquellas cuencas con índices de eficiencia no aceptables no son candidatas a donar parámetros a otras cuencas sin información fluviométrica o con alto grado de intervención.

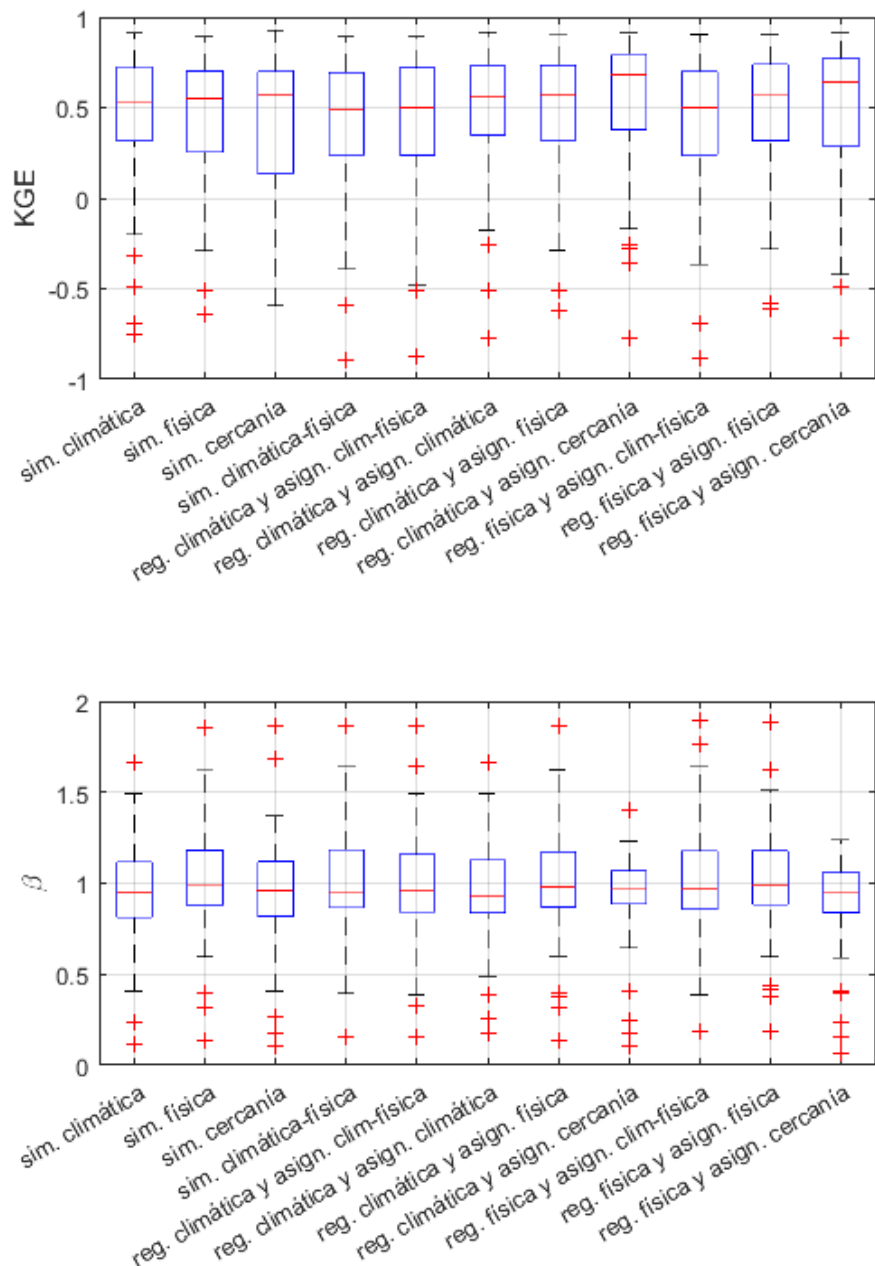


Figura 3-3: Variación de los índices KGE (panel superior) y  $\beta = \bar{Q}_{mod}/\bar{Q}_{obs}$  (panel inferior) para validación cruzada en las cuencas en régimen natural.

### 3.3. Estimación del Balance Hídrico 1985-2015 para cuencas DARH en la zona de estudio

En esta sección, se resume la estimación del balance hídrico para toda la zona de estudio y se comparan los resultados con el balance propuesto por DGA (1987).

Considerando el criterio de regionalización seleccionado en el acápite anterior, se estimaron los principales flujos de interés hidrológico – escorrentía, evapotranspiración y precipitación – los cuales se muestran en la Figura 3-4.

Para las cuencas DARH definidas en el Atlas del Agua (DGA, 2015) se muestran, en la Tabla 3-1, los principales flujos hidrológicos – precipitación media anual (P), evapotranspiración natural (ET), escorrentía natural ( $Q_{VIC}$ ), la estimación de la demanda evapotranspirativa por riego (Dda. ET), el aporte glaciario en cada cuenca, la estimación de la recarga, la evapotranspiración potencial (PET) según el modelo VIC y la fórmula de Hargreaves –, junto a la temperatura media de cada sistema y la variación del almacenamiento adimensional (2021valores negativos indican que la cuenca pierde agua almacenada, mientras que valores positivos indican que los almacenamientos en la cuenca aumentan).

En la Figura 3-5 se sintetiza el balance hídrico adimensional de las cuencas junto a las curvas de Budyko (Budyko, 1974). De esta figura 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%; el análisis del índice de aridez ( $PET / P$ ) indica 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.

### 3.4. Comparación con Balance de 1987

La Figura 3-6 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 menos de precipitación anual, 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]. Se observa también una disminución de la desviación estándar de la climatología actual con respecto a la correspondiente al estudio DGA (1987).

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 (isoyetas versus producto grillado regional).

