

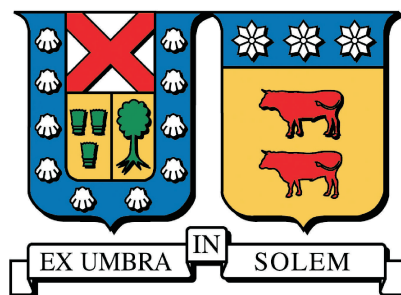
**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**

**PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN  
CRECIDAS DE CUENCAS POCO INTERVENIDAS  
ENTRE LOS RÍOS ACONCAGUA Y CACHAPOAL**

**ALEXANDER EUGENIO FUENTEALBA VALDÉS**

**Ingeniero Civil**

Julio de 2018



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

**PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN  
CRECIDAS DE CUENCAS POCO INTERVENIDAS  
ENTRE LOS RÍOS ACONCAGUA Y CACHAPOAL**

Memoria de Título presentada por

**ALEXANDER EUGENIO FUENTEALBA VALDÉS**

Como requisito parcial para optar al título de

**Ingeniero Civil**

Profesor Guía

MSc. Miguel Ángel Lagos Zúñiga

Julio de 2018

TÍTULO DE LA TESIS

**PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN CRECIDAS DE CUENCAS POCO INTERVENIDAS ENTRE LOS RÍOS ACONCAGUA Y CACHAPOAL**

AUTOR

**ALEXANDER EUGENIO FUENTEALBA VALDÉS**

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el título de Ingeniero Civil de la Universidad Técnica Federico Santa María.

MSc. Miguel Lagos Zúñiga

---

MSc. Joaquín Meza Araya

---

Ph.D. Lina Castro Heredia

---

Valparaíso, Chile, Julio de 2018.



*“Puedes cambiar antes de que sea necesario,  
o esperar a que sea demasiado tarde.”*

***Anónimo***



---

# AGRADECIMIENTOS

---

Con este trabajo se da término a una hermosa etapa de mi vida, en la cual con mi esfuerzo y apoyo de otras personas pude salir adelante. En este apartado me gustaría agradecer a las personas que hicieron posible que yo pudiera finalmente ser un Ingeniero Civil de la USM.

Primero agradecer a mi familia, mis padres, hermanos y en especial a mi abuelito, que puedo decir que es el gran gestor de mi situación actual. Mis padres que siempre me han apoyado en todo y mis hermanos que con su compañía me recuerdan que nunca estaré solo. Mi hermana Franci, muy madura, tanto que algunas veces ella me enseña a mí, le quiero recordar que siempre estaré ahí para protegerla y darle algún consejo. Mi hermano Xavi que aunque lo reto quizás demasiado, lo estimo mucho y espero que sea una gran persona, mejor de la que ahora es.

Durante la etapa universitaria conocí grandes personas, pero las que más estimo son mi grupo de estudio, el Egaña, Garay, Misraji y hasta el Yerko. Sin ellos, sin duda me hubiese demorado mucho más en lograr sacar los ramos. Por esto, su compañía y cariño les estoy muy agradecido cabros! Y a todos los cabros del ta' como quiere, que de alguna u otra manera estuvieron presentes, al Franco que me recibía en el depa para almorzar y nunca decía que no, siempre la mejor de las disposiciones. Como olvidar al Iván, seco... siempre ayudando a todos, más de alguna vez me salvó.

Quisiera también agradecer a los profes de aguas, el profe Catalán, Flores, Kamann y Stöwhas, de quienes obtuve el amor por el área hidráulica, en especial por la hidrología, rama que siento que es la más importante por el gran impacto que tiene en toda la vida en el planeta.

Finalmente me gustaría agradecer a Miguel Lagos, mi profesor guía de la tesis, quien me apoyo en el tema que a mí me gustaba y nunca tuvo un pero, sin importar que fuéramos de casas de estudio diferente. Y a Camila Álvarez por facilitar los datos necesarios.

Muchas gracias a todos.

---

# RESUMEN

---

Los diseños hidrológicos de obras civiles, obras de riego, derechos de aguas concedidos, entre otros, basan sus cálculos en estadística de caudales que se considera estacionaria. Estos últimos años se ha hablado del cambio climático que altera este paradigma, que nos hace replantearnos el problema de hacer proyecciones de caudales en el futuro. Este estudio evalúa los potenciales impactos de cambio climático, proyectados al año 2100 en varias cuencas montañosas entre los ríos Aconcagua y Cachapoal. Estas cuencas son de gran importancia para el sistema socio-económico de Chile, ya que proveen de agua a más de 8 millones de personas. El modelo hidrológico TUW utilizado, correctamente calibrado y validado puede simular la escorrentía de ríos, mediante la información de forzantes climáticas obtenidas de la base de datos CAMELS-CL del CR2. En una segunda etapa se perturban las forzantes climáticas con deltas obtenidos desde 5 modelos climáticos globales (GCM). Finalmente se obtienen los resultados de curvas de duración, promedios de caudales medios diarios y caudales de periodo de retorno alto en las cuencas con mejor ajuste del modelo. Estos resultados sugieren una disminución en la disponibilidad anual del recurso hídrico, cambio de régimen hídrico de las cuencas y una disminución en caudales de periodo de retorno alto.

**Palabras Clave:** Cambio climático, Andes, Modelación hidrológica, Régimen hidrológico. *Keywords.*

---

# ABSTRACT

---

Hydrological designs of civil works, irrigation systems, granted water rights, among others, base their calculations on flow statistics that are considered stationary. In recent years there has been talk of climate change that alters this paradigm, which makes us rethink the problem of making flow projections into the future. This study evaluates the potential climate change impacts until 2100 in several mountain basins between the Aconcagua and Cachapoal rivers. These basins are of a great importance for the socio-economic system of Chile, since they provide water to more than 8 million people. The TUW hydrological model used, correctly calibrated and validated, can simulate the runoff of rivers, through the information of climatic forcings obtained from the CAMELS-CL database of CR2. In a second stage, climatic forcings are disturbed with deltas obtained from 5 global climatic models (GCM). Finally, the results of duration curves, averages of mean daily flows and high return period flows are obtained in basins with the best fit of the model. These results suggest a decrease in the annual availability of water resources, a change in the hydrological regime of the basins and a decrease in flows of a high return period.

**Keywords:** Climate change, Andes, Hydrological modelling, Hydrological regime.

*palabras clave*

---

# GLOSARIO

---

1. **Gases de invernadero (*Greenhouse gases*, GHG):** Es un gas atmosférico que absorbe y emite radiación dentro del rango infrarrojo. Los principales GHG en la atmósfera terrestre son el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano, el óxido de nitrógeno y el ozono. Estos gases son de vital importancia, ya que sin ellos la temperatura de promedio de la tierra sería de  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en lugar de la media actual de  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
2. **Revolución industrial:** Un periodo de rápido crecimiento industrial con profundas consecuencias sociales y económicas. Comienza en Inglaterra durante la segunda mitad del siglo XVIII y luego se extiende a Europa y mas tarde a Estados Unidos. El Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) sitúa arbitrariamente su inicio en 1750.
3. **Cambio climático:** Es un cambio en la distribución estadística de los patrones meteorológicos durante un periodo prolongado de tiempo. Referido al calentamiento global, es un alza de temperatura respecto del inicio de la revolución industrial.
4. **Representative Concentration Pathways (RCP):** Corresponden a 4 distintas trayectorias de concentración de GHG, que dependen de las políticas de mitigación de emisiones para enfrentar el cambio climático. Los 4 escenarios son los RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, que consideran políticas muy restrictivas (primer escenario), hasta ninguna política restrictiva (último escenario).
5. **Modelo de circulación general (*General circulation model*, GCM):** Es un modelo numérico que representa los procesos de la atmósfera, océanos, criósfera y superficie terrestre. Al incrementar las concentraciones de GHG puede simular la respuesta del sistema climático global.

6. **Modelo hidrológico:** Es una representación simple de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática. El sistema físico real que generalmente se representa es la cuenca hidrográfica y cada uno de sus componentes del ciclo hidrológico. El modelo puede considerar los procesos físicos de la cuenca, modelo conceptual, o no considerarlos, modelo de caja negra. Por otro lado puede considerar la cuenca como un todo, modelo concentrado, o considerar la cuenca subdividida en unidades más pequeñas, modelo distribuido.



---

# CONTENIDO

---

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>IV</b>
<b>CONTENIDO</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos Generales . . . . .	3
1.2. Objetivos Específicos . . . . .	3
1.3. Estructura de la Tesis . . . . .	4
<b>2. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO</b>	<b>5</b>
2.1. Cuenca río Aconcagua . . . . .	5
2.2. Cuenca río Maipo . . . . .	8
2.3. Cuenca río Rapel . . . . .	12
2.4. Metodología de selección de cuencas . . . . .	15
<b>3. METODOLOGÍA Y DATA</b>	<b>18</b>
3.1. Observaciones y proyecciones climáticas . . . . .	18

3.1.1.	Datos observados . . . . .	18
3.1.2.	Proyecciones climáticas . . . . .	20
3.1.2.1.	Coeficiente de variación de precipitación y delta de temperatura . . . . .	22
3.1.2.2.	Escalamiento de GCM . . . . .	25
3.2.	Modelo hidrológico TUW . . . . .	26
3.2.1.	Método de simulación . . . . .	26
3.2.2.	Criterios de eficiencia . . . . .	30
<b>4.</b>	<b>MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON EL MODELO TUW</b>	<b>32</b>
4.1.	Datos de entrada . . . . .	32
4.2.	Calibración y validación . . . . .	34
4.2.1.	Calibración . . . . .	34
4.2.2.	Validación . . . . .	38
<b>5.</b>	<b>PROYECCIONES BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO</b>	<b>40</b>
5.1.	Generación de series de datos de entrada al modelo . . . . .	40
5.2.	Proyecciones bajo escenarios de cambio climático . . . . .	41
5.2.1.	Curvas de duración . . . . .	41
5.2.2.	Promedio de caudales medios diarios . . . . .	47
5.2.3.	Caudales máximos . . . . .	50
<b>6.</b>	<b>DISCUSIONES</b>	<b>54</b>
6.1.	Incertidumbre . . . . .	54
6.1.1.	Datos . . . . .	54
6.1.1.1.	CAMELS-CL . . . . .	54
6.1.1.2.	GCMs . . . . .	56
6.1.2.	Modelo TUW . . . . .	56
6.2.	Resultados . . . . .	58
6.2.1.	Calibración y validación . . . . .	58
6.2.2.	Curva de duración . . . . .	58

6.2.3. Promedio de caudales medios diarios . . . . .	59
6.2.4. Caudales máximos . . . . .	59
6.2.5. Función objetivo . . . . .	60
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>61</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>63</b>
<b>A. RELACIONES ETP VS TEMPERATURA</b>	<b>66</b>
<b>B. DELTAS GCM</b>	<b>69</b>
<b>C. CALIBRACIÓN</b>	<b>78</b>
<b>D. VALIDACIÓN</b>	<b>83</b>



---

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

2.1. Red Hidrográfica de la cuenca del río Aconcagua. . . . .	6
2.2. Curva de variación estacional Río Aconcagua en Romeral. . . . .	7
2.3. Diagrama climático de la estación Vilcuya. . . . .	7
2.4. Red Hidrográfica de la cuenca del río Maipo. . . . .	10
2.5. Curva de variación estacional Río Maipo en el Manzano. . . . .	10
2.6. Diagrama climático de la estación Santiago en Quinta Normal. . . . .	11
2.7. Red Hidrográfica de la cuenca del río Rapel. . . . .	13
2.8. Curva de variación estacional Río Cachapoal 5km abajo junta Río Cortaderal. . . . .	14
2.9. Diagrama climático de la estación Parron. . . . .	14
2.10. Cuencas a modelar . . . . .	16
3.1. Regresión ETp vs temperatura estación Pocuro en el Sifón. . . . .	19
3.2. GCMs seleccionados . . . . .	21
3.3. Delta Pr modelo CNRM-CM5 . . . . .	23
3.4. Delta Temp modelo MIROC-ESM . . . . .	24
3.5. Grilla modelo CCSM4 y centroides de las cuencas de este estudio. . . . .	25
3.6. Estructura esquemática de un modelo HBV similar . . . . .	26
4.1. Diagrama del proceso de calibración y validación. . . . .	34
4.2. Resultados del proceso de calibración, cuenca con mejor y peor ajuste. . . . .	37
4.3. Resultado del proceso de validación, cuenca con mejor ajuste. . . . .	38
4.4. Resultado del proceso de validación, cuenca con peor ajuste. . . . .	39
5.1. Curva de duración cuenca PS . . . . .	41

5.2.	Curvas de duración cuencas MH, YLAJSF y LAJC. . . . .	42
5.3.	Curva de duración cuencas CAJC y PP . . . . .	43
5.4.	Caudales de diferentes periodos de excedencia, estaciones PS, MH y YLAJSF. . . . .	45
5.5.	Caudales de diferentes periodos de excedencia, estaciones LAJC, CAJC y PP. . . . .	46
5.6.	Caudales medios mensuales cuencas PS y MH . . . . .	47
5.7.	Caudales medios mensuales cuencas YLAJSF, LAJC y CAJC. . . . .	48
5.8.	Caudales medios mensuales cuenca PP. . . . .	49
5.9.	Caudales extremos cuencas PS, MH y YLAJSF. . . . .	52
5.10.	Caudales extremos cuencas LAJC, CAJC y PP. . . . .	53
6.1.	Comparación entre un modelo concentrado vs un modelo distribuido [CORFO, 2018].	55
6.2.	Inventario de glaciares en la zona de estudio . . . . .	57
6.3.	Extracciones no catastradas . . . . .	58
6.4.	Comparación del uso del MSE y KGE como FO. . . . .	60
A.1.	Relaciones ETp vs temperatura de las estaciones en estudio. . . . .	67
A.2.	Relaciones ETp vs temperatura de las estaciones en estudio. . . . .	68
B.1.	Deltas de precipitaciones acumuladas mensuales en mm del modelo CCSM4. . . . .	70
B.2.	Deltas de temperatura media diaria en °C del modelo CCSM4. . . . .	71
B.3.	Deltas de temperatura media diaria en °C del modelo CNRM-CM5. . . . .	72
B.4.	Deltas de precipitaciones acumuladas mensuales en mm del modelo IPSL-CM5A-LR. . . . .	73
B.5.	Deltas de temperatura media diaria en °C del modelo IPSL-CM5A-LR. . . . .	74
B.6.	Deltas de precipitaciones acumuladas mensuales en mm del modelo IPSL-CM5B-LR. . . . .	75
B.7.	Deltas de temperatura media diaria en °C del modelo IPSL-CM5B-LR. . . . .	76
B.8.	Deltas de precipitaciones acumuladas mensuales en mm del modelo MIROC-ESM. . . . .	77
C.1.	Resultados del proceso de calibración. . . . .	79
C.2.	Resultados del proceso de calibración. . . . .	80
C.3.	Resultados del proceso de calibración. . . . .	81
C.4.	Resultados del proceso de calibración. . . . .	82

D.1. Resultados del proceso de validación. . . . .	84
D.2. Resultados del proceso de validación. . . . .	85
D.3. Resultados del proceso de validación. . . . .	86
D.4. Resultados del proceso de validación. . . . .	87



---

# ÍNDICE DE TABLAS

---

2.1. Cuencas a modelar. . . . .	17
3.1. Nombres de modelos y sus instituciones usados en este estudio. . . . .	21
3.2. Resolución espacial de los modelos en grados. . . . .	21
3.3. Resumen de parámetros usados por el modelo. . . . .	29
4.1. Periodos de calibración y validación. . . . .	33
4.2. Errores preproceso de calibración. . . . .	35
4.3. Valores parametros post calibración. . . . .	36
4.4. Errores proceso de validación. . . . .	38
5.1. Caudales de las estaciones en estudio en diferentes probabilidades de excedencia, para las situaciones de estudio. . . . .	44
5.2. Centroide temporal de las estaciones con mejor ajuste. . . . .	50
5.3. Caudales para varios periodos de retorno en temporada de invierno y verano. . . . .	51
6.1. Porcentaje de área glaciario. . . . .	56



---

# Capítulo 1

---

## INTRODUCCIÓN

La influencia humana en el sistema climático es clara, las recientes emisiones, a partir de la época industrial, de gases de efecto invernadero (*greenhouse gases*, GHG) producto de la acción antropogénica, asociada a la actividad económica y crecimiento poblacional, no tienen precedentes en la historia. Los efectos recientes del cambio climático han tenido impactos generalizados en sistemas humanos y naturales, evidenciándose este cambio en aumentos en la temperatura oceánica y atmosférica, disminución de nieve y glaciares, y un aumento del nivel medio del mar. Continuar con este ritmo de emisiones de GHG causará un mayor calentamiento y cambios más duraderos en todos los componentes del sistema climático, aumentando la probabilidad de impactos severos e irreversibles para las personas y los ecosistemas. Ante este desafío, la adaptación y mitigación son estrategias complementarias para reducir y manejar los riesgos del cambio climático. Reducciones sustanciales de las emisiones en las décadas próximas incrementan las probabilidades de adaptación y reducen costos y desafíos de mitigación [Pachauri et al., 2014].