**Tabla 3-1: Principales flujos hidrológicos para las cuencas DARH según el criterio de regionalización**

| DARH | Nombre                                                   | P      | Q      | ET    | Riego | Glaciar | Recarga | ETP (VIC) | ETP (Hargreaves) | T    | Error |
|------|----------------------------------------------------------|--------|--------|-------|-------|---------|---------|-----------|------------------|------|-------|
|      |                                                          | mm/año |        |       |       |         |         |           |                  | [°C] | [%]   |
| 800  | Cuencas Costeras entre límite región y río Itata         | 1024,9 | 488,8  | 536,5 | 0     | 0       | 487,7   | 1686,3    | 1279,5           | 12,2 | 0,0%  |
| 801  | Río Itata                                                | 1413,4 | 969,8  | 444,6 | 130,3 | 0,4     | 966,7   | 1563,9    | 1321,1           | 11,9 | -0,1% |
| 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           | 12,7 | -0,1% |
| 803  | Río Biobío                                               | 1709,9 | 1277,3 | 435,0 | 35,1  | 1,6     | 1269,2  | 1498,1    | 1234,8           | 10,2 | -0,2% |
| 804  | Arauco                                                   | 1637,2 | 1030,8 | 608,7 | 0,5   | 0,0     | 1027,7  | 1612,7    | 1245,8           | 11,9 | -0,1% |
| 805  | Costeras entre Punta Lavapié y Río Lebu                  | 1537,9 | 1062,3 | 477,1 | 0,2   | 0,0     | 1058,5  | 1766,0    | 1224,9           | 11,8 | -0,1% |
| 806  | Costeras entre Lebu y Tirúa                              | 1382,3 | 874,9  | 508,9 | 0,6   | 0,0     | 872,5   | 1593,9    | 1223,4           | 11,7 | -0,1% |
| 900  | Río Imperial                                             | 1561,8 | 1091,1 | 472,6 | 135,6 | 0,7     | 1089,0  | 1463,9    | 1233,7           | 11,1 | -0,2% |
| 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           | 11,4 | -0,1% |
| 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           | 12,0 | -0,1% |
| 903  | Río Toltén                                               | 2260,5 | 1888,9 | 374,3 | 26,4  | 5,1     | 1883,2  | 1347,5    | 1210,3           | 9,8  | -0,3% |
| 904  | Río Queule                                               | 1718,4 | 1217,1 | 501,8 | 0,0   | 0,0     | 1215,3  | 1456,7    | 1193,4           | 11,2 | 0,0%  |
| 1400 | Cuencas Costeras Los Ríos Norte                          | 1864,3 | 1275,3 | 589,2 | 2,1   | 0,0     | 1272,8  | 1435,6    | 1177,7           | 11,0 | 0,0%  |
| 1401 | Río Valdivia                                             | 2279,7 | 1828,9 | 451,7 | 14,0  | 1,8     | 1822,5  | 1292,6    | 1161,8           | 10,0 | 0,0%  |
| 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           | 10,3 | 0,0%  |
| 1403 | Río Bueno                                                | 2198,6 | 1723,8 | 475,9 | 10,7  | 0,5     | 1717,6  | 1311,9    | 1162,1           | 10,2 | -0,1% |
| 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           | 10,4 | 0,0%  |
| 1001 | Río Maullín                                              | 1855,0 | 1417,4 | 437,2 | 0,2   | 0,6     | 1416,0  | 1368,4    | 1110,7           | 10,7 | 0,0%  |
| 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           | 10,9 | 0,0%  |

| DARH | Nombre                                                    | P      | Q      | ET    | Riego | Glaciar | Recarga | ETP (VIC) | ETP (Hargreaves) | T    | Error |
|------|-----------------------------------------------------------|--------|--------|-------|-------|---------|---------|-----------|------------------|------|-------|
|      |                                                           | mm/año |        |       |       |         |         |           |                  | [°C] | [%]   |
| 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           | 8,9  | 0,0%  |
| 1004 | Río Petrohué y Lago Todos Los Santos                      | 2921,1 | 2676,7 | 245,2 | 0,0   | 11,4    | 2672,8  | 1166,9    | 1116,4           | 7,6  | -0,4% |
| 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           | 7,3  | -0,1% |
| 1006 | Río Puelo                                                 | 2372,9 | 2179,0 | 183,9 | 0,0   | 12,6    | 2171,2  | 1112,2    | 961,6            | 6,2  | -0,1% |
| 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           | 7,8  | -0,7% |
| 1008 | Río Yelcho                                                | 2144,0 | 1923,2 | 224,3 | 0,1   | 9,1     | 1882,5  | 1040,4    | 941,9            | 6,2  | -0,6% |
| 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           | 8,3  | -0,9% |
| 1010 | Cuencas Islas Chiloé y Circundantes                       | 1924,5 | 1365,3 | 558,7 | 0,0   | 0,0     | 1363,4  | 1430,9    | 1073,4           | 10,6 | 0,0%  |
| 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            | 5,9  | -0,6% |
| 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           | 6,6  | -0,1% |
| 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           | 9,6  | 0,0%  |

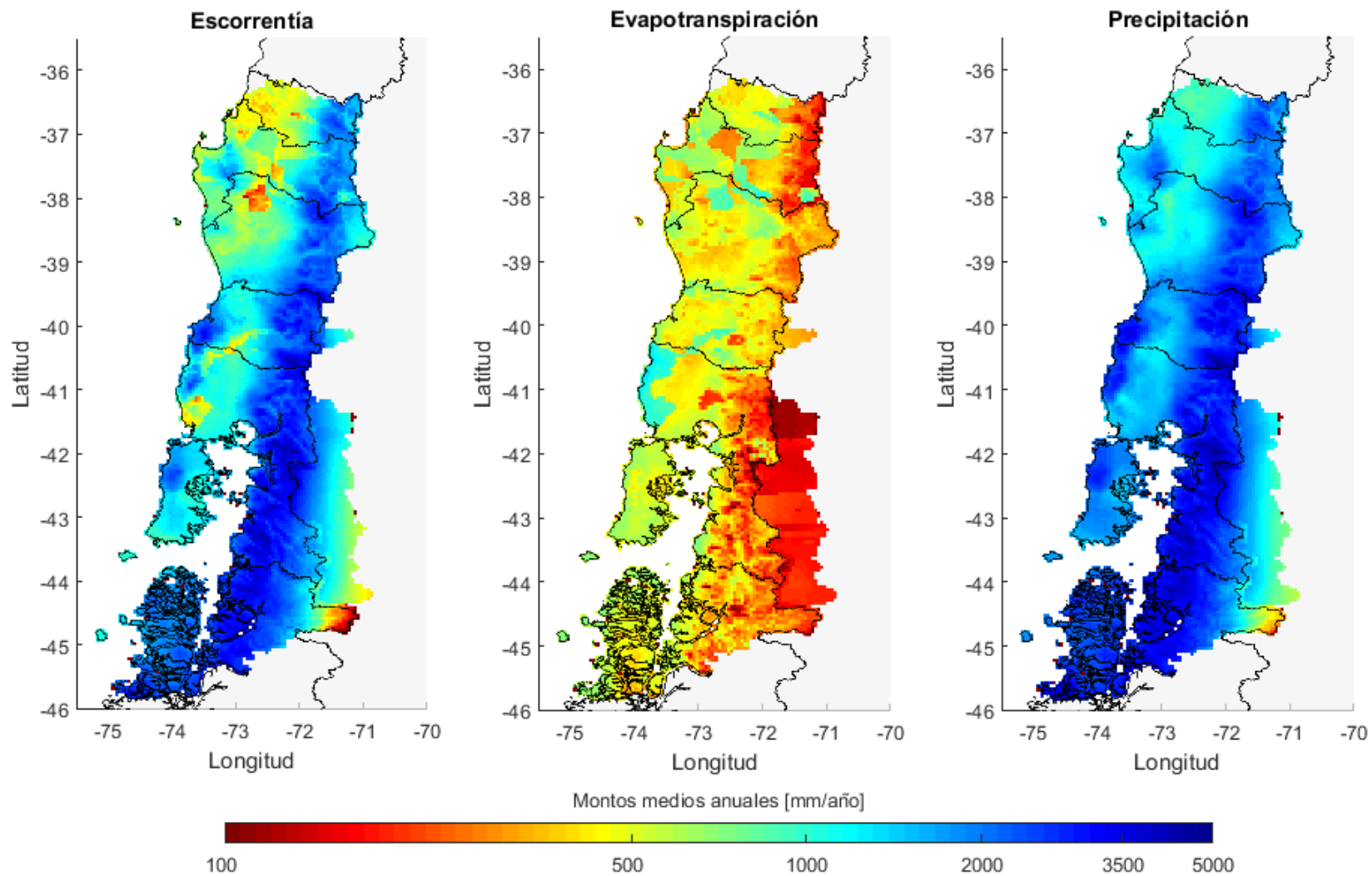


Figura 3-4: Escoorrentia, Evapotranspiración natural (sin efecto de riego) y Precipitación media anual. Período abr-1985 a mar-2015