En cuanto a las proyecciones climáticas de centro y sur América, se estima que existe una alta probabilidad de un descenso en las precipitaciones anuales y un aumento en las temperaturas en los Andes del sur [Christensen et al., 2007]. Por otro lado, se ha podido evidenciar tormentas del tipo cálida, como la ocurrida en Chile central en abril de 2016, donde la elevación de la isoterma 0 °C durante el evento fue de entre 3100 y 3400 m.s.n.m. [Vargas et al., 2017]. En contraste a la isoterma 0 °C media de 2200 m.s.n.m. de la parte alta de la cuenca del río Maipo [Garreaud, 2013].

Dependiendo de las políticas de adaptación y mitigación optadas se definen cinco escenarios *Representative Concentration Pathway* (RCP), que van desde un escenario con fuertes políticas

ambientales que restringen considerablemente las emisiones de GHG, el RCP2.6; hasta un escenario en el que se continúe con las tasas actuales de emisiones de GHG, el RCP8.5 [Pachauri et al., 2014]. Los RCP se simulan en los Modelos de Circulación General (*General Circulation Model*, GCM), estos son desarrollados por diversas instituciones alrededor del mundo y contemplan modelos matemáticos de procesos físicos. Dado que los modelos difieren en los procesos que consideran, se tiene una amplia dispersión entre modelos por lo que se recomienda trabajar con una cantidad de entre 5 y 10 modelos [Chadwick et al., 2017].

Los GCMs utilizados en este trabajo tienen una resolución espacial variada que puede ir desde 0.94 ° hasta 3.75 °, que para utilizarlas a una escala menor resultan demasiado gruesas. Por este motivo es necesario hacer un proceso de downscaling, en el que se escale la información a un punto de interés [Lagos and Vargas, 2011]. Finalmente un modelo hidrológico toma la data obtenida y simula la hidrología local para tener como output la escorrentía superficial, a partir de la cual pueden determinarse las distintas “*hydrological signatures*” de la cuenca (características particulares de una cuenca, como la curva de duración, caudales altos y bajos, escorrentía anual y estacional), con lo que se podrá comparar con los datos actuales y así conocer el impacto económico y social del cambio climático y poder determinar acciones políticas a largo plazo para adaptarse a los escenarios venideros.

Para finales del siglo, en la cuenca del río Maipo, producto del aumento de temperaturas a nivel global y regional, se pronostica una elevación de la isoterma 0 °C y por consiguiente un retroceso de glaciares. Como resultado de este proceso se tendrá inicialmente una alta escorrentía en el periodo de deshielo pero esto irá decreciendo a medida que avanza el siglo. En cuanto a los caudales de invierno, de igual manera se proyectan tendencias al descenso, especialmente bajo el escenario RCP8.5 [Migliavacca et al., 2015]. Por otro lado, la menor disponibilidad del recurso hídrico tendrá consecuencias profundas en el sistema económico-social chileno, ya que grandes urbes, como Santiago, dependen directamente del agua proveniente de precipitaciones y derretimiento de nieves. La poca oferta se verá agravada por la mayor demanda producto del crecimiento demográfico y agropecuario. En términos de energía, mayores temperaturas producirán un aumento en las necesidades de sistemas de aire acondicionado y congelamiento, que además, dadas las características de la matriz energética del país, con una componente importante de generación hidroeléctrica, estresará aún más el uso del recurso hídrico. Y en términos de eventos extremos, se pronostica un aumento de estos, tanto de sequías graves como de inundaciones, que combinado con el crecimiento urbano, crea una situación muy sensible a estos fenómenos. Dado el enfoque multisectorial del problema del calentamiento, se requiere de la misma manera un aporte multidisciplinario para la toma de decisiones [Krellenberg and Hansjürgens, 2014].

## 1.1. Objetivos Generales

El objetivo general de este estudio consiste en desarrollar un estudio de la sensibilidad de crecidas y disponibilidad general de agua ante distintas combinaciones de proyecciones de cambio climático, considerando las variaciones en la precipitación y temperatura generadas por 5 distintos GCM, para varias cuencas de Chile central entre los ríos Aconcagua, Maipo y Cachapoal.

## 1.2. Objetivos Específicos

- Estudiar la posible disminución general del recurso hidráulico en escenarios de cambio climático, en cuencas ubicadas entre los ríos Aconcagua y Cachapoal.
- Evaluar el posible cambio en la estacionalidad de las cuencas en estudio, junto con el adelantamiento o atraso de la temporada de mayor cantidad de agua, frente a proyecciones de cambio climático.
- Evaluar los potenciales impactos de cambio climático en crecidas de periodos de retorno sobre 10 años.

### 1.3. Estructura de la Tesis

Esta tesis se organiza de la siguiente manera:

En el Capítulo 2 se describe las características hidrográficas de las macrocuencas en estudio. Se describe la red hidrográfica y el uso del recurso hídrico. Luego se define la metodología de selección de cuencas para el estudio, cuyo objetivo es la elección de las cuencas menos intervenidas. Finalmente se presenta el resultado de esta selección.

El Capítulo 3, tiene como finalidad la descripción del modelo hidrológico TUW, sus componentes, datos utilizados y criterios de eficiencia. Aquí primero se hace una descripción de los datos de entrada del modelo utilizados para la calibración y validación del modelo, también una descripción de los datos necesarios para las proyecciones climáticas futuras. Luego se hace una descripción del modelo TUW, sus rutinas y parámetros. Y finalmente se realiza una descripción de los criterios de eficiencia utilizados para evaluar el comportamiento del modelo hidrológico.

En el Capítulo 4 se hace una descripción más detallada de los datos utilizados para la calibración y validación del modelo TUW. Luego se muestra el proceso de la calibración y validación, junto con sus resultados.

En el Capítulo 5 se describe brevemente el proceso de generación de la serie de datos de entrada del modelo ante escenarios de cambio climático. Luego se muestran los resultados de las proyecciones mediante curvas de duración, caudales representativos, promedio de caudales diarios y caudales máximos.

En el Capítulo 6 se discuten las fuentes de incertidumbre, tanto de los datos como del modelo utilizados. Luego se discuten los resultados obtenidos en las cuencas con resultados de modelación aceptables, sus curvas de duración, los promedios de caudales medios diarios y caudales máximos. Además se discute sobre el cambio de la función objetivo para obtener una mejor modelación de los caudales observados.

Finalmente un Capítulo de Conclusiones, en el que se discute sobre el cumplimiento de los objetivos de este estudio y se presentan recomendaciones para abordar los impactos del cambio climático en hidrología y diseño de obras.

---

## Capítulo 2

---

# CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

En el presente Capítulo se realiza una descripción general de la zona de estudio que comprende a las cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo y Rapel. Luego, se define una metodología para la selección de cuencas que serán modeladas para su posterior análisis ante potenciales impactos del cambio climático.

### 2.1. Cuenca río Aconcagua

La cuenca del río Aconcagua se encuentra situada entre las latitudes  $32^{\circ}20'$  y  $33^{\circ}07'$  Sur, y entre los meridianos  $71^{\circ}31'$  y  $70^{\circ}00'$  Oeste. Tiene una extensión estimada de  $7.337 \text{ km}^2$ . Geográficamente, esta cuenca se encuentra completa dentro de la Quinta Región político-administrativa. La estación Vilcuya, en la parte media-alta de la cuenca posee una temperatura media anual de  $14.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y una precipitación anual promedio de  $337.9 \text{ mm}$  [Rioseco and Tesser, 2018].

Su régimen hidrológico es de alimentación mixta, o nivo-pluvial. En sus zonas alta y media el río Aconcagua es de régimen marcadamente nival, como se aprecia en la Figura 2.2, presentando un gran aumento de caudal en los meses de primavera producto de los deshielos cordilleranos. En la zona baja, el río Aconcagua posee un régimen pluvial, por lo cual presenta crecidas asociadas

directamente con las precipitaciones.

El río Aconcagua nace en la junta de los ríos Juncal y Blanco, con el gran aporte andino proveniente del río Colorado que recibe por su lado norte a poco más de 13 km aguas abajo. Estos tres ríos provenientes de la alta cordillera de Los Andes con alturas entre 5.400 y 7.000 *m.s.n.m.*, permiten una glaciación importante y un aporte nival considerable, lo que contribuye a fijar las características hidrológicas del río Aconcagua. En su nacimiento, después de la junta de los ríos Juncal y Blanco (1.420 *m.s.n.m.*) ya tiene las características de un río importante con un promedio anual natural de 20,5  $m^3/s$ .

Al iniciar su recorrido ya en el valle central, recibe por su ribera norte el río Putaendo y el estero Quilpué o San Francisco. En su recorrido entre San Felipe y poco más abajo de la junta con el río Putaendo, existen importantes recuperaciones del río Aconcagua, que son aprovechadas en su Segunda Sección.

En su curso medio recibe aportes de varios esteros de marcado régimen pluvial, por el lado norte, los esteros Catemu y El Melón, mientras que por la ribera sur llegan los afluentes Lo Campo, Los Loros o Las Vegas.

En el curso inferior, luego de recibir los aportes del estero Rautén, su principal tributario corresponde al estero Limache, una cuenca regulada por el embalse Los Aromos [CNR, 2013].

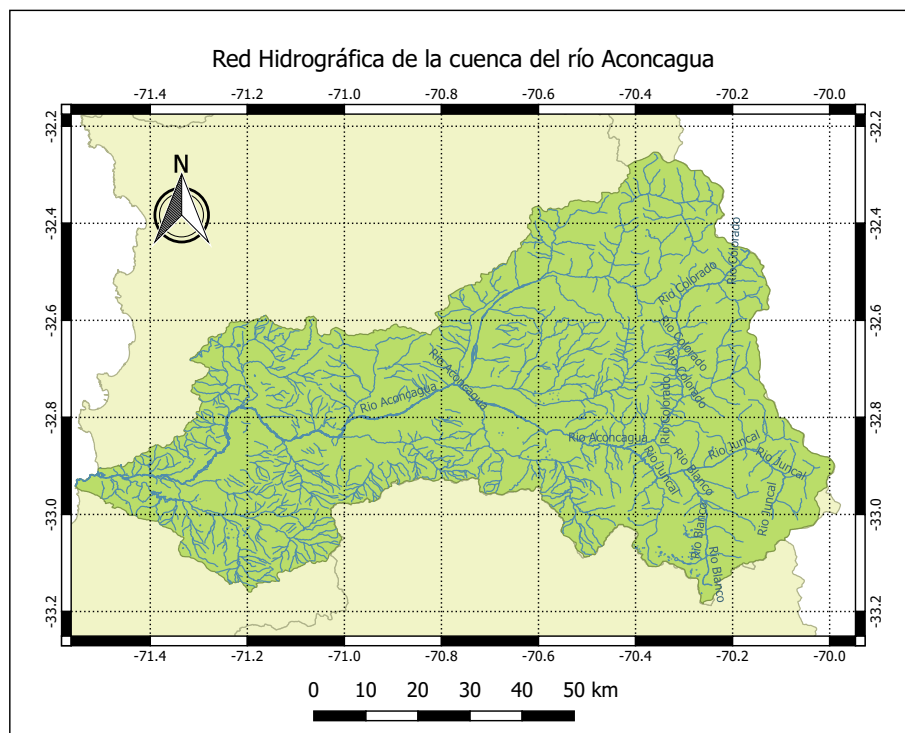


Figura 2.1: Red Hidrográfica de la cuenca del río Aconcagua.

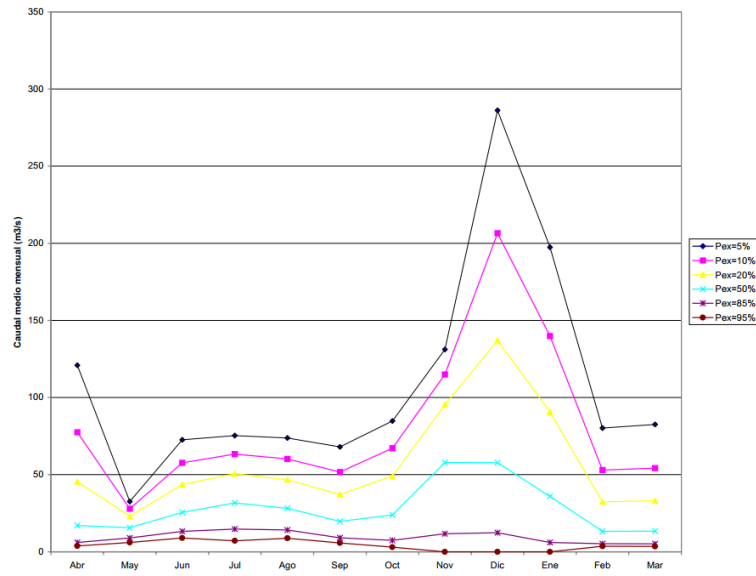


Figura 2.2: Curva de variación estacional Río Aconcagua en Romeral, periodo de análisis: 1961-1978. Fuente: Dirección General de Aguas.

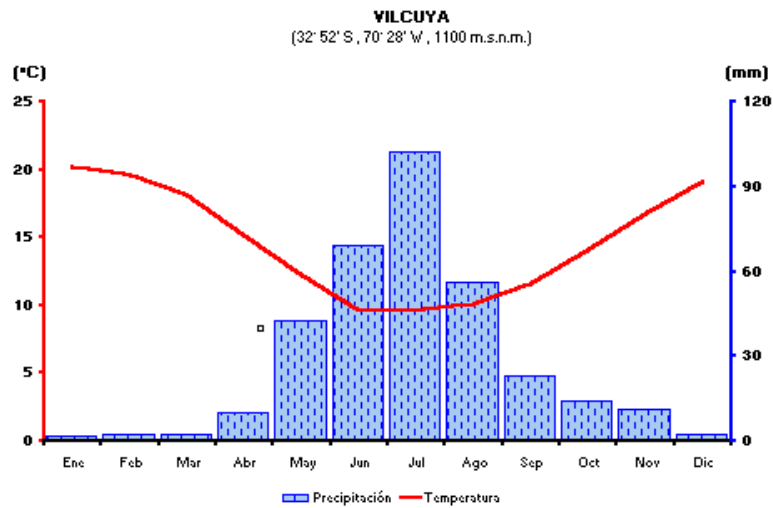


Figura 2.3: Diagrama climático de la estación Vilcuya. Fuente: Dirección Metereológica de Chile.

Se distinguen dos climas en la cuenca del río Aconcagua, un clima templado del tipo mediterráneo con estación seca prolongada y otro clima Frío de altura en la cordillera de los Andes.

Respecto del uso extractivo del agua del río Aconcagua, los que se extraen o consumen en su lugar de origen, se distinguen los siguientes [MOP-DGA, 2004a]:

- a) **Riego:** La cuenca del río presenta una amplia infraestructura de riego, 1.230 canales, con 470 *km* de longitud en total; 51 embalses menores y 3 embalses mayores. Además cuenta con 10.292 usuarios, que alcanzan a regar una superficie de 22.703 *há* (Incluyendo la subcuenca del Putaendo y sin considerar la 1ª y 3ª secciones del Aconcagua).
- b) **Captación para agua potable:** El uso para la captación de agua potable es aquel que contempla la utilización en plantas de tratamiento para el abastecimiento tanto residencial como industrial. Se distinguen captaciones para tres sistemas *Gran Valparaíso, La Calera y Limache; Los Andes, Calle Larga, Curimón y San Rafael* y *La Cruz y Quillota*.
- c) **Generación de energía hidroeléctrica:** En la cuenca existen cuatro centrales hidroeléctricas en operación, central *los Quilos, el Sauce, Aconcagua* y *Chacabuquito*.
- d) **Actividad industrial y minera:** De acuerdo al documento MOP-DGA (2004), las demandas brutas industriales al año 1997 correspondían a 80.476.200  $m^3/año$ . También existe una fuerte actividad minera con industrias importantes en el área, siendo entre ellas las plantas de Saladillo, el Cobre, la fundición Chagras, las mineras Rio Blanco, Sur-Sur de la División Andina de Codelco, Andacollo y El Soldado las mayores demandantes de agua. En total las industrias mineras presentes en la cuenca utilizan 39.248.280  $m^3/año$ .

## 2.2. Cuenca río Maipo

La cuenca hidrográfica del río Maipo abarca prácticamente la totalidad del territorio de la Región Metropolitana, parte de la V y VI regiones extendiéndose entre las latitudes 32°55' y 34°15' Sur y entre los meridianos 69°55' y 71°33' Oeste. Drena una superficie de 15.304  $km^2$ . La estación Santiago en Quinta Normal, en la parte media de la cuenca posee una temperatura media anual de 14.4 °C y una precipitación anual promedio de 312.5 mm [Rioseco and Tesser, 2018].

Su régimen hidrológico es de alimentación mixta, o nivo-pluvial. En sus zonas alta y media el río Maipo es de régimen marcadamente nival, como se aprecia en la Figura 2.5, presentando un gran aumento de caudal en los meses de primavera producto de los deshielos cordilleranos. En la zona baja, el río Maipo posee un régimen pluvial, por lo cual presenta crecidas asociadas directamente con las precipitaciones.

El río nace en las laderas de volcán Maipo a 5.623 *m.s.n.m.* con las características de una quebrada cordillerana. La altura considerable que presenta la cordillera de los Andes en esta zona permite una glaciación importante y una nivación estacional que contribuye a fijar las características hidrológicas

del río.

En las inmediaciones de San Gabriel (1.240 *m.s.n.m.*) ya tiene las características de un río importante luego de haber recibido los aportes de los ríos Volcán y Yeso. Luego aguas abajo recibe el aporte más importante en el sector cordillerano, el río Colorado, cuyo caudal en el sector de confluencia tiene un promedio anual de 26  $m^3/s$ .

Ya en el valle central, a la altura del sector La Obra, corre en dirección oeste por un cauce profundo, presentando un caudal promedio anual de 100  $m^3/s$ . Luego, y cerca de la cordillera de la costa recibe desde el sur los aportes provenientes del estero Angostura, los que a su vez provienen en parte importante de sus los ríos Peuco y San Francisco.

Al iniciar su recorrido a través de la cordillera de la costa, recibe por su rivera derecha, los aportes del río Mapocho. Este es su principal afluente tanto por la cuantía de sus aportes como por la superficie agrícola que beneficia, así como por ser el principal receptor de las descargas de aguas servidas de la ciudad de Santiago.

En el curso inferior, luego de recibir los aportes del Mapocho, su principal tributario corresponde al estero Puangue, recibiendo escasos aportes de los esteros Popeta, El Sauce y San Juan.

Finalmente, y luego de un recorrido de aproximadamente 250 *km* desde su nacimiento, desemboca al océano Pacífico en Lollole, inmediatamente al sur del puerto de San Antonio, Quinta Región [MOP-DGA, 2003].



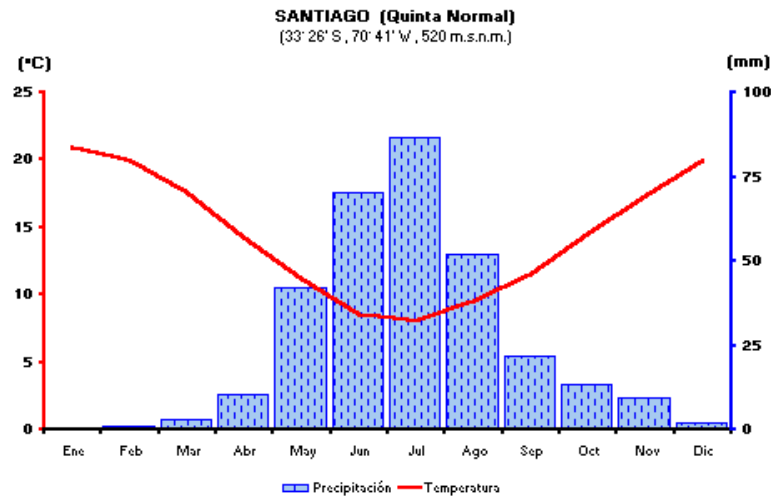


Figura 2.6: Diagrama climático de la estación Santiago en Quinta Normal.  
Fuente: Dirección Meteorológica de Chile.

Se distinguen dos climas en la cuenca del río Maipo, un clima templado del tipo mediterráneo con estación seca prolongada y otro clima Frío de altura en la cordillera de los Andes.

Respecto del uso extractivo del agua del río Maipo, los que se extraen o consumen en su lugar de origen, se distinguen los siguientes [MOP-DGA, 2004b]:

- a) **Riego:** La cuenca del río Maipo cuenta con 634 canales, la mayoría se ubican en los ríos Maipo y Mapocho, 447 embalses menores, 14 embalses mayores, para una superficie regable de 100.000 *ha* aproximadamente. Al año 1997 cuenta con 32.811 usuarios, de los cuales 3.187 están organizados en 37 Asociaciones de Canalistas y 37 Comunidades de Aguas.
- b) **Captación para agua potable:** El uso para la captación de agua potable es aquel que contempla la utilización en plantas de tratamiento para el abastecimiento tanto residencial como industrial. Se distinguen captaciones para su uso en las ciudades de Santiago, Peñaflo, Melipilla, Talagante y San Antonio.
- c) **Generación de energía hidroeléctrica:** Dada la proximidad de la ciudad de Santiago con el río Maipo, es que el sector alto de este cauce ha sido bastante aprovechado, contando esta cuenca con 10 centrales hidroeléctricas, las centrales *Queltehues, El Volcán, Alfalfal, Maitenes, Puntilla, La Florida, Los Bajos y Caemsa, Los Morros, Carena y Planchada y La Hermita*.
- d) **Actividad industrial y minera:** En la cuenca del río Maipo es donde se concentra el mayor número de industrias de nuestro país, concentrándose a su vez en la cuenca del río

Mapocho en torno a Santiago, entre el estero Las Rosas y el Zanjón de la Aguada, con una demanda neta industrial de agua de 2000  $l/s$  al año. Respecto de las demandas mineras de agua, la demanda más significativa de esta cuenca la constituye la planta San Francisco de la Cía. Minera Disputada de las Condes S.A. con 290  $l/s$  y la Sociedad Minera Pudahuel Ltda. Planta Lo Aguirre con 35  $l/s$ .

### 2.3. Cuenca río Rapel

La cuenca hidrográfica del río Rapel forma parte de la VI Región del General Libertador Bernardo O'Higgins, se sitúa entre los paralelos 33°53' y 35°01' de latitud sur, drenando una superficie total de 13.695  $km^2$ . La estación Parrón, en la parte media de la cuenca posee una temperatura media anual de 12.7 °C y una precipitación anual promedio de 674.6 mm [Rioseco and Tesser, 2018].

El río Rapel se forma de la unión de los ríos Cachapoal y Tinguiririca, en el lugar denominado La Junta, a unos 6  $km$  al oeste de la localidad de Las Cabras. La confluencia tiene lugar en el interior de la cordillera de la costa y se encuentra hoy inundada por las aguas del embalse Rapel, con una capacidad de 680 millones de  $m^3$ .

Desde La Junta, el río Rapel corre hacia el noreste, en medio de un lecho obstruido por depósitos fluviales. Desemboca en el mar, cerca del pueblo de Navidad, a través de un solo cauce de unos 60  $m$  de ancho. En su recorrido no recibe afluentes de importancia, siendo el de mayor significación el estero Alhué.

El río Cachapoal, cuya hoya compromete una superficie de 6.370  $km^2$ , tiene sus cabeceras a los pies de las cumbres englaciadas Pico del Barroco y Nevado de Los Piuquenes donde lo alimenta una larga lengua de ventisquero. En su zona alta y media el río Cachapoal es de régimen marcadamente nival, presentando un gran aumento de caudal en los meses de primavera producto de los deshielos cordilleranos, como se aprecia en la Figura 2.8. En el ámbito cordillerano se le unen varios tributarios de importancia, de los cuales los principales son los ríos Las Leñas, Cortadenal, Los Cipreses y, el más importante, el río Pangal. Cerca del pueblo minero de Coya recibe al río homónimo y más abajo, cerca del valle central, al Claro. En una pronunciada curva hacia el norte, en plena depresión intermedia, se encuentra la ciudad de Rancagua en su margen norte. Luego el Cachapoal vuelve al SW, siguiendo el pie oriental de la cordillera de la costa recibe el aporte del estero La Cadena y cerca de la localidad de Peumo se le une el río Claro, que se origina en la laguna de Los Cristales, la que ha sido peraltada para formar el pequeño embalse de ese nombre. De Peumo al embalse el río Cachapoal tiene un recorrido de 34  $km$ , en el cual recibe algunos esteros que drenan el valle



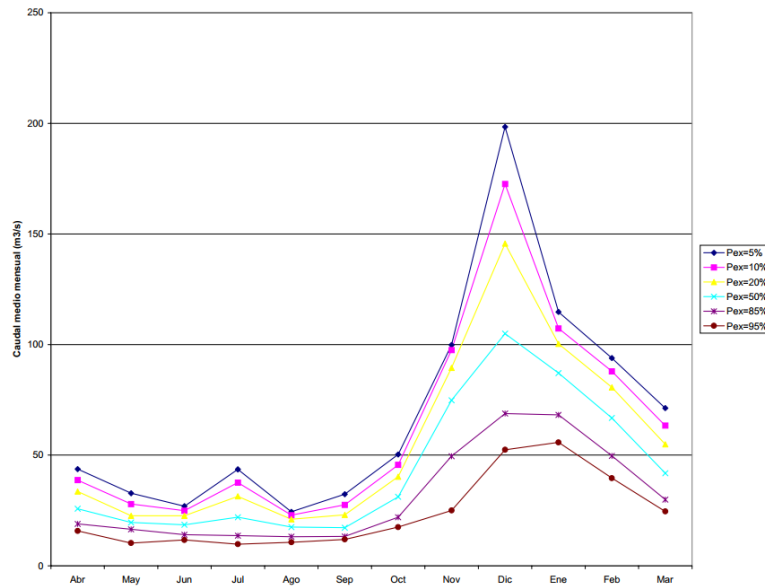


Figura 2.8: Curva de variación estacional Río Cachapoal 5km abajo junta Río Cortaderal, periodo de análisis: 1989-2001.

Fuente: Dirección General de Aguas.

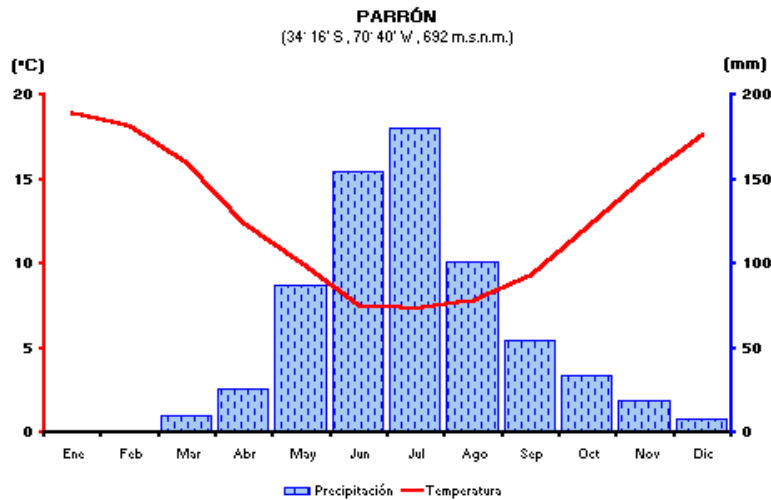


Figura 2.9: Diagrama climático de la estación Parrón.

Fuente: Dirección Meteorológica de Chile.

Se distinguen dos climas en la cuenca del río Rapel, un clima templado del tipo mediterráneo con estación seca prolongada y otro clima Frío de altura en la cordillera de los Andes.

Respecto del uso extractivo del agua del río Rapel, los que se extraen o consumen en su lugar de origen, se distinguen los siguientes [MOP-DGA, 2004c]:

- a) **Riego:** La cuenca del río Rapel contaba el año 1991 con 1270 canales de regadío, a través de 3.422,6 *km* canales, regulados a través de 334 embalses menores y 9 embalses mayores.
- b) **Captación para agua potable:** El uso para la captación de agua potable es aquel que contempla la utilización en plantas de tratamiento para el abastecimiento tanto residencial como industrial. Numerosas localidades ejercen demanda por este aspecto en los recursos hídricos de la cuenca, siendo la ciudad de Rancagua, con un 46 % del total de la demanda, la más importante, luego le siguen las ciudades de San Fernando, Rengo, Santa Cruz, Graneros, San Vicente y Machalí.
- c) **Generación de energía hidroeléctrica:** La cuenca del río Rapel es de gran importancia para el abastecimiento del Sistema Interconectado Central (SIC). En esta cuenca existen 5 centrales hidroeléctricas, la central Pangal, Coya, Sauzal, Sauzalito y la más importante Rapel.
- d) **Actividad industrial y minera:** La mayoría de las industrias existentes en la cuenca del río Rapel pertenecen al rubro agroindustria y alimenticio. Las empresas a las cuales se les ha otorgado derechos de agua con fines industriales se localizan principalmente en el río Cachapoal desde el río Claro hasta el embalse Rapel, el estero La Cadena, río Claro de Rengo y río Zamorano. La demanda total por agua al año 2000 era de 23.742.790  $m^3/año$ , de los cuales el rubro agroindustrial requiere más del 75 %. Existe una importante actividad minera, la cual ocupa recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos, de los superficiales se tienen distribuidos derechos por alrededor de 6.650 *l/s*.

## 2.4. Metodología de selección de cuencas

En este estudio se consideraron 63 posibles cuencas, de las cuales se cuenta con información de caudales observados, precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial.

Por conceptos de modelación fué necesario considerar cuencas hidrográficas que tengan poca intervención antrópica y que además sean cuencas de cabecera, para así obtener datos lo menos alterados posible. Para poder hacer esto se definieron los criterios de grado de intervención e índice de anidamiento.

### Grado de intervención

Corresponde al número de extracciones superficiales consuntivas presentes en la cuenca. Ob-

tenidas del Atlas del Agua [MOP-DGA, 2015], pudiendo existir otro tipo de derechos no catastrado.

### Índice de anidamiento

Corresponde al numero de subcuencas internas que presenta una cuenca mayor, siendo cero una cuenca de cabecera que no tiene subcuencas interiores.

Para la selección se tomaron en cuenta cuencas que presentaran un grado de intervención nulo, es decir, sin extracciones superficiales del tipo consuntivas y al mismo tiempo que sean cuencas de cabecera. De esta manera resultaron 17 cuencas para ser modeladas, las que se muestran en la Figura 2.10.

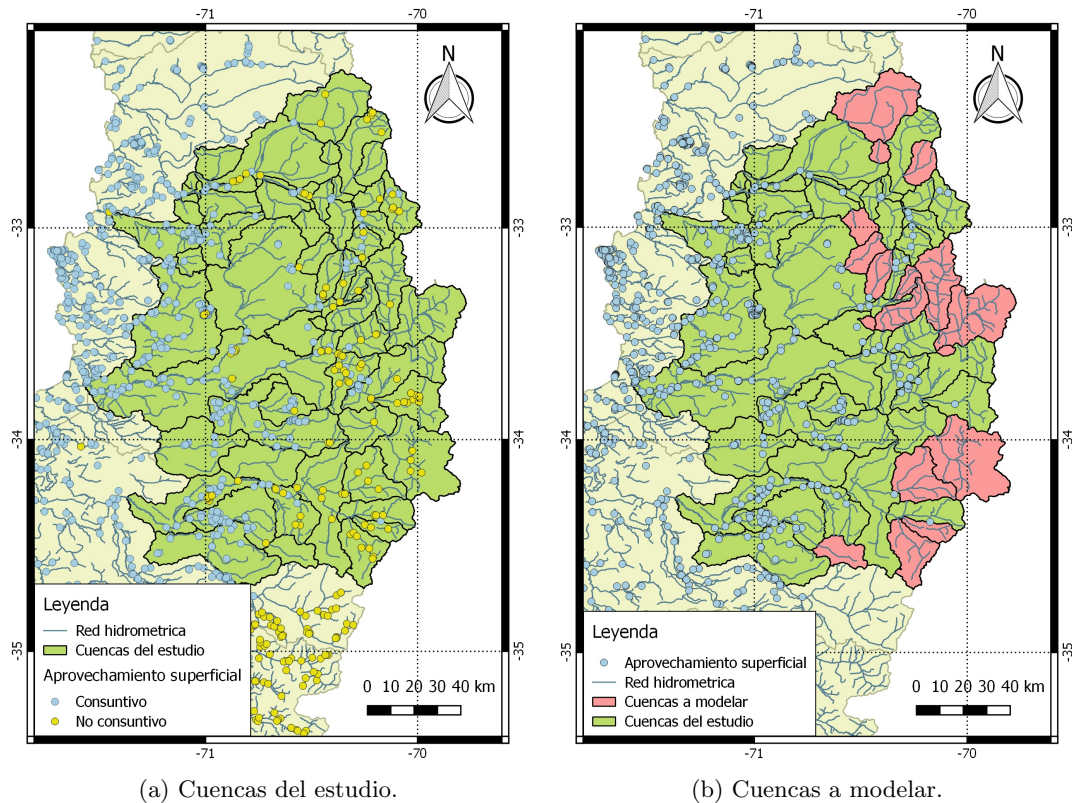


Figura 2.10: Cuencas a modelar. En (a) se aprecian las cuencas del estudio delimitadas en color verde, los puntos son las extracciones superficiales de agua, en color celeste las extracciones consuntivas y en amarillo las no consuntivas. En (b) se muestra en color rosa las 17 cuencas seleccionadas para modelar.