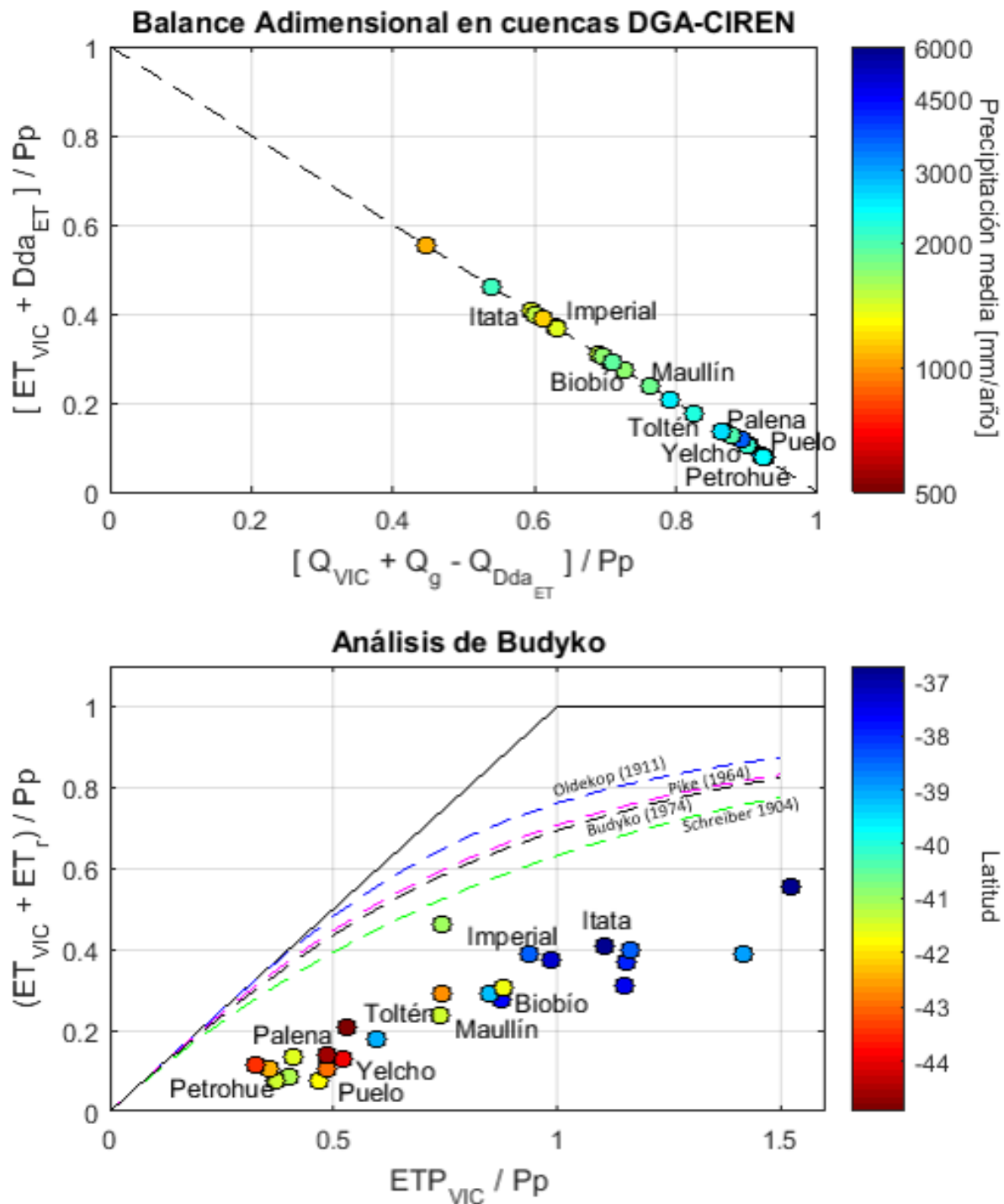


Figura 3-5: Balance hídrico adimensional y análisis de Budyko para cuencas DARH en período 1985-2015.

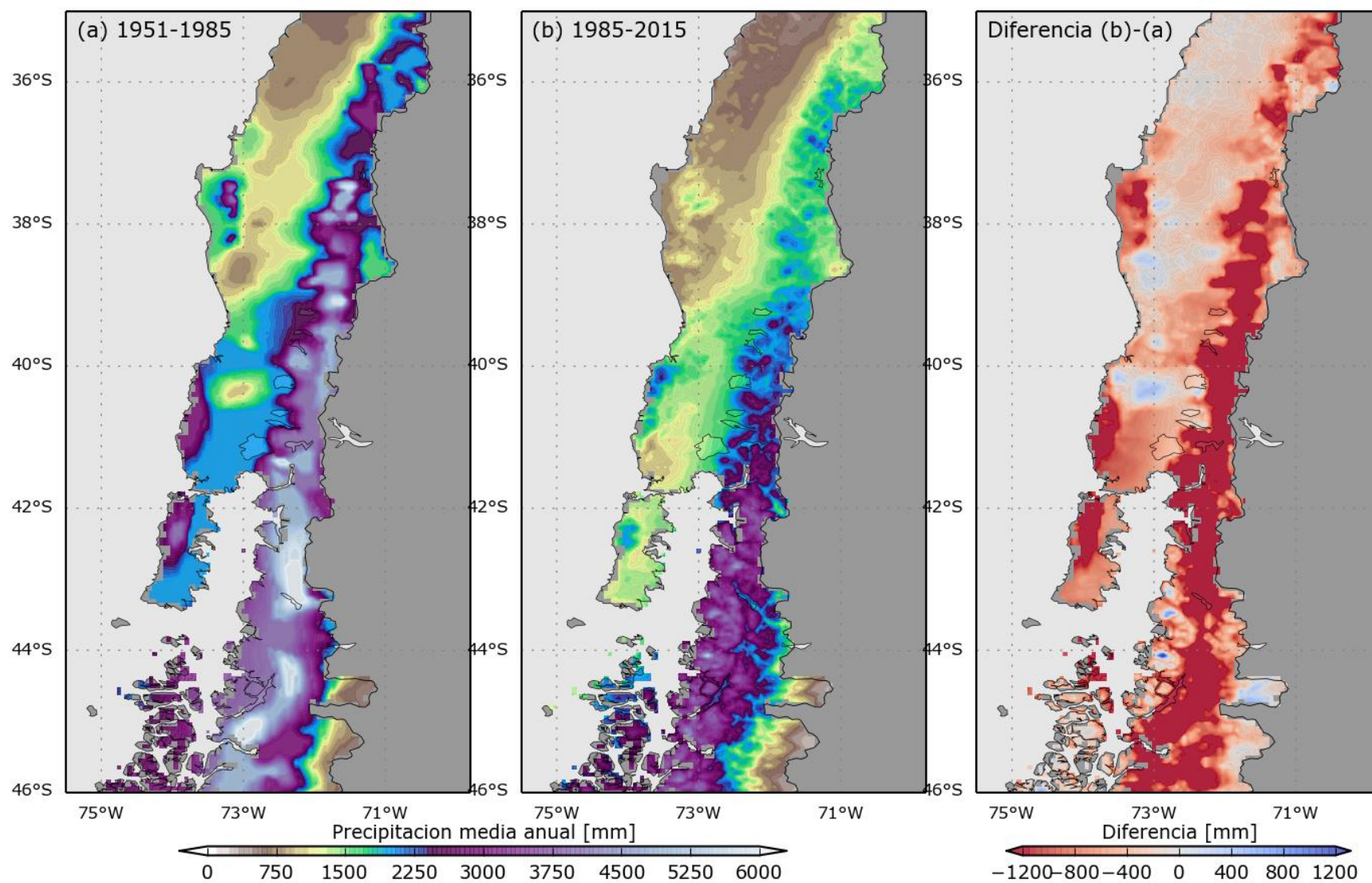


Figura 3-6: Climatología de precipitaciones anuales promedio para los estudios DGA (1987) y proyecto actual (paneles a y b) y diferencia de precipitaciones (panel c).

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 3-7). En relación con los estadísticos, estos indican que habría aumentado la temperatura media anual 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.

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 cuanto a 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 frío, lo que generaría impactos importantes en los recursos hídricos.

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, se tendrían disminuciones de caudal entre un 3% y un 32%, y que en los ríos Bio-Bío, Imperial y Queule se habría tenido aumentos muy significativos en escorrentía (Tabla 3-2). Es importante notar que no existe una correspondencia en todas las cuencas DARH respecto a las cuencas BNA, por lo que sólo se muestra la comparación en aquellas donde la asociación hidrográfica lo permite.