Tabla 2.1: Cuencas a modelar.

Código	Nombre estación	Abreviación	Latitud	Longitud
5405001	Río Los Riecillos Antes Junta Río Colorado	RAJC	-32.75	-70.3167
5411001	Estero Pocuro En El Sifón	PS	-32.9164	-70.5403
5414001	Río Putaendo En Resguardo Los Patos	PRP	-32.5017	-70.5811
5415002	Estero Hualtatas En Desembocadura	HD	-32.6942	-70.4089
5701001	Río Maipo En Las Hualtatas	MH	-33.9781	-70.1456
5703006	Estero Glaciar Echaurren	GE	-33.5847	-70.1161
5705001	Río Colorado Antes Junta Río Olivares	CAJO	-33.49	-70.1342
5706001	Río Olivares Antes Junta Río Colorado	OAJC	-33.4878	-70.1367
5720001	Río Molina Antes Junta San Francisco	MAJSF	-33.3733	-70.3961
5721001	Estero Yerba Loca Antes Junta Río San Francisco	YLAJSF	-33.3414	-70.3636
5722001	Estero Arrayan En La Montosa	AM	-33.3256	-70.4561
5730008	Quebrada Ramón En Recinto Emos	QRRE	-33.4331	-70.5142
5735001	Canal Colina en Peldehue	CP	-33.1967	-70.5808
6000003	Río Las Leñas Ante Junta Río Cachapoal	LAJC	-34.3628	-70.3056
6002001	Río Cortaderal Ante Junta Río Cachapoal	CAJC	-34.3669	-70.3258
6006001	Río Pangal En Pangal	PP	-34.2467	-70.3281
6013001	Río Claro En Hacienda Las Nieves	CHN	-34.4922	-70.7028

# METODOLOGÍA Y DATA

En el presente Capítulo se hace una descripción del modelo utilizado para simular los caudales, junto con los criterios de eficiencia, y una descripción de la obtención de los datos utilizados como input del modelo, tanto los necesarios para la calibración y validación del modelo, como los necesarios para las proyecciones futuras de cambio climático.

### 3.1. Observaciones y proyecciones climáticas

#### 3.1.1. Datos observados

El modelo hidrológico utiliza datos diarios de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial para simular la escorrentía; y los caudales observados para calibrar y validar. Estos datos fueron obtenidos desde la base de datos CAMELS-CL (Catchment Attributes and Meteorology for Large Sample Studies, Chile Dataset) del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, CR2 [Alvarez-Garreton et al., 2017]. La base de datos CAMELS-CL contiene datos de la hidrología, meteorología y una serie de atributos integrados a escala de cuenca, obtenidos de diversas fuentes de información, que se detallan a continuación.

#### **Caudales**

La escorrentía de los ríos se obtiene de la recopilación efectuada por el CR2, que contiene registros de la Dirección General de Aguas y la Dirección Meteorológica de Chile.

### Precipitación y temperatura

La precipitación y temperatura media diaria sobre la cuenca se obtiene de los datos grillados CR2MET, un producto desarrollado para el estudio de actualización del Balance Hídrico de Chile. El CR2MET contiene información meteorológica (precipitación, temperaturas medias y extremas) en un grilla rectangular de  $0.05^\circ$  latitud-longitud para el territorio de Chile continental, para el periodo 1979-2016. (Fuente <http://www.cr2.cl/recursos-y-publicaciones/bases-de-datos/datos-productos-grillados/>). Los datos grillados diarios son promediados dentro del polígono que delimita cada cuenca.

### Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial acumulada a 8 días se obtiene del producto MODIS [Mu et al., 2011]. MOD16 está disponible con una resolución temporal de 8 días, para el período 2000-2014 en una resolución de pixel de 1 km. Los datos grillados MOD16 corresponden a la acumulación de 8 días y son promediados espacialmente dentro del polígono que delimita cada cuenca para obtener un valor medio por cuenca. Para los días con ETp faltantes se extendió la data, es decir, se consideró que 8 días consecutivos tienen la misma ETp, y para los años anteriores al 2000 y posteriores al 2014 se realizó una regresión polinomial con respecto a la temperatura. En la Figura 3.1 se muestra un ejemplo de regresión de la estación Pocuro en el Sifón. El Anexo A muestra las regresiones de las otras estaciones del estudio.

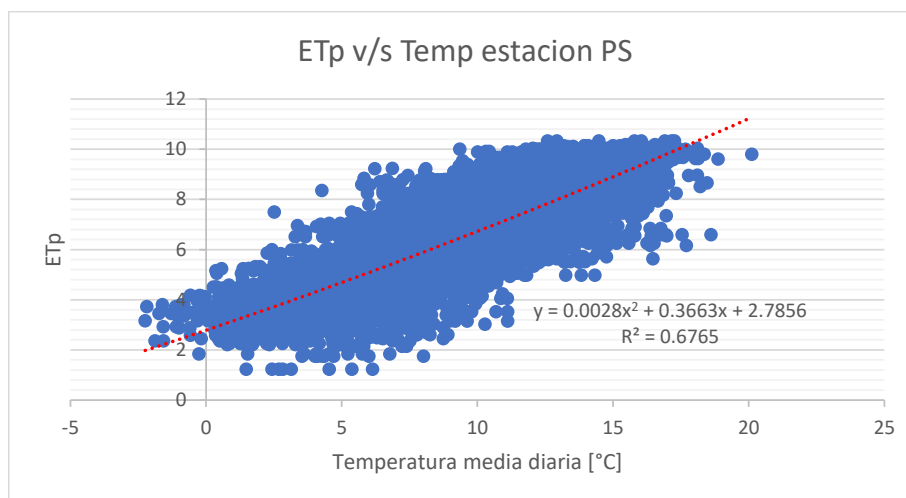


Figura 3.1: Regresión ETp vs temperatura estación Pocuro en el Sifón.

### 3.1.2. Proyecciones climáticas

La actividad humana ha cambiado y continúa cambiando la composición de la superficie y atmósfera terrestre. Algunos de estos cambios tienen un impacto directo o indirecto en el balance energético de la Tierra y, por lo tanto, son los motores del cambio climático. Los cambios en el sistema climático mundial son simulados a través de modelos en base a forzantes antropogénicas, como las emisiones de gases de efecto invernadero (*Greenhouse gases*, GHG), crecimiento poblacional, actividad económica, patrones de uso de suelos, entre otros.

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) define las Vías Representativas de Concentración (*Representative Concentration Pathways*, RCP), un set de escenarios que describen cuatro diferentes balances radiativos entre finales del siglo XXI y fin de la era pre-industrial. Ellos son un escenario de mitigación estricto de emisiones GHG (RCP2.6), dos escenarios intermedios (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con emisiones GHG muy altas (RCP8.5), según el cual no se adopta ninguna política de mitigación de emisiones de GHG [Stocker, 2014]. Las series de emisiones de los RCPs son usadas directamente en modelos climáticos, modelos de circulación general (*General Circulation Model*, GCM) o en modelos de sistema terrestre (*Earth System Models*, EMS) donde se simula el comportamiento de la atmósfera, océanos, criósfera, biósfera, etc; dependiendo de la complejidad del modelo.

Para este estudio se consideran 5 GCMs que provienen del *fifth Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5) [Taylor et al., 2012], bajo el escenario RCP8.5. El nombre del escenario “RCP8.5” quiere decir que para fines de este siglo se espera un incremento en la radiación de  $8,5 \text{ W/m}^2$  comparado con los valores de la era preindustrial [Moss et al., 2010]. Se elige el escenario RCP8.5 para este trabajo, debido a que tiene las proyecciones más extremas de cambio climático y por ende las señales del cambio climático serán más claras, pudiendo así evaluar el peor escenario de sequía esperado dentro de los GCM del CMIP5. Los otros RCP (2.6, 4.5 y 6.0) no son considerados en este trabajo, para no extenderse innecesariamente.

Existen muchas instituciones de investigación en el mundo que se dieron la tarea de obtener modelos de los distintos RCP, cada una tomando diferentes inputs, lo que tiene como resultado diferentes respuestas y con ello dispersión. Tomando esto en cuenta es que para este estudio se consideran 5 GCMs que representan todo el espectro del escenario RCP8.5. La Tabla 3.1 describe los nombres de los modelos utilizados en este estudio y las instituciones que los elaboraron. La Tabla 3.2 resume la resolución espacial de cada modelo en la latitud y longitud. Los modelos seleccionados van desde un modelo menos agresivo que afecta de menor manera la temperatura y la precipitación, el IPSL-CM5B-LR, al modelo más agresivo que afecta de mayor manera la temperatura y precipitación, el MIROC-ESM. También se escogieron 3 modelos intermedios, el CNRM-CM5, el

IPSL-CM5A-LR y el CCSM4. La Figura 3.2 muestra el cambio promedio de temperatura versus la relación promedio de precipitación futura (2071-2100) con respecto a la histórica (1979-2005) de los 5 GCMs seleccionados. El dominio espacial de los promedios son los nodos de la zona de estudio, que van desde la región de Valparaíso a la región de O’Higgins.

Tabla 3.1: Nombres de modelos y sus instituciones usados en este estudio.

ID	Nombre modelo	Grupo modelador
1	CCSM4	NCAR (National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA)
2	CNRM-CM5	CNRM (Centre National de Recherches Meteorologiques, Meteo-France, Toulouse, France) and CERFACS (Centre Europeen de Recherches et de Formation Avancee en Calcul Scientifique, Toulouse, France)
3	IPSL-CM5A-LR	IPSL (Institut Pierre Simon Laplace, Paris, France)
4	IPSL-CM5B-LR	IPSL (Institut Pierre Simon Laplace, Paris, France)
5	MIROC-ESM	JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Kanagawa, Japan), AORI (Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Chiba, Japan), and NIES (National Institute for Environmental Studies, Ibaraki, Japan)

Tabla 3.2: Resolución espacial de los modelos en grados.

Modelo	Resolución Latitud	Resolución Longitud
CCSM4	0.942	1.250
CNRM-CM5	1.400	1.406
IPSL-CM5A-LR	1.895	3.750
IPSL-CM5B-LR	1.895	3.750
MIROC-ESM	2.791	2.813

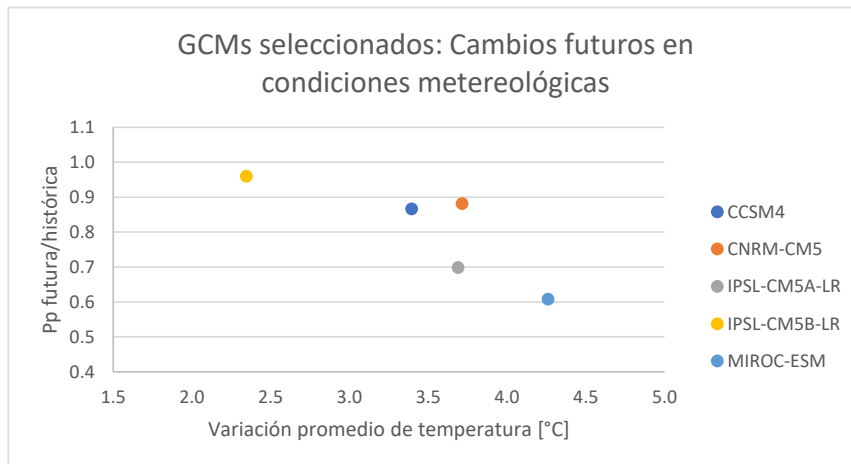


Figura 3.2: Cambios en la precipitación y temperaturas de los GCMs seleccionados.

### 3.1.2.1. Coeficiente de variación de precipitación y delta de temperatura

Los GCM poseen información de precipitación y temperatura en una grilla mundial, para una serie de tiempo que va desde el año 1850 al 2100. Para fines de este estudio se considera como periodo “histórico” desde el año 1979 al 2005 y como periodo “futuro” desde el año 2071 al 2100, de tal manera de crear deltas y coeficientes de variación para perturbar las forzantes climáticas.

Para obtener las serie de tiempo de precipitación y temperatura futuras se hace un análisis de deltas y coeficiente de variación (CV) respectivamente. Se calcula la diferencia entre los promedios de la situación futura e histórica de temperatura, a escala diaria. Y la relación entre los promedios de precipitación acumulada mensual de la situación futura e histórica. Luego estos deltas y CVs son aplicados a la estadística observada. En la Figura 3.3 se muestra los deltas de precipitaciones acumuladas mensuales del modelo CNRM-CM5 y la Figura 3.4 muestra los deltas de temperatura media diaria del modelo MIROC-ESM. El Anexo B muestra los deltas de precipitación y temperatura de las demás estaciones del estudio.

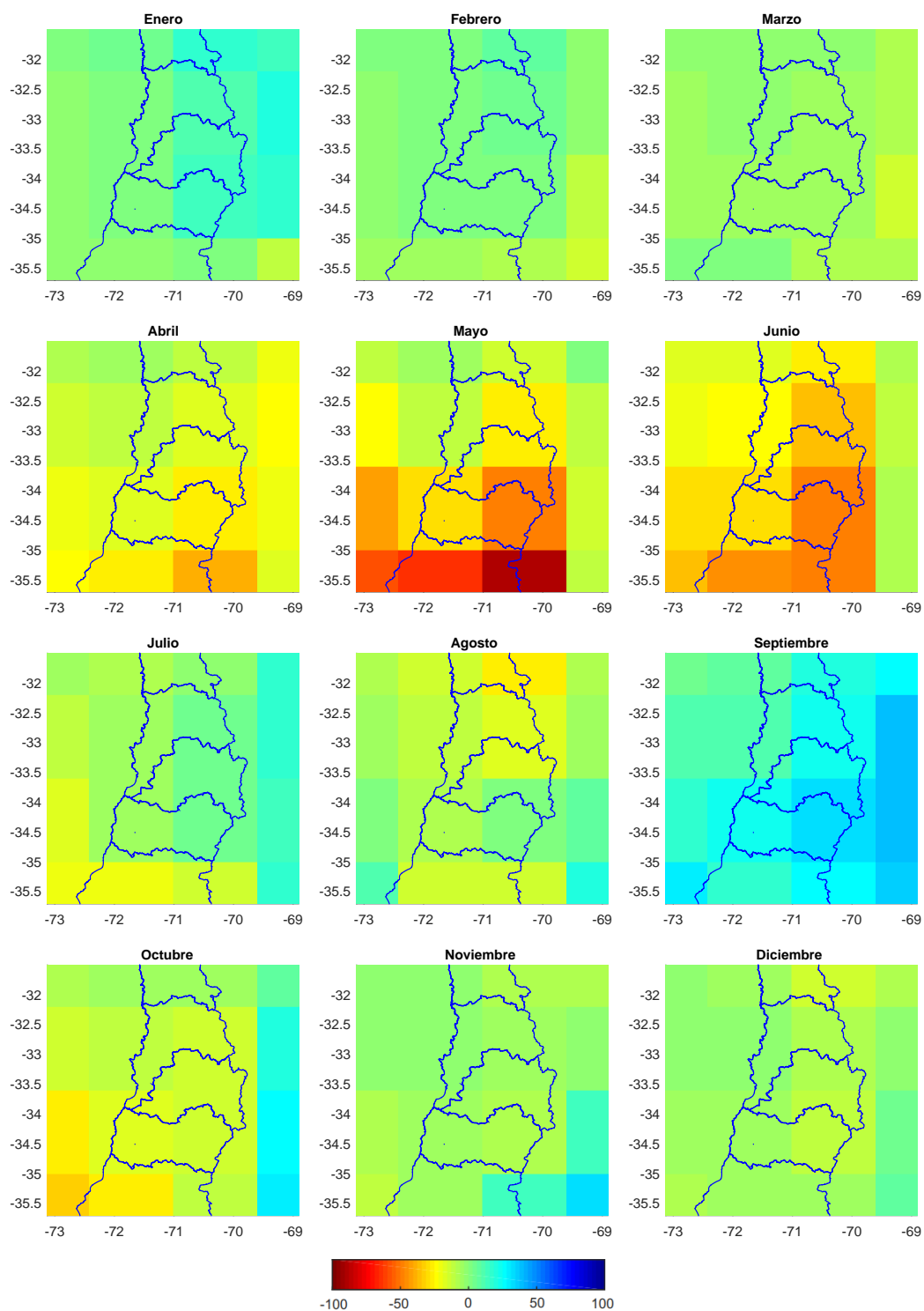


Figura 3.3: Deltas de precipitaciones acumuladas mensuales en mm del modelo CNRM-CM5.

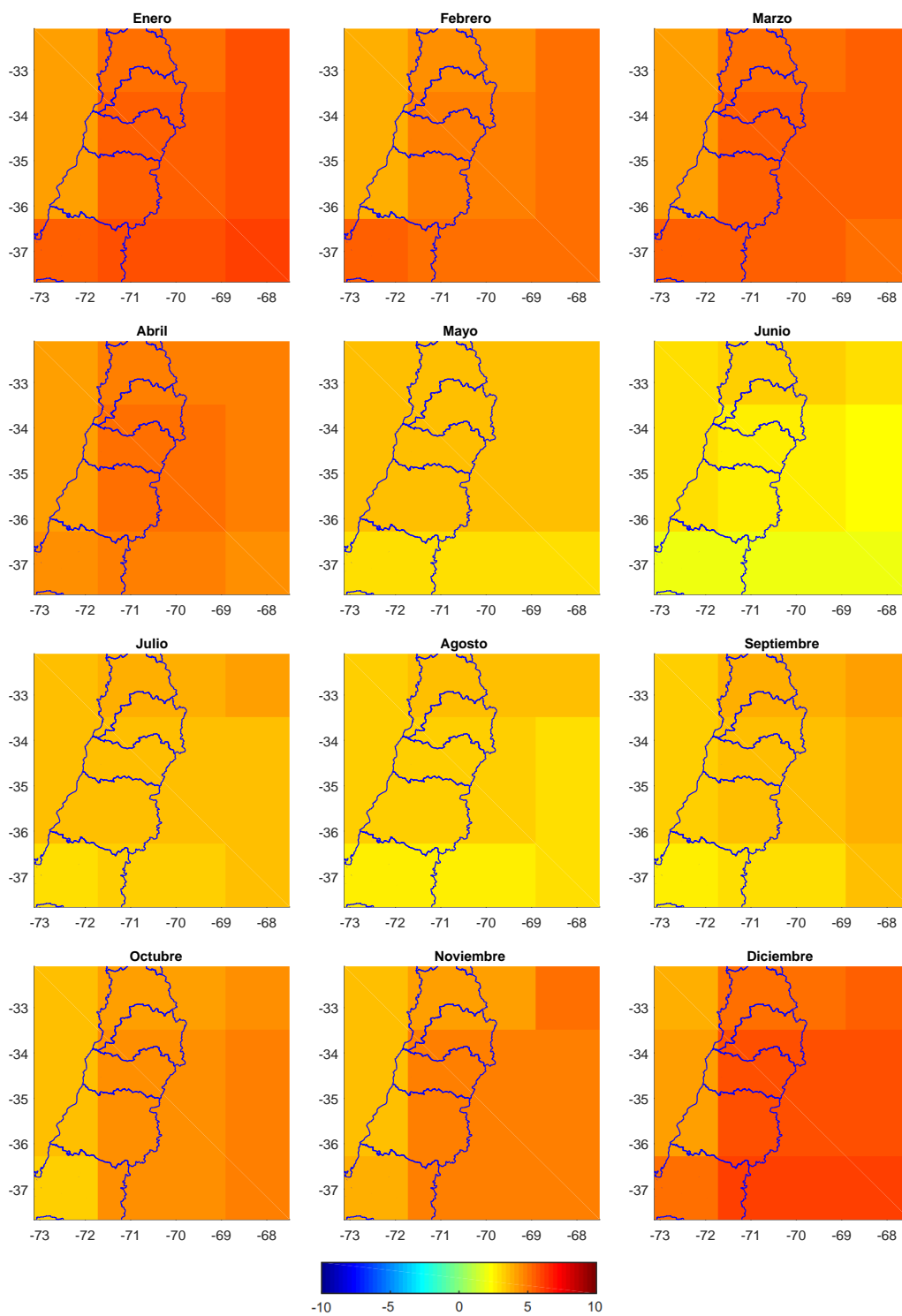


Figura 3.4: Deltas de temperatura media diaria en °C del modelo MIROC-ESM.

### 3.1.2.2. Escalamiento de GCM

Como se observa en las Figuras 3.3 y 3.4, la resolución espacial de los GCM es muy gruesa para tener la información de interés en los centroides de las cuencas. La tabla 3.2 muestra la resolución espacial en coordenadas geodésicas WGS 84. Dada la resolución de los modelos, es necesario realizar un proceso de escalamiento de los datos, proceso llamado en la literatura *downscaling*. Existen varios métodos de downscaling pero en este estudio se usa el Downscaling Espacial (DE). Este consiste en ponderar por el inverso de la distancia la información de cada uno de los cuatro nodos más cercanos a la estación de objetivo, generando una serie representativa para cada GCM [Lagos and Vargas, 2011], a diferencia de el trabajo citado, en éste sólo se realizará un escalamiento espacial y no uno temporal, debido al enfoque del estudio, el cual es más bien sobre sensibilidad climática (método delta) y no un análisis de proyecciones de las series que puedan variar sus estadísticos. La expresión del downscaling espacial es la siguiente:

$$z_j = \frac{\sum z_i / d_{ij}^\beta}{\sum 1 / d_{ij}^\beta} \quad (3.1)$$

donde  $z_j$  es el punto de interés,  $z_i$  es un punto del entorno,  $\beta$  es el exponente de ponderación (1 para este caso) y  $d_{ij}$  es la distancia entre los puntos.

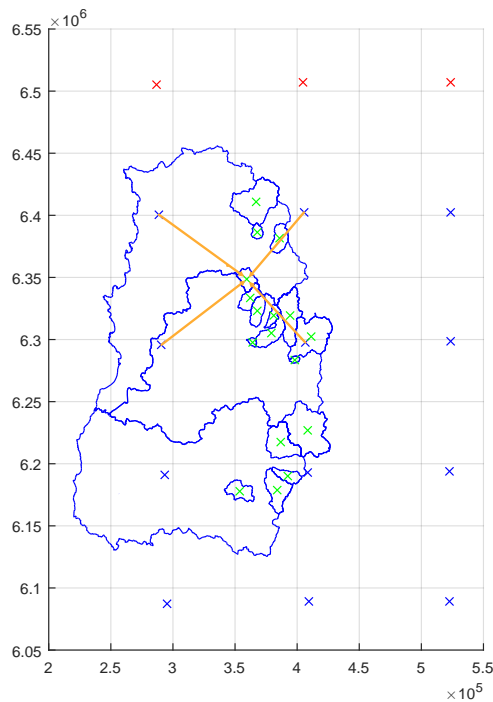


Figura 3.5: Grilla modelo CCSM4 y centroides de las cuencas de este estudio.

Para evitar mayores distorsiones y calcular distancias, se hace un cambio de sistema de coordenadas, del WGS 84 al UTM. Esto se hace mediante la rutina de Matlab `deg2utm.m` [Palacios, 2006].

La Figura 3.5 muestra la grilla espacial del modelo CCSM4 (cruces azules, del huso 19H, y cruces rojas, del huso 19J) y los centroides de las cuencas del estudio (cruces verdes) en coordenadas UTM. Las flechas naranjas representan lo que sería el escalamiento espacial, aplicado a una cuenca particular, en donde se interpola el delta de precipitación o temperatura desde los 4 puntos más cercanos de la grilla.

## 3.2. Modelo hidrológico TUW

El modelo utilizado en este trabajo es uno del tipo conceptual precipitación-escorrentía, semi-distribuido, que sigue la estructura del modelo HBV [Bergstrom, 1976], un modelo que presenta varias versiones, pero con el mismo esquema general, de ser un modelo conceptual, semi-distribuido, cuyo concepto básico es que la descarga está relacionada al almacenamiento a través de la conservación de masa y una rutina de transformación. Existen versiones de este modelo de paso diario y otras de paso horario.

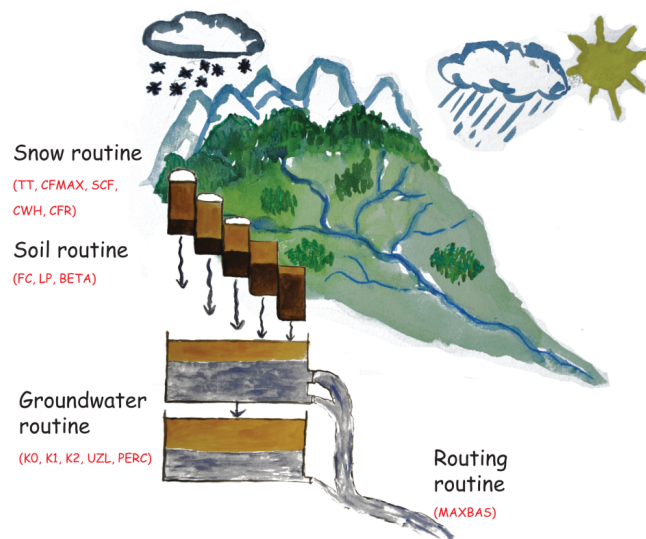


Figura 3.6: Estructura esquemática de un modelo HBV similar [Seibert and Vis, 2012].

El modelo TUW (Technische Universität Wien) [Viglione and Parajka, 2016] ejecuta un paso diario y consiste en una rutina de nieve, una rutina de humedad de suelo y una rutina de flujo de agua. La diferencia con el modelo HBV es la cantidad de parámetros que este utiliza. El modelo TUW es semi-distribuido, lo que significa que una cuenca puede subdividirse en diferentes elevaciones o en subcuencas. Para el efecto de este trabajo se modela con una sola gran cuenca, es decir, como un modelo concentrado.

### 3.2.1. Método de simulación

#### Modelo de nieve

La rutina de nieve representa la acumulación y derretimiento de nieve por un concepto simple de grado-día. La precipitación media diaria  $P$  en una zona es dividida en lluvia  $P_R$  y nieve  $P_S$

basada en la temperatura media diaria  $T_A$ . El set de Ecuaciones 3.1 muestra las expresiones para obtener la precipitación pluvial y nival.

$$\begin{aligned}
 P_R &= P && \text{si } T_A = T_R \\
 P_R &= P \frac{T_A - T_S}{T_R - T_S} && \text{si } T_S < T_A < T_R \\
 P_R &= 0 && \text{si } T_A < T_S \\
 P_S &= P - P_R
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

donde  $T_S$  y  $T_R$  corresponden al umbral de temperatura mínimo y máximo respectivamente.

El derretimiento comienza a temperaturas del aire por encima del umbral  $T_M$ . La Ecuación 3.2 muestra la expresión para obtener el monto de agua derretida.

$$M = (T_A - T_M)DDF \quad \text{si } T_A > T_M \text{ y } SWE > 0 \tag{3.2}$$

donde  $M$  es el monto de agua derretida por paso temporal,  $DDF$  es el factor grado-día y  $SWE$  es el agua nieve equivalente (snow water equivalent).

El déficit de captura de los pluviómetros durante las nevadas se corrige con un factor de corrección de nieve  $SCF$ . Cambios en el snow water equivalent desde los días  $i - 1$  a  $i$  son obtenidos mediante la Ecuación 3.3.

$$SWE_i = SWE_{i-1} + (SCF \cdot P_S - M)\Delta t \tag{3.3}$$

donde  $\Delta t$  es el paso temporal de 1 día.

### Balance de humedad del suelo

La rutina de humedad del suelo representa la generación de escorrentía y los cambios en el estado de humedad del suelo de la cuenca y es obtenida mediante la Ecuación 3.4.

$$S_{SM,i} = S_{SM,i-1} + P_R + M - E_A - \Delta S_{UZ} \tag{3.4}$$

donde  $S_{SM}$  es la humedad del suelo de una capa superior, que controla la generación de esco-

rentía y la evaporación actual  $E_A$ .

La contribución  $\Delta S_{UZ}$  de la lluvia y el derretimiento de nieve a la escorrentía es calculada por un esquema explícito como una función de la humedad de suelo de la capa superior  $S_{SM}$  usando una relación no lineal de dos parámetros libres,  $FC$  y  $\beta$ , como se muestra en la Ecuación 3.5.

$$\Delta S_{UZ} = \left( \frac{S_{SM}}{FC} \right)^\beta (P_R + M) \quad (3.5)$$

$FC$  es la cantidad máxima de almacenamiento de humedad del suelo. El parámetro  $\beta$  controla las características de la generación de escorrentía y es un parámetro de la no linealidad. Si la capa superior está saturada, *i.e.*  $S_{SM} = FC$ , entonces toda la lluvia y derretimiento de nieve contribuye a la escorrentía.

La evaporación actual  $E_A$ , es obtenida mediante el set de Ecuaciones 3.6, y es calculada de la evaporación potencial  $E_P$  por una función lineal por partes de la humedad del suelo de la capa superior:

$$\begin{aligned} E_A &= E_P \frac{S_{SM}}{LP} && \text{si } S_{SM} < LP \\ E_A &= E_P && \text{si } S_{SM} \geq LP \end{aligned} \quad (3.6)$$

donde  $LP$  es un parámetro denominado el límite para la evaporación potencial  $E_P$ .

### Respuesta y funciones de transferencia

La función de respuesta representa la escorrentía en laderas de cerros y consiste en dos depósitos, representando dos zonas de suelos. Los estados de almacenamiento de la zona superior e inferior son  $S_{UZ}$  y  $S_{LZ}$  respectivamente.  $\Delta S_{UZ}$  entra en la zona de almacenamiento superior y abandona este depósito a través de tres caminos: flujo de salida desde el depósito con un coeficiente de almacenamiento rápido de  $K_1$ , percolación a la zona inferior con una tasa de percolación constante  $C_P$ , y, si el umbral  $LS_{UZ}$  de estado de almacenamiento es excedido, a través de un flujo de salida adicional con un coeficiente de almacenamiento  $K_0$ . El agua deja la zona inferior con un coeficiente de almacenamiento lento de  $K_2$ . El flujo de salida de ambos depósitos  $Q_G$  es entonces fijado por una función triangular de transferencia, que representa la escorrentía de los cauces. El set de Ecuaciones 3.7 muestra las expresiones para obtener la respuesta de la función de transferencia.

$$\begin{aligned}
B_Q &= B_{MAX} - C_R Q_G && \text{si } B_{MAX} - C_R Q_G \geq 1 \\
B_Q &= 1 && \text{de lo contrario}
\end{aligned} \tag{3.7}$$

donde  $B_Q$  es la base de la función triangular de transferencia,  $B_{MAX}$  es la base máxima en flujos bajos y  $C_R$  es un parámetro libre de escalamiento.

La Tabla 3.3 resume los parámetros usados por el modelo. En ella se presentan los valores máximos y mínimos que puede adoptar cada variable. Estos valores máximos y mínimos fueron obtenidos desde el ejemplo en el que se trabaja con 320 cuencas austriacas del “*Lumped hydrological model developed at the Vienna University of Technology for education purposes*” [Viglione and Parajka, 2016].

Tabla 3.3: Resumen de parámetros usados por el modelo.