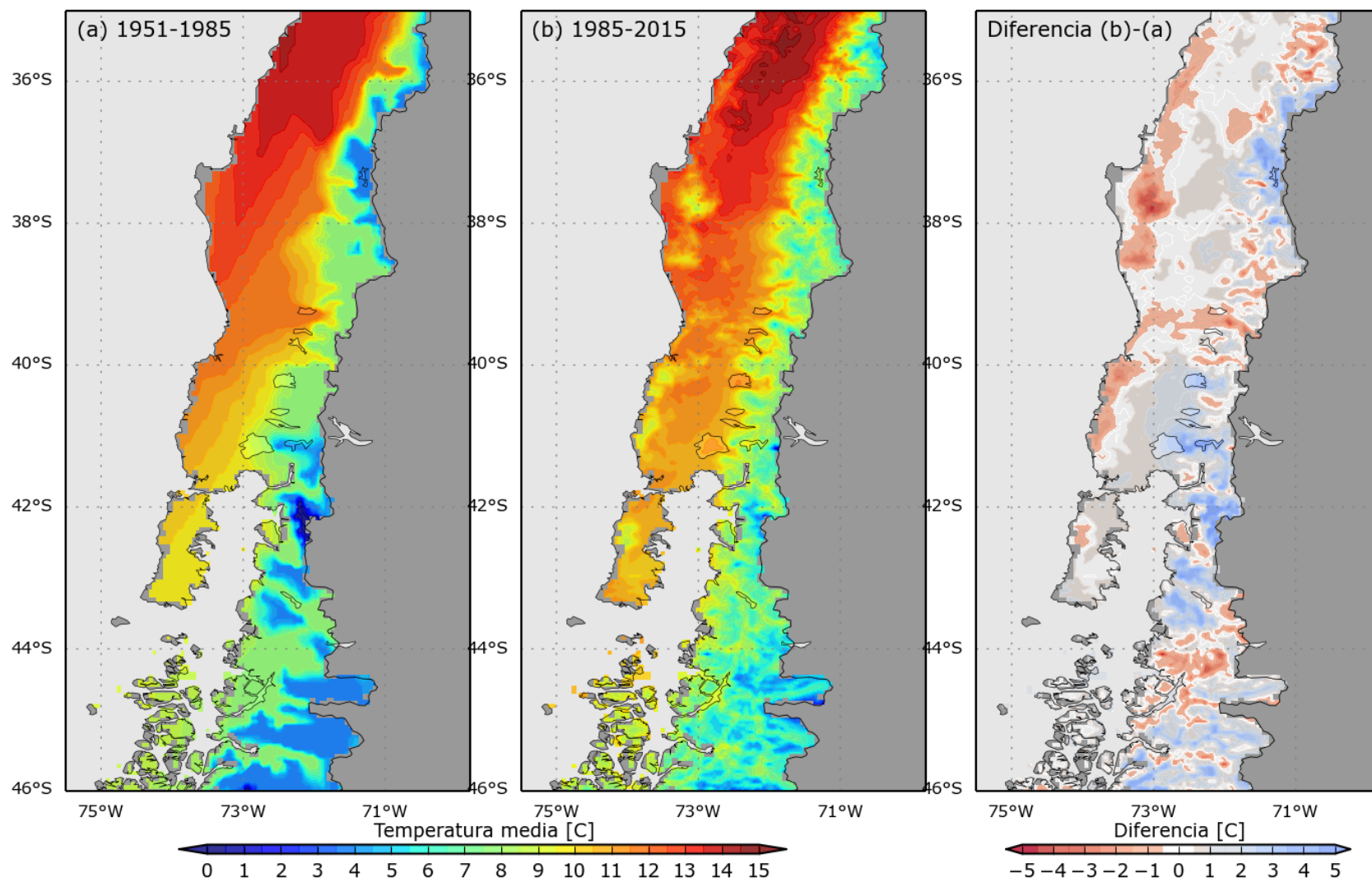


Figura 3-7: Climatología de temperatura media anual para los estudios DGA (1987) y proyecto actual (paneles a) y b) y diferencia de temperaturas.

**Tabla 3-2: Variaciones de distintas componentes del balance hídrico entre DGA periodo actual (1985-2015) y el 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%              |

## 4. BALANCE HÍDRICO BAJO CAMBIO CLIMÁTICO

Una vez realizada la regionalización de parámetros, y utilizando las forzantes meteorológicas proyectadas usando los modelos GCM (CCSM4, IPSL, CSIRO y MIROC)<sup>4</sup>, se procesó el modelo hidrológico VIC para todo el período en estudio (1985 a 2060) y se estimaron los principales flujos de interés hidrológico: escorrentía, evapotranspiración y precipitación. Además, se obtuvo, para cada una de las cuencas DARH, el balance de masa adimensional según los cuatro GCMs considerados.

En la Figura 4-1 se aprecia que, respecto al balance de masa de la Figura 3-5, existe un aumento de evapotranspiración y una disminución del volumen de escorrentía, siendo el más severo en las reducciones de caudal el modelo IPSL. Por otra parte, el cambio climático generaría una reducción generalizada de la precipitación en toda la zona de estudio, tal como se aprecia en la Figura 4-2. Esta reducción provoca, en todas las cuencas y para todos los GCMs, una reducción en la escorrentía, no así de la evapotranspiración. Esta última tiene un comportamiento variable según la cuenca que se analice.

Finalmente, en la Figura 4-3 se aprecian las variaciones promedio de la escorrentía ( $\Delta Q$ , panel izquierdo) y la evapotranspiración natural ( $\Delta ET$ , panel derecho), estimadas para el período 2030-2060, según los cuatro GCMs. Se aprecian grandes disminuciones de escorrentía en zonas de mayor precipitación (zonas cordilleranas que experimentan disminuciones importantes de precipitación) y en zonas con aumentos de evapotranspiración natural.

---

<sup>4</sup> “CCSM4”; IPSL-CM5A-LR: “IPSL”; CSIRO-Mk3.6.0: “CSIRO” y MIROC-ESM: “MIROC”.