Parámetro	Descripción	Valor Max	Valor Min
$SCF$	Factor de corrección de nieve	0.9	1.5
$DDF$	Factor grado-día	0	5
$T_R$	Temperatura umbral por encima de la cual la precipitación es líquida	1	3
$T_S$	Temperatura umbral por debajo de la cual la precipitación es sólida	-3	1
$T_M$	Temperatura umbral por encima de la cual el derretimiento comienza	-2	2
$LP$	Parámetro relacionado con el límite de la evaporación potencial	0	1
$FC$	Capacidad de campo, <i>i.e.</i> , almacenamiento máximo de humedad del suelo	0	600
$\beta$	Parámetro no lineal de producción de escorrentía	0	20
$K_0$	Coficiente de almacenamiento de respuesta muy rápida	0	2
$K_1$	Coficiente de almacenamiento de respuesta rápida	2	30
$K_2$	Coficiente de almacenamiento de respuesta lenta	30	250
$LS_{UZ}$	Umbral del estado de almacenamiento, <i>i.e.</i> , al ser excedido comienza la respuesta muy rápida	1	100
$C_P$	Tasa constante de percolación	0	8
$B_{MAX}$	Base máxima para caudales bajos	0	30
$C_R$	Parámetro de escalamiento libre	0	50

### 3.2.2. Criterios de eficiencia

Para evaluar la eficiencia de los modelos que simulan fenómenos naturales, existe una amplia gama de indicadores y criterios que dan cuenta de la similitud de las modelaciones con las observaciones. En particular en los modelos hidrológicos, los criterios se aplican a las series de caudales observados y modelados, con lo cual se obtienen factores que cuantifican la eficiencia del modelo [Krause et al., 2005].

#### Error cuadrático medio (MSE):

El MSE de un estimador mide el promedio de los errores al cuadrado, es decir, la diferencia entre el estimador y lo que se estima.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{mod_i})^2 \quad (3.8)$$

#### Raíz del error cuadrático medio (RMSE):

El RMSE de un estimador mide la raíz cuadrada del promedio de los errores al cuadrado.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{mod_i})^2} \quad (3.9)$$

#### Índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE):

Este índice corresponde a una descomposición del índice de Nash-Sutcliffe, en donde se tiene de forma explícita el coeficiente de correlación ( $r$ ), bias ( $\beta$ ) y la variabilidad ( $\gamma$ ). El parámetro de la variabilidad corresponde a la última versión del índice [Kling et al., 2012].

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

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o} \quad (3.10)$$

$$\gamma = \frac{CV_s}{CV_o} = \frac{\sigma_s/\mu_s}{\sigma_o/\mu_o}$$

#### Índice de Nash-Sutcliffe:

Corresponde a uno menos la suma de la diferencia al cuadrado del caudal observado y el modelado, dividido por la suma de la diferencia al cuadrado del caudal observado y el caudal observado medio.

La normalización de la varianza de la serie observada se traduce en valores relativamente altos de NS, sin embargo, para cuencas con altas dinámica de caudales, se obtienen bajos valores

de NS. El rango de valores para el índice NS se encuentra entre 1 (ajuste perfecto) y  $-\infty$ .

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - Qmod_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - \overline{Qobs})^2} \quad (3.11)$$

**Índice de Nash-Sutcliffe con valores logarítmicos (log NS):**

Para calcular este criterio, se utiliza la ecuación 3.11 pero usando los logaritmos de los caudales. Con este criterio, se consigue disminuir el problema de las cuencas con alto dinamismo de caudales, lo que se traduce en dejar los caudales altos a un nivel comparable con los caudales bajos y así mejorar el valor del indicador de eficiencia.

**Bias:**

Se define como la diferencia entre el valor esperado y el valor real.

**Error absoluto medio (MAE):**

Corresponde al promedio de los errores absolutos.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Qobs_i - Qmod_i| \quad (3.12)$$

**Error absoluto medio con valores logarítmicos (log MAE):**

Para calcular este criterio, se utiliza la ecuación 3.12 pero usando los logaritmos de los caudales.

**Error volumétrico (VE):**

Corresponde a la diferencia de la suma de los caudales observados y los modelados, entre la suma de los caudales observados.

$$VE = \frac{\sum_{i=1}^n Qobs_i - \sum_{i=1}^n Qmod_i}{\sum_{i=1}^n Qobs_i} \quad (3.13)$$

Cabe decir que dado el funcionamiento del modelo, es necesario un periodo de calentamiento, en el cual el suelo acumula humedad, entre otros procesos. Es por esto que para el cálculo de los criterios de eficiencia, tanto como en la etapa de calibración y validación del modelo, como para calcular índices de error de referencia se deja un periodo de calentamiento de 10 meses (enero-octubre) equivalente a 304 días de un año no bisiesto. Este periodo de calentamiento no se toma en cuenta para el cálculo de los criterios de eficiencia, para un correcto análisis de la física del problema.

# MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON EL MODELO TUW

En el presente Capítulo se hace una descripción de los datos de entrada utilizados en la calibración y validación del modelo hidrológico TUW. Luego se explica el proceso de calibración y validación, y una presentación de los resultados de las estaciones en estudio.

### 4.1. Datos de entrada

Para cada cuenca es necesario contar con las variables forzantes que definen la modelación hidrológica. Las variables forzantes que se utilizan son la precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial. Y también es necesario tener la información de caudales de descarga para poder realizar la calibración y validación del modelo.

Todos estos datos necesarios como input del modelo son extraídos desde la base de datos CAMELS-CL del CR2 (sección 3.1.1). Los datos son considerados como un periodo “histórico” periodo de tiempo transcurrido entre los años 1979-2016 (38 años). Del periodo total de tiempo de cada estación, se considera los últimos dos tercios como periodo de calibración y el primer tercio como periodo de validación. La decisión de realizar la calibración con los últimos dos tercios es para disminuir el error producto de la extrapolación de la serie de evapotranspiración potencial. En el

periodo 2000-2014 se dispone de estimaciones la ETp del producto MOD16, por lo que los errores son menores que usar la relación ETp vs Temperatura extrapolada a los años faltantes.

La data disponible en cada estación fluviométrica es variable, pues existen periodos en los que no se disponen de datos, ya sea por eventos de crecida que dejaron la estación fuera de servicio, falta de mantención, etc. Por esta situación es que se usa un periodo de calibración y validación específico para cada estación. En la tabla 4.1 se muestra el detalle de los periodos de calibración y validación de cada estación. Las estaciones RAJC y HD no disponen información de caudales, por lo que no se puede hacer el proceso de calibración y validación. La estación CP no posee información alguna de caudales ni evapotranspiración, por lo que no se puede hacer el proceso de calibración y validación.

Tabla 4.1: Periodos de calibración y validación.

ID	Calibracion		Validacion		Años de estadística
	Inicio	Término	Inicio	Término	
PS	01-01-1992	31-12-2016	01-01-1979	31-12-1991	38
PRP	01-01-1992	31-12-2016	01-01-1979	31-12-1991	38
MH	01-01-1990	31-12-2012	01-01-1979	31-12-1989	34
GE	01-01-1987	31-12-2003	01-01-1979	31-12-1986	25
CAJO	01-01-1992	31-12-2016	01-01-1979	31-12-1991	38
OAJC	01-01-1992	31-12-2016	01-01-1979	31-12-1991	38
MAJSF	01-01-2012	31-12-2016	01-01-2010	31-21-2011	7
YLAJSF	01-01-1997	31-12-2016	01-01-1987	31-12-1996	30
AM	01-01-1994	31-12-2016	01-01-1982	31-12-1993	35
QRRE	01-01-2000	31-12-2016	01-01-1991	31-12-1999	26
LAJC	01-01-2010	31-12-2016	01-01-2007	31-12-2009	10
CAJC	01-01-2007	31-12-2016	01-01-1986	31-12-1990	12
PP	01-01-1997	31-12-2016	01-01-1987	31-12-1996	30
CHN	01-01-1992	31-12-2016	01-01-1979	31-12-1991	38

La obtención de los datos de precipitación, temperatura y evapotranspiración está explicada en la sección 3.1.1. Desde el CR2 se dispone de la serie de datos de precipitación y temperatura a escala diaria, por lo que no es necesario realizar ninguna modificación del proceso de enmascaramiento de forzantes. En cambio la serie de datos de la evapotranspiración está de forma acumulada cada 8 días, para el periodo 2000-2014. Por este motivo se debe hacer una extensión de la data dentro del periodo, y luego una extrapolación de los datos, mediante una regresión con respecto a la temperatura.

## 4.2. Calibración y validación

Luego de distribuir los datos de caudales para calibración y validación, viene la etapa de calibrar los 15 parámetros del modelo, Tabla 3.3, mediante una función objetivo, el error cuadrático medio (MSE). Finalmente se calcula el ajuste de la modelación a los datos reales en el periodo de validación del modelo, mediante los criterios de eficiencia descritos en la Sección 3.2.2, determinando de este modo si el modelo hidrológico simula adecuadamente los caudales históricos. La Figura 4.1 muestra un diagrama que resume el proceso de calibración y validación.

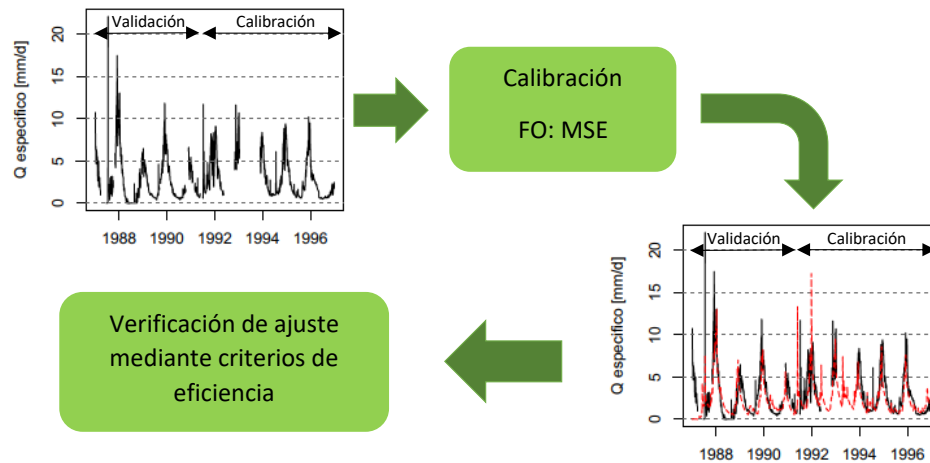


Figura 4.1: Diagrama del proceso de calibración y validación.

El algoritmo está hecho en lenguaje R, donde se utiliza el paquete correspondiente al modelo hidrológico TUW [Viglione and Parajka, 2016].

### 4.2.1. Calibración

El proceso de calibración se realiza para cada cuenca que disponga información suficiente de precipitación, temperatura,  $ET_p$  y caudales. Este proceso se hace a través de la minimización de la función objetivo (MSE). Para intentar mejorar las estaciones donde el modelo tuvo un mal ajuste, se realizó una calibración usando una función objetivo diferente, el KGE, cosa que se verá en mayor profundidad en la sección de Discusiones.

Para minimizar la función objetivo se utiliza el paquete DEoptim de R [Ardia et al., 2016], un algoritmo que ejecuta una optimización global evolutiva. Este funciona primero adivinando un vector parámetro dentro del rango especificado (los parámetros usados y sus rangos se encuentran en la Tabla 3.3). Cada generación crea una nueva población a partir de poblaciones previas

$\{x_i | i = 1, \dots, NP\}$ , donde  $i$  indexa los vectores que crean la población y  $NP$  denota la cantidad de vectores parámetro. Esto se logra usando la *differential mutation* de los miembros de la población. Un vector parámetro mutante inicial  $v_i$  es creado escogiendo aleatoriamente tres miembros de la población,  $x_{r0}$ ,  $x_{r1}$ , y  $x_{r2}$ . Luego,  $v_i$  es generado como:

$$v_i = x_{r0} + F \cdot (x_{r1} - x_{r2}) \tag{4.1}$$

donde  $F$  es el factor de peso diferencial, con valores entre 0 y 1.

Luego, la estrategia para las próximas iteraciones es la siguiente:

$$v_{i,g} = old_{i,g} + (best_g - old_{i,g}) + x_{r0,g} + F \cdot (x_{r1,g} - x_{r2,g}) \tag{4.2}$$

donde  $old_{i,g}$  y  $best_g$  son el  $i$ -ésimo miembro y mejor miembro, respectivamente, de la población previa.

En las Tablas 4.2 y 4.3 se muestran los errores del proceso de calibración y los valores de los parámetros del modelo, respectivamente, para cada cuenca. Los valores en verde corresponden a índices aceptables o suficientes de los criterios de eficiencia más importantes, el KGE, NSE y log NSE.

Tabla 4.2: Errores preproceso de calibración.

ID	RMSE	KGE	NSE	log NSE	bias	MAE	log MAE	VE
PS	0.394	0.691	0.636	0.619	-0.002	0.141	1.614	-0.005
PRP	0.633	0.477	0.458	0.552	0.007	0.343	1.673	0.01
MH	1.37	0.782	0.601	0.539	-0.185	0.889	1.455	-0.07
GE	0.74	0.551	-0.042	0.389	0.036	0.485	1.991	0.046
CAJO	0.744	0.605	0.532	0.395	0.006	0.424	1.799	0.009
OAJC	0.535	0.651	0.484	-0.051	-0.035	0.27	2.172	-0.08
MAJSF	0.344	0.608	0.663	0.588	0.086	0.248	1.528	0.134
YLAJSF	0.357	0.716	0.531	0.284	-0.038	0.239	1.732	-0.073
AM	0.374	0.579	0.452	0.556	-0.01	0.212	1.452	-0.02
QRRE	0.688	0.449	0.106	-0.85	-0.022	0.322	4.372	-0.064
LAJC	1.917	0.434	0.332	0.756	-0.064	0.543	1.203	-0.024
CAJC	1.543	0.659	0.486	0.432	-0.2	1.045	1.47	-0.068
PP	1.635	0.514	0.441	NaN	0.661	1.242	Inf	0.282
CHN	6.095	0.401	-0.19	-0.074	0.098	2.707	2.22	0.03

Tabla 4.3: Valores de parámetros del modelo, post calibración.

ID	SCF	DDF	T <sub>R</sub>	T <sub>S</sub>	T <sub>M</sub>	LP	FC	β	K <sub>0</sub>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	LSUZ	C <sub>P</sub>	B <sub>MAX</sub>	C <sub>R</sub>
PS	1.083	4.774	2.997	0.997	1.954	0.999	330.993	0.62	1.033	6.869	79.082	97.907	7.947	3.075	0.232
PRP	1.499	0.916	2.999	0.999	1.997	0.999	598.249	0.595	0.157	29.998	121.049	97.768	7.995	29.391	0.114
MH	0.9	3.96	2.992	0.472	-1.999	0.193	588.583	0.2	0.014	29.998	92.965	75.416	7.999	0.157	2.781
GE	1.017	0.91	2.986	-0.334	-1.705	0.466	328.733	1.492	0.863	8.995	44.787	59.28	0.625	2.667	28.72
CAJO	1.488	4.701	2.986	-0.188	0.636	0.97	241.44	0.254	1.025	27.239	64.908	53.995	4.711	23.506	0.05
OAJC	1.091	2.375	1.622	-2.965	1.867	0.696	595.42	1.782	1.041	7.637	57.148	55.798	3.92	2.487	18.027
MAJSF	0.9	0.617	2.999	0.999	1.866	0.985	599.172	0.043	1.304	29.995	101.117	36.45	5.713	29.599	5.553
YLAJSF	1.312	1.908	2.568	0.992	1.984	0.615	598.292	0.98	1.331	29.829	90.917	75.711	2.999	29.242	0.135
AM	1.499	0.252	2.999	0.999	1.996	0.998	599.913	0.788	0.008	29.984	209.969	82.897	7.997	17.241	38.543
QRRE	1.103	0.999	2.956	0.571	1.729	0.997	27.916	19.638	0.028	29.835	48.443	98.97	7.988	26.733	22.782
LAJC	1.374	1.564	2.999	0.991	-1.655	0.943	589.789	0.344	1.637	25.892	86.35	99.835	7.999	29.3	20.077
CAJC	1.499	1.626	2.999	0.999	1.999	0.999	599.504	0.573	0.001	29.993	70.557	32.821	7.998	25.772	29.362
PP	0.9	2.548	2.996	0.998	1.31	0.01	591.253	0.035	0.01	29.999	104.805	75.318	7.998	12.123	26.161
CHN	1.036	0	2.992	0.979	1.872	0.943	1.733	2.061	0.349	22.738	83.406	99.913	2.513	4.481	35.762

La figura 4.2 muestra el hidrograma simulado del proceso de calibración de la estación con mejor y peor ajuste. En el Anexo C se muestran los hidrogramas simulados restantes.

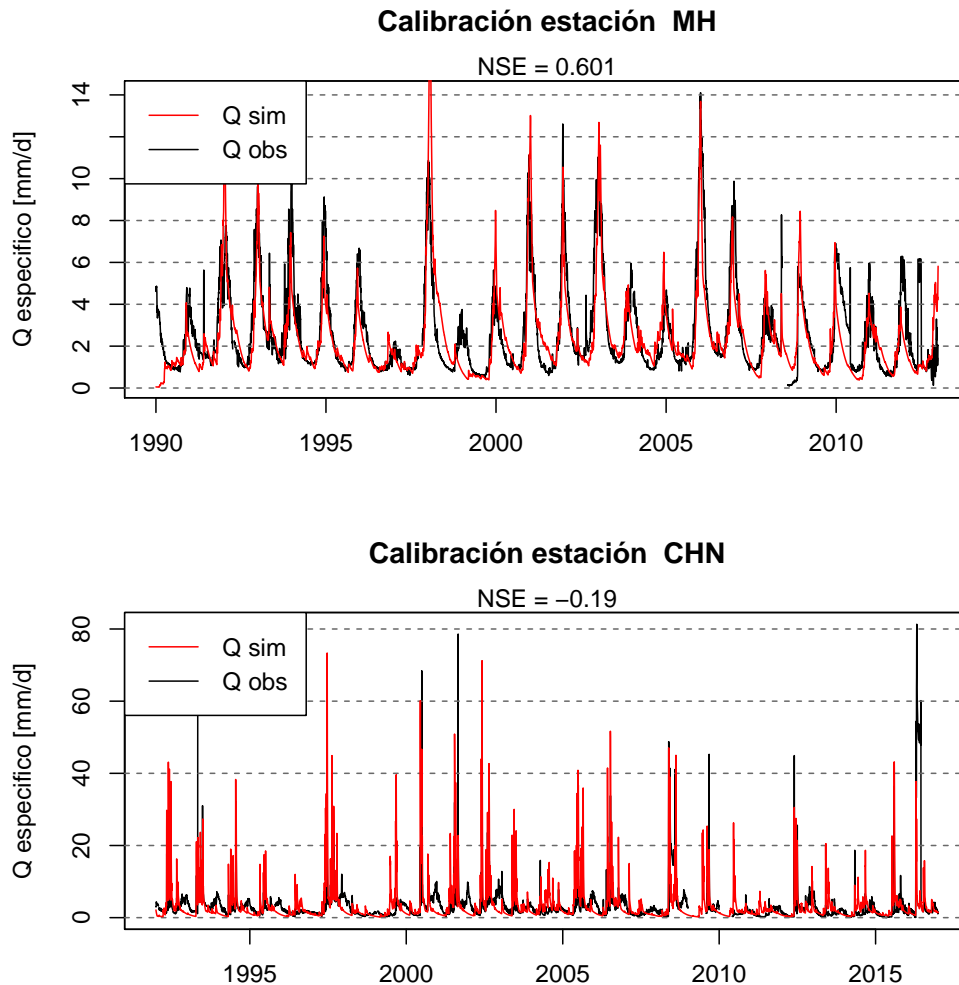


Figura 4.2: Resultados del proceso de calibración, cuenca con mejor y peor ajuste.

En el proceso de calibración y de acuerdo al índice KGE, existen 7 cuencas con una modelación aceptable. Estas 7 cuencas corresponden a PS, con un KGE de 0.691; MH, con un KGE de 0.782; CAJO, con un KGE de 0.605; OAJC, con un KGE de 0.651; MAJSF, con un KGE de 0.608; YLAJSF, con un KGE de 0.716; y CAJC, con un KGE de 0.659.

Desde el punto de vista de un análisis visual de las 7 cuencas con buen comportamiento, se puede decir que el modelo TUW capta de buena manera los flujos base y caudales medios, pero falla en la predicción de caudales altos, producto de tormentas puntuales.

### 4.2.2. Validación

Para validar el modelo, se utilizan los parámetros del modelo calibrados, Tabla 4.3. Los periodos de validación varían según la data de cada cuenca y se encuentran en la Tabla 4.1.

La Tabla 4.4 muestra los errores de las estimaciones en el proceso de validación. Las Figuras 4.3 y 4.4 muestran el hidrograma del proceso de validación de la cuenca con mejor y peor ajuste, respectivamente. En el Anexo D se muestran los hidrogramas simulados restantes.

Tabla 4.4: Errores proceso de validación.

ID	RMSE	KGE	NSE	log NSE	bias	MAE	log MAE	VE
PS	0.793	0.536	0.447	0.762	-0.048	0.202	1.508	-0.103
PRP	1.03	0.43	0.372	0.549	-0.064	0.539	1.744	-0.066
MH	1.172	0.801	0.748	0.704	-0.214	0.828	1.366	-0.073
GE	0.896	0.333	-0.565	-0.186	-0.031	0.746	2.513	-0.026
CAJO	1.681	0.202	0.037	-4.202	-1.325	1.331	3.333	-0.632
OAJC	1.891	-0.04	-0.402	-3.546	-1.267	1.301	4.429	-0.706
MAJSF	0.352	0.398	0.196	0.229	0.122	0.285	1.777	0.246
YLAJSF	0.446	0.68	0.512	0.418	-0.112	0.277	1.753	-0.186
AM	0.718	0.455	0.408	0.66	-0.117	0.351	1.434	-0.14
QRRE	1.31	0.044	-0.033	-2.486	-0.518	0.67	12.366	-0.623
LAJC	1.023	0.773	0.563	0.646	-0.099	0.448	1.183	-0.038
CAJC	2.062	0.689	0.593	0.599	-0.703	1.427	1.491	-0.177
PP	1.769	0.581	0.547	0.31	-0.449	1.277	1.944	-0.156
CHN	4.725	0.023	-2.057	-0.796	0.395	2.648	2.322	0.125

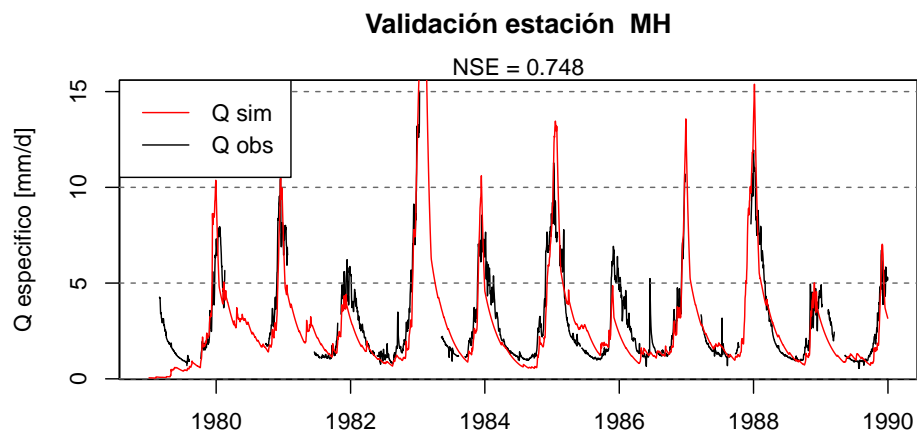


Figura 4.3: Resultado del proceso de validación, cuenca con mejor ajuste.

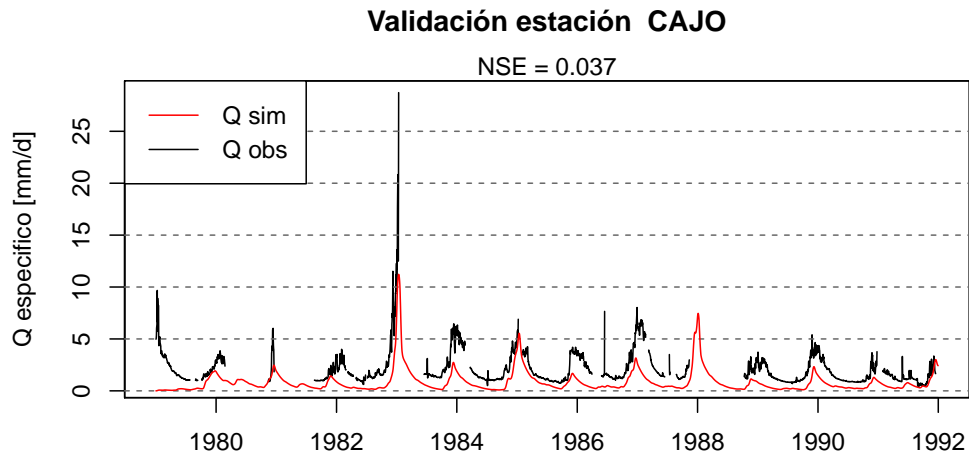


Figura 4.4: Resultado del proceso de validación, cuenca con peor ajuste.

En el proceso de validación y de acuerdo al índice KGE, existen 4 cuencas con una modelación aceptable. Estas 4 cuencas corresponden a MH, YLAJSF, LAJC y CAJC.

Las cuencas que se mantienen de la calibración son MH, con un KGE de 0.801; YLAJSF, con un KGE de 0.68; y CAJC, con un KGE de 0.689. Se agrega una nueva cuenca, LAJC, que en la calibración arroja un KGE de 0.434 y en la validación un KGE de 0.773. Las cuencas que ya no están son PS, con un KGE de 0.536; CAJO, con un KGE de 0.202; OAJC, con un KGE de -0.04; MAJSF, con un KGE de 0.398; y YLAJSF, con un KGE de -1.144.

Desde el punto de vista de un análisis visual de las 7 cuencas aceptables del proceso de calibración, más la nueva del proceso de validación, se puede decir que las cuencas PS, MH, YLAJSF, LAJC y CAJC son bien modeladas, con problemas en los caudales altos. Mientras tanto, en las cuencas CAJO, OAJC y MAJSF el modelo TUW subestima los caudales base y no se ajusta bien en caudales medios ni altos.

A las 5 cuencas con buen comportamiento se puede agregar PP, con un KGE de 0.514 y 0.581, en los procesos de calibración y validación respectivamente. En un examen visual, es posible observar que se tiene un buen ajuste en caudales bajos y medios, con problemas en los más altos.

---

## Capítulo 5

---

# PROYECCIONES BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

En el presente Capítulo se describe brevemente la generación de los datos de entrada del modelo para el periodo futuro. Luego se muestran los resultados de los caudales, en forma de curvas de duración, caudales medios y caudales máximos, contrastando la situación del periodo histórico.

### 5.1. Generación de series de datos de entrada al modelo

Los datos de entrada del modelo son precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial, de los cuales se ocupan 30 años de data, es decir, el periodo de tiempo desde el 01/01/2071 hasta el 31/12/2100.

Para generar la serie de datos futura se multiplica el coeficiente de variación de la precipitación por la serie de precipitación histórica y se suman los deltas de temperatura a la serie de temperatura histórica. Luego a partir de la relación entre la evapotranspiración potencial y la temperatura, se encuentra la ETP del periodo futuro. De esta manera, para las 14 estaciones se obtienen 5 nuevas series de precipitación, temperatura y evapotranspiración relacionados a los 5 GCM's del estudio.

## 5.2. Proyecciones bajo escenarios de cambio climático

Para poder comparar la situación futura con la histórica es necesario primero hacer la distinción entre los caudales históricos observados o “Línea Base histórica” y los caudales simulados a partir de las forzantes meteorológicas (Pp, temp y ETp) observadas, que dan como resultado la “Línea Base simulada”. Con estas dos curvas se puede tener una idea del sesgo propio del modelo.

Luego, al ingresar los inputs de los escenarios de cambio climático al modelo hidrológico se obtienen los caudales proyectados al futuro. Con esta información se puede contrastar la situación base con la de cambio climático.

### 5.2.1. Curvas de duración

A continuación, a modo de resumen, se muestran las curvas de duración de las estaciones con mejor ajuste. El mejor ajuste se verificó tomando en cuenta el proceso de calibración y validación. Las estaciones con un ajuste aceptable son PS, YLAJSF, LAJC, CAJC y PP, y la estación con un ajuste bueno es MH.

Las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3 presentan las curvas de duración de las cuencas PS, MH, LAJC, CAJC y PP. Los caudales observados de la *LB histórica*, obtenidos de la DGA del periodo 1979-2016 (donde exista dato), se muestran sombreados en azul; los caudales simulados de la *LB simulada*, obtenidos a partir de modelaciones del periodo 1987-2016, se muestran en negro; y las proyecciones de caudales al futuro, del periodo 2071-2100, se muestran en escala de rojo.

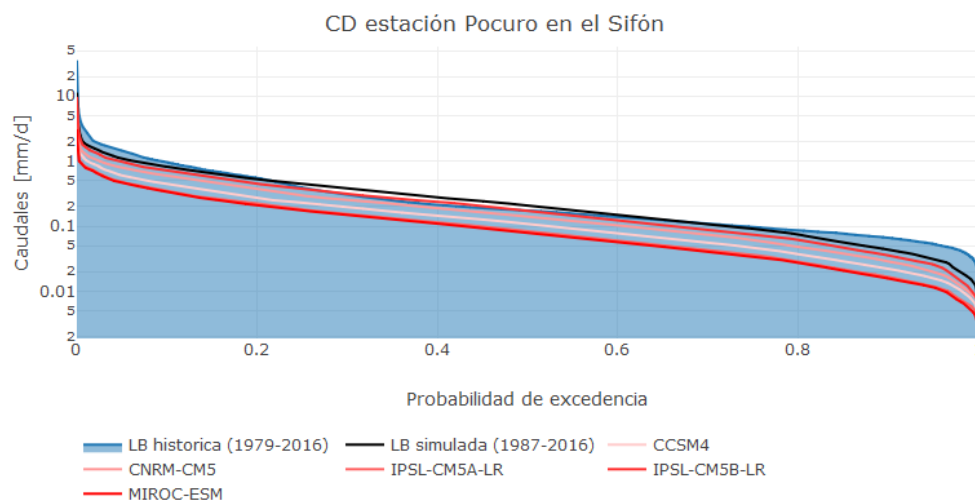


Figura 5.1: Curva de duración cuenca PS

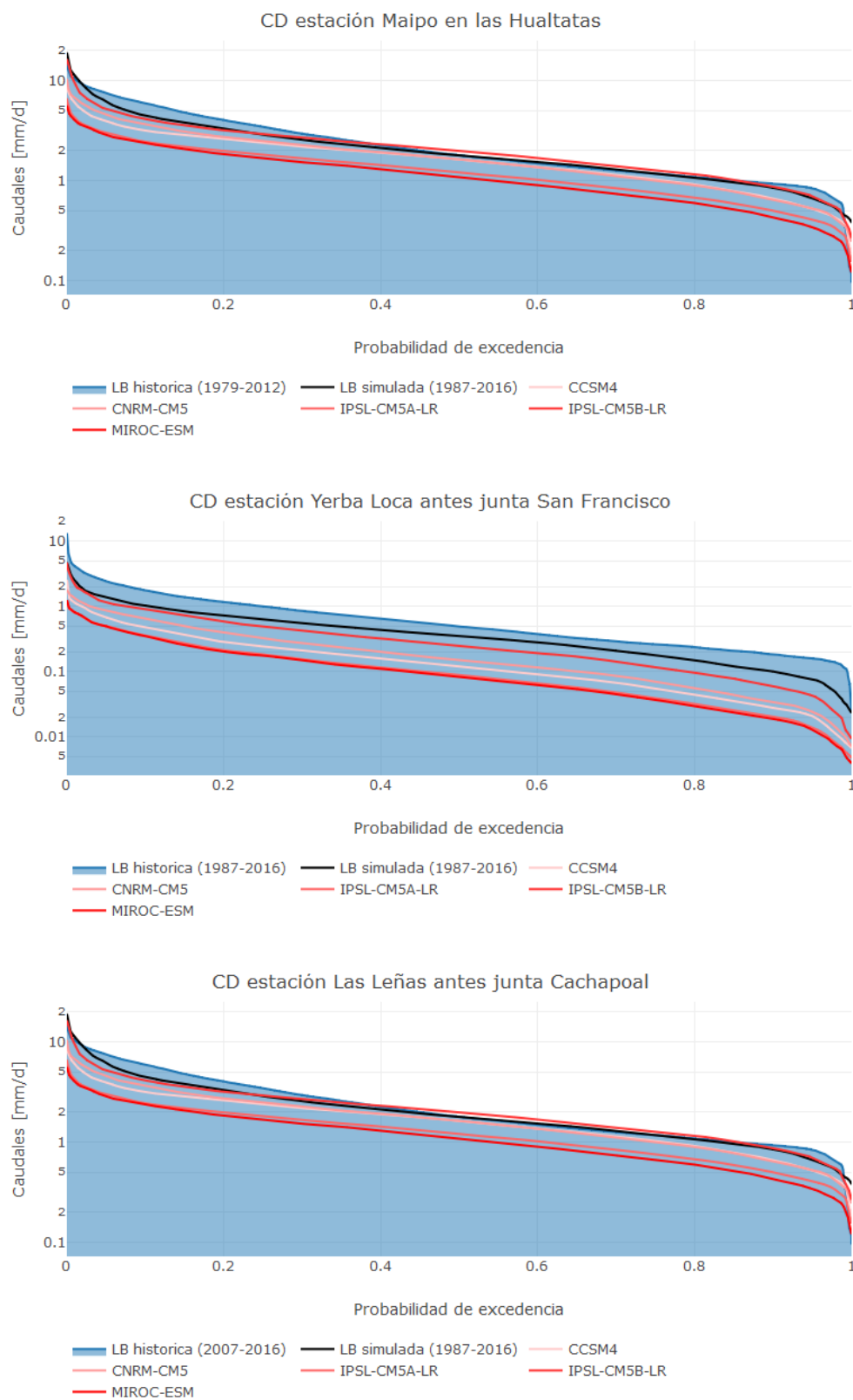


Figura 5.2: Curvas de duración cuencas MH, YLAJSF y LAJC.