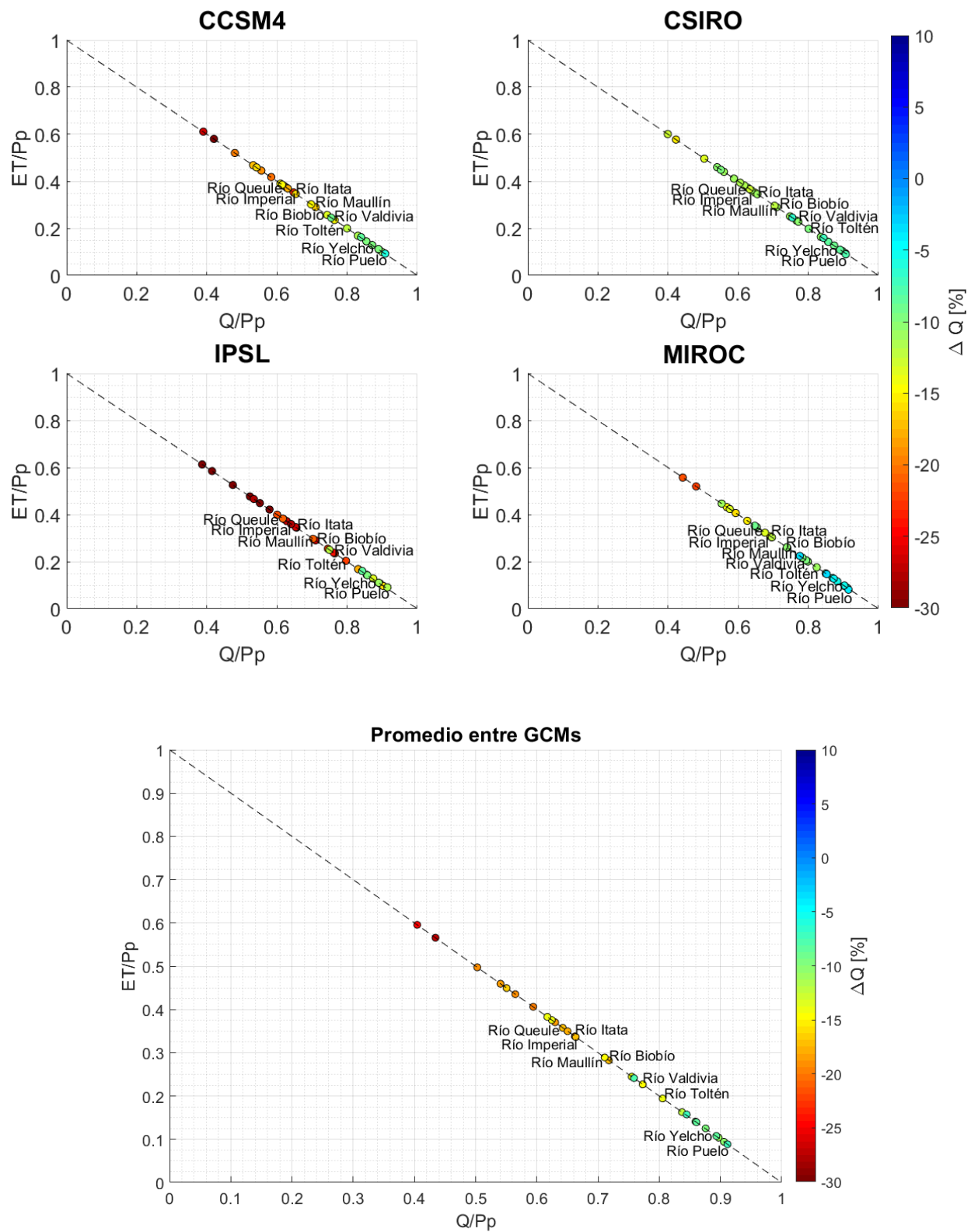


Figura 4-1: Balance de masa adimensional para las cuencas DARH bajo cambio climático. El balance considera el período 2030-2060, mientras que la variación porcentual de escorrentía ( $\Delta Q$ ) compara dicho período con el período 1985-2015. Panel inferior, variación promedio entre los cuatro GCMs: CCSM4, CSIRO, IPSL y MIROC.

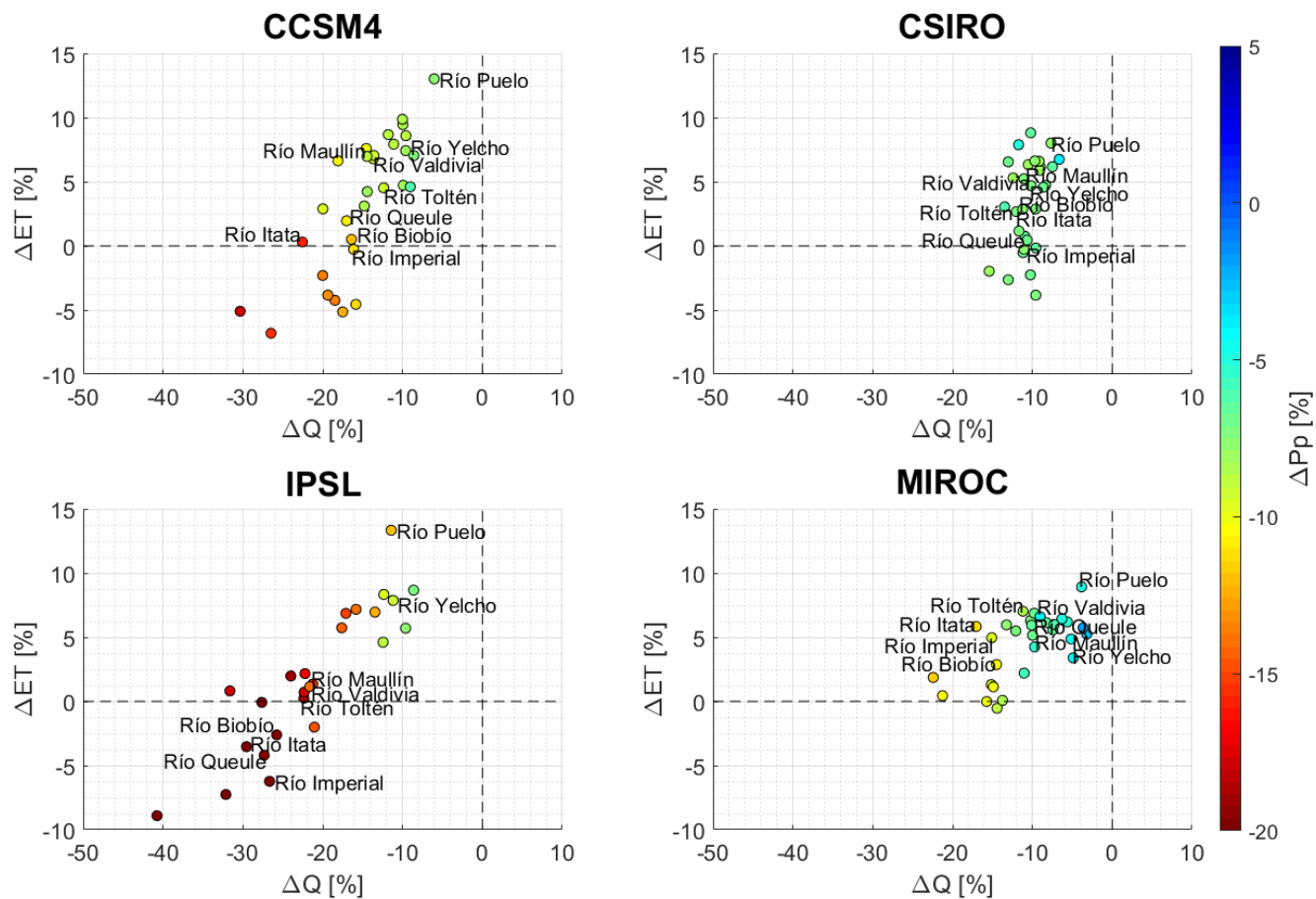


Figura 4-2: Variación de la precipitación, escorrentía y evapotranspiración para cada uno de los modelos seleccionados en las cuencas DGA-CIREN. El cambio se realiza entre los periodos abr/2030-mar/2060 y abr/1985-mar/2015 para GCMs CCSM4, CSIRO, IPSL y MIROC.

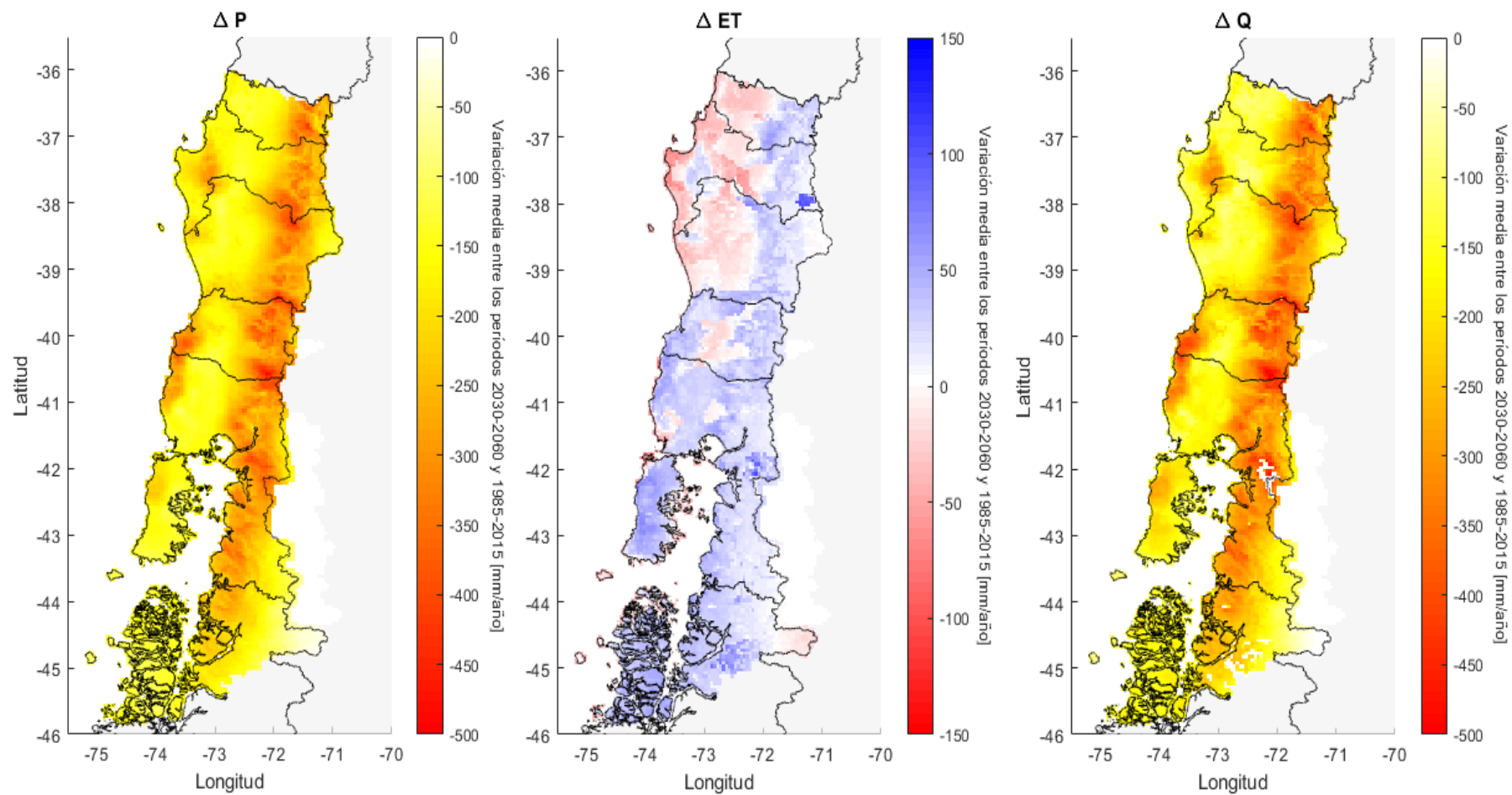


Figura 4-3: Variación promedio entre los cuatro GCMs seleccionados para los flujos de precipitación (panel izquierdo), evapotranspiración (panel central) y escorrentía (panel derecho). Los periodos de comparación corresponden a abr/2030-mar/2060 y abr/1985-mar/2015.

## 5. PROYECTO SIG

El proyecto SIG contiene los resultados de la aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas Sur y parte norte de la Austral. Como propósito fundamental, se buscó que la información sea de rápida manipulación e interpretación por parte del usuario, de modo que se encuentra organizado de forma que permita conseguir este propósito.

Para ello, el proyecto consideró un árbol de directorios que muestra cómo se organiza la información de forma que se pueda acceder a todos los contenidos. El proyecto está estructurado para ser compatible con ArcGIS v10.2 y permitir generación de Geodatabases. Es posible crear cartas, mapas y figuras en formatos mxd (de almacenaje de información), pdf y png (de salida y visualización). Además, el sistema permite la presentación de resultados en formato digital (en dispositivo de almacenamiento) y formato papel (para imprimir).

La escala temporal a la que se presentan las forzantes y los flujos y estados estimados con el modelo VIC, es mensual y anual. Mientras que la escala espacial de cada celda es de  $0,05^\circ$  decimales equivalente a 5 km aproximadamente. Los resultados se extienden entre las latitudes  $-36,15$  a  $-45,85^\circ$  y longitudes  $-75,2$  a  $-70,8^\circ$ , abarcando el período temporal entre 1985 y 2060.

## 6. CONCLUSIONES

La información de forzantes meteorológicas actual permite realizar simulaciones hidrológicas satisfactorias 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 algunas cuencas en régimen natural. Adicionalmente, resulta necesario evaluar cuáles son las zonas de mayor incertidumbre, en base a los procedimientos usados para desarrollar las forzantes. Del mismo modo, es necesario caracterizar la incertidumbre asociada a la modelación de la escorrentía en aquellas cuencas que contienen lagos, donde se desconoce la curva de embalse, y también en la conceptualización de los cuerpos glaciales.

Se considera que los indicadores de eficiencia resultantes del proceso de calibración de las cuencas en régimen natural son satisfactorios ( $KGE > 0,5$  en el 80% de las cuencas). Por otra parte, si bien resulta satisfactoria la regionalización de parámetros, se recomienda explorar algunas de las otras opciones planteadas.

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, éstas habrían disminuido en 866 [mm] en el período, mientras que la temperatura media anual habría aumentado  $0,5^{\circ}\text{C}$ . 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 escorrentía, 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 directamente 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 errores en la representación de la precipitación.

En términos de cambio climático, para todas las cuencas DARH analizadas, los GCMs analizados proyectan una disminución de caudal medio anual (en promedio -25%, el más desfavorable, y -10% el más favorable) y para gran parte de ellas un aumento en evapotranspiración. Esto último tiene implicancias en el cambio del régimen hidrológico, en donde en un inicio todas las cuencas analizadas tenían coeficiente de escorrentía mayor a 0,5 y de mediana 0,7; según las proyecciones climáticas el promedio de los GCM desplaza esta mediana a 0,65 y deja a algunas cuencas menores con un coeficiente de escorrentía menor a 0,5. En términos espaciales, el cambio más significativo se da en las zonas cordilleranas.

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.

## 6.1. Recomendaciones

Con el fin de disminuir las brechas de información y mejorar las estimaciones de las componentes del balance hídrico, es posible establecer líneas de trabajo prioritario para futuros estudios de este tipo y recomendaciones generales para la Dirección General de Aguas y su plan de instrumentación y monitoreo de cuerpos de agua:

Disponibilidad de información base: La información de conductividades de suelo provista por CIREN es un parámetro clave a la hora contrastar parámetros de calibración en cuencas naturales. Deben realizarse esfuerzos para usar esta información en las macrozonas Norte y Centro del país y ampliar la zona con información.

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 la DGA implementar una política de instrumentación de equipos adecuados para medir precipitación sólida.

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.

Modelación hidrológica: Se sugiere evaluar la posibilidad de incorporar otros modelos hidrológicos con estructura flexible que permitan incorporar conectividad lateral entre celdas, así como otros procesos que no han sido representados por el modelo VIC.

Proyecto SIG: Tal y como se ha mencionado previamente, sería ideal que la plataforma SIG estuviese disponible para consulta en línea, con el fin de garantizar el acceso a la información a todo el público, independientemente que este tenga licencias del software en donde se desarrolló este proyecto.

## REFERENCIAS

- Blöschl G, Montanari A. (2010). Climate change impacts - throwing the dice? *Hydrological Processes* **24**: 374–381 DOI: 10.1002/hyp.7574
- Budyko MI. (1974). *Climate and Life*. Academic Press: London.
- Cannon AJ, Sobie SR, Murdock TQ. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate* **28** (17): 6938–6959 DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00754.1
- 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)* Available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home> [Accessed 20 January 2018]
- Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda MA, Balsamo G, Bauer P, et al. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **137** (656): 553–597 DOI: 10.1002/qj.828
- DGA. (1987). Balance hídrico de Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile.
- DGA. (2015). Atlas del Agua - Chile 2016. Santiago, Chile. S.E.B. N°6.
- 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 QY, Gupta VK, Sorooshian S. (1993). Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications* **76** (3): 501–521 DOI: 10.1007/BF00939380
- Huntington TG. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology* **319** (1–4): 83–95 DOI: 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* (TF Stocker, D Qin, G-K Plattner, M Tignor, SK Allen, J Boschung, A Nauels, Y Xia, V. Bex, and PM Midgley, eds). Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Liang X, Wood EF, Lettenmaier DP. (1996). Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modification. *Global and Planetary Change* **13** (1–4): 195–206 DOI: 10.1016/0921-8181(95)00046-1
- Milly PCD, Dunne KA, Vecchia A V. (2005). Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature* **438** (7066): 347–50 DOI: 10.1038/nature04312