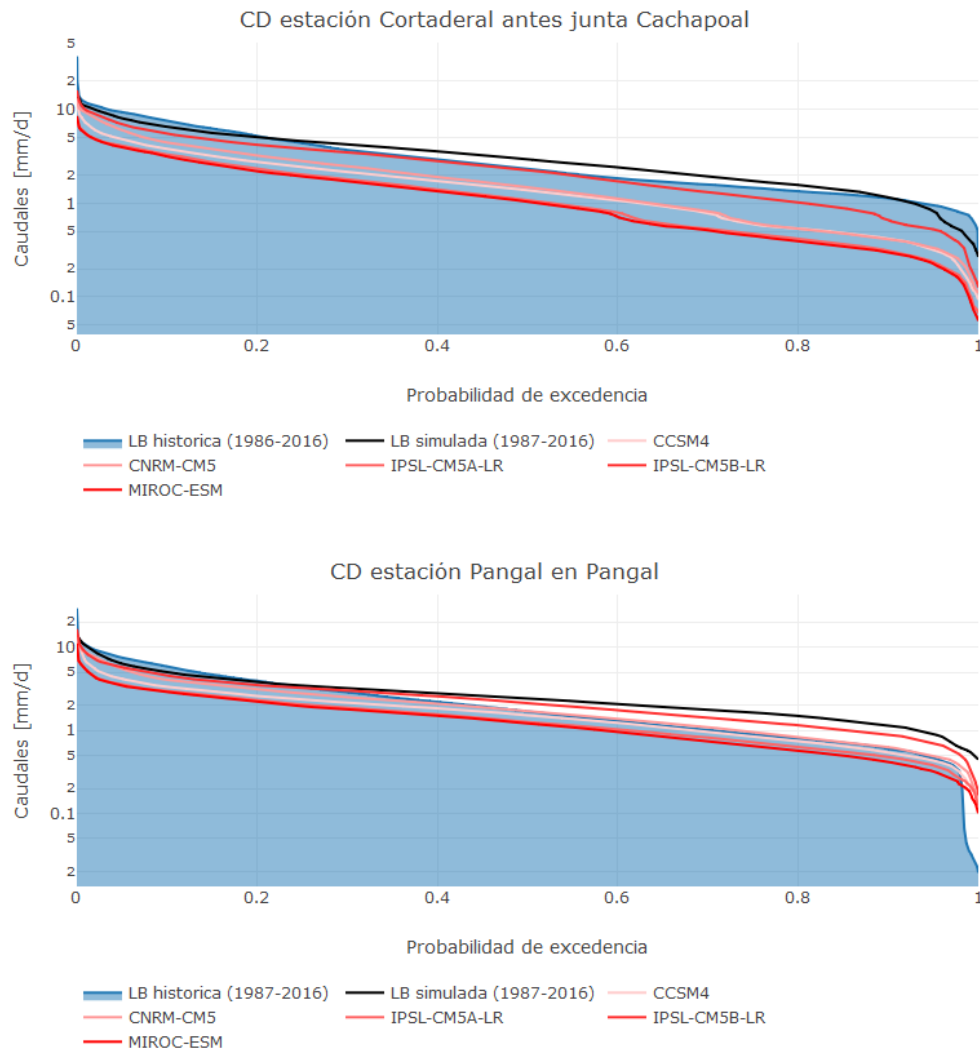


Figura 5.3: Curva de duración cuencas CAJC y PP

En los gráficos se puede ver que las cuencas con mejor ajuste, PS y MH, se comportan de mejor manera en los caudales centrales de la curva de duración. Esto quiere decir que los caudales medios que ocurren un 60 % a 80 % del tiempo son bien predecidos por el modelo, perdiendose este ajuste en los caudales extremos (máximos y mínimos).

En cuanto a los caudales proyectados a futuro producto de los 5 GCMs, se observa una dispersión, que va desde el escenario IPSL-CM5B-LR menos agresivo, a los escenarios IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM (superpuestos en la mayoría de los gráficos) más agresivos.

Al contrastar los caudales proyectados con la LB simulada, se puede ver que la disponibilidad del recurso hidráulico bajará en todo el espectro de caudales, bajos, medios y altos.

La Tabla 5.1 y las Figuras 5.4 y 5.5 presentan un resumen de los caudales de las estaciones con mejor ajuste, para diferentes probabilidades de excedencia y en las situaciones de línea base histórica y simulada, así como las proyecciones de cambio climático.

Tabla 5.1: Caudales de las estaciones en estudio en diferentes probabilidades de excedencia, para las situaciones de estudio.

Estacion	Prob exc	LB historica	LB simulada	CCSM4	CNRM-CM5	IPSL-CM5A-LR	IPSL-CM5B-LR	MIROC-ESM
PS	0.01	2.938	1.823	1.032	1.253	0.803	1.641	0.786
	0.05	1.452	1.092	0.6	0.795	0.48	0.951	0.468
	0.2	0.551	0.527	0.269	0.373	0.223	0.447	0.21
	0.5	0.174	0.207	0.109	0.141	0.084	0.176	0.08
	0.85	0.077	0.056	0.029	0.038	0.022	0.047	0.021
	0.95	0.054	0.032	0.016	0.02	0.012	0.026	0.012
MH	0.01	10.371	11.163	5.909	6.657	4.263	9.469	4.004
	0.05	7.517	6.151	3.941	4.497	2.973	5.175	2.824
	0.2	4.024	3.262	2.587	2.714	1.977	3.171	1.819
	0.5	1.784	1.785	1.622	1.626	1.205	1.978	1.093
	0.85	0.996	0.961	0.788	0.776	0.589	1.017	0.522
	0.95	0.838	0.665	0.523	0.525	0.409	0.7	0.342
YLAJSF	0.01	4.102	2.504	1.118	1.319	0.81	2.168	0.804
	0.05	2.422	1.356	0.68	0.858	0.498	1.131	0.495
	0.2	1.164	0.708	0.284	0.392	0.212	0.575	0.203
	0.5	0.49	0.35	0.12	0.148	0.089	0.243	0.082
	0.85	0.207	0.12	0.036	0.044	0.026	0.078	0.024
	0.95	0.159	0.076	0.021	0.024	0.014	0.043	0.013
LAJC	0.01	9.054	14.568	5.702	7.482	4.59	9.269	4.431
	0.05	6.375	7.44	4.087	4.805	3.598	6.435	3.449
	0.2	3.801	4.273	2.748	2.989	2.362	4.1	2.232
	0.5	2	2.635	1.604	1.632	1.295	2.54	1.085
	0.85	1.318	1.489	0.654	0.632	0.534	1.012	0.482
	0.95	1.084	0.939	0.438	0.434	0.36	0.749	0.329
CAJC	0.01	11.81	10.852	7.196	9.214	5.454	9.848	5.439
	0.05	9.347	8.013	4.744	6.009	4.024	6.954	3.941
	0.2	5.189	5.012	2.746	3.208	2.321	4.186	2.19
	0.5	2.302	2.93	1.37	1.482	1.073	2.249	1.034
	0.85	1.248	1.396	0.481	0.478	0.367	0.886	0.346
	0.95	0.951	0.83	0.319	0.334	0.235	0.527	0.225
PP	0.01	10.446	10.381	6.732	8.607	5.392	8.434	5.358
	0.05	7.471	6.328	4.15	5.51	3.524	5.737	3.435
	0.2	3.934	3.757	2.581	3.089	2.265	3.478	2.165
	0.5	1.686	2.445	1.51	1.701	1.253	2.113	1.209
	0.85	0.707	1.312	0.645	0.731	0.552	1.02	0.495
	0.95	0.464	0.901	0.432	0.498	0.379	0.703	0.323

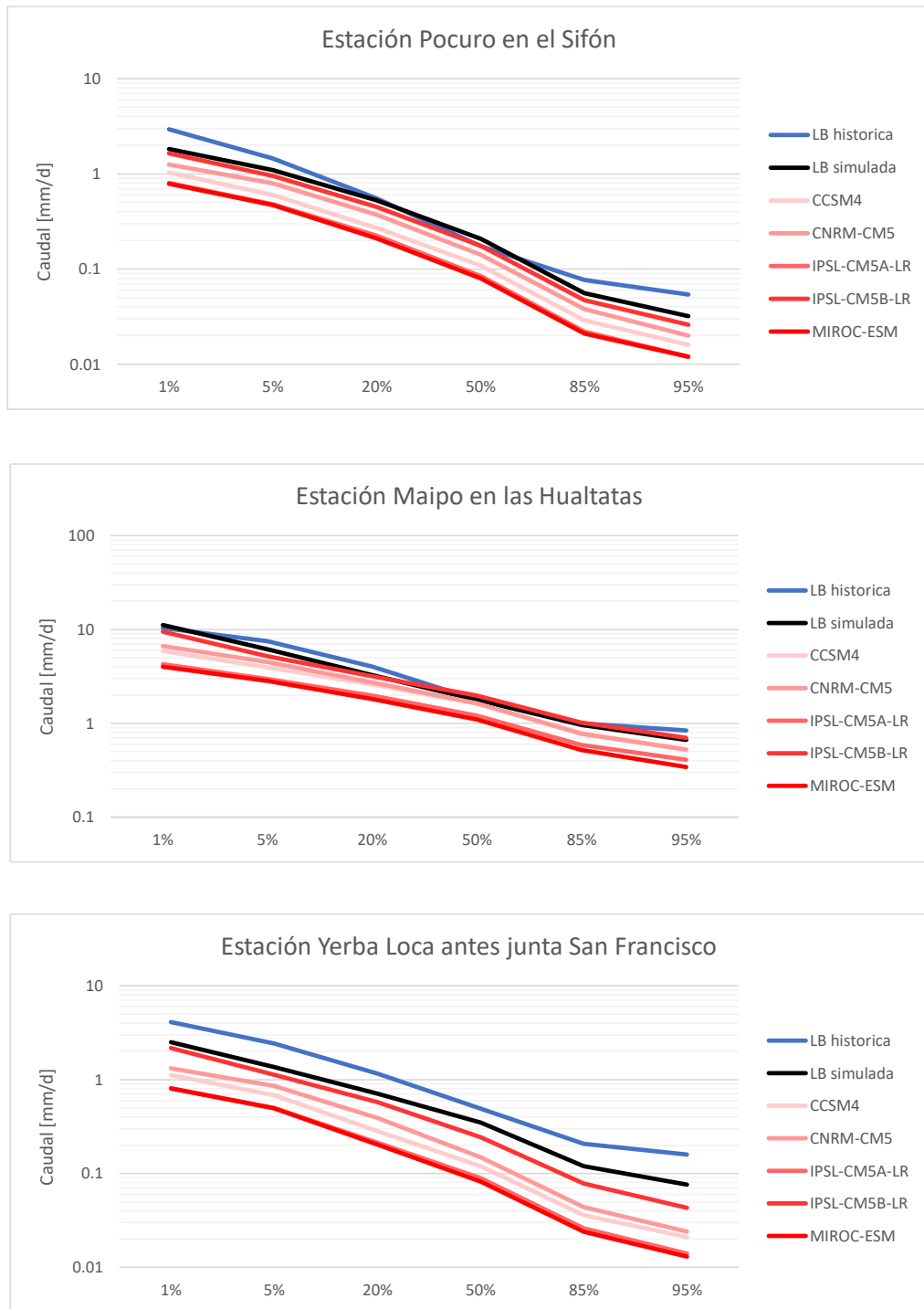


Figura 5.4: Caudales de diferentes periodos de excedencia, estaciones PS, MH y YLAJSF.

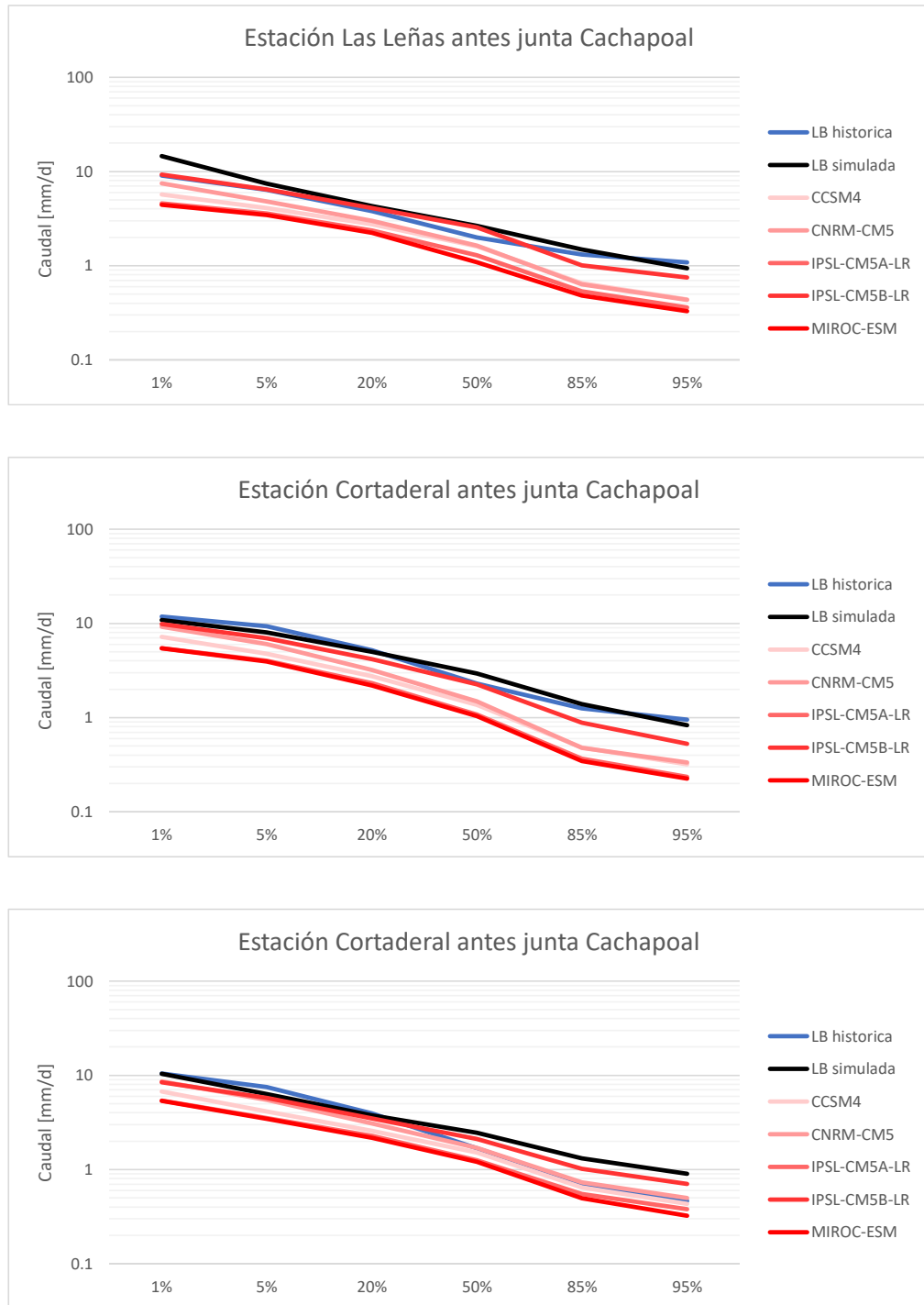


Figura 5.5: Caudales de diferentes periodos de excedencia, estaciones LAJC, CAJC y PP.

### 5.2.2. Promedio de caudales medios diarios

De igual manera que en la sección anterior, se muestran los promedios de caudales diarios de las estaciones con mejor ajuste. Las Figuras 5.6, 5.7 y 5.8 muestran los caudales observados de las cuencas PS, MH, YLAJSF, LAJC, CAJC y PP. Los caudales históricos de la *LB historica* en azul (1979-2016), los caudales simulados de la *LB simulada* en negro (1987-2016), y las proyecciones de caudales al futuro en escala de rojo (2071-2100).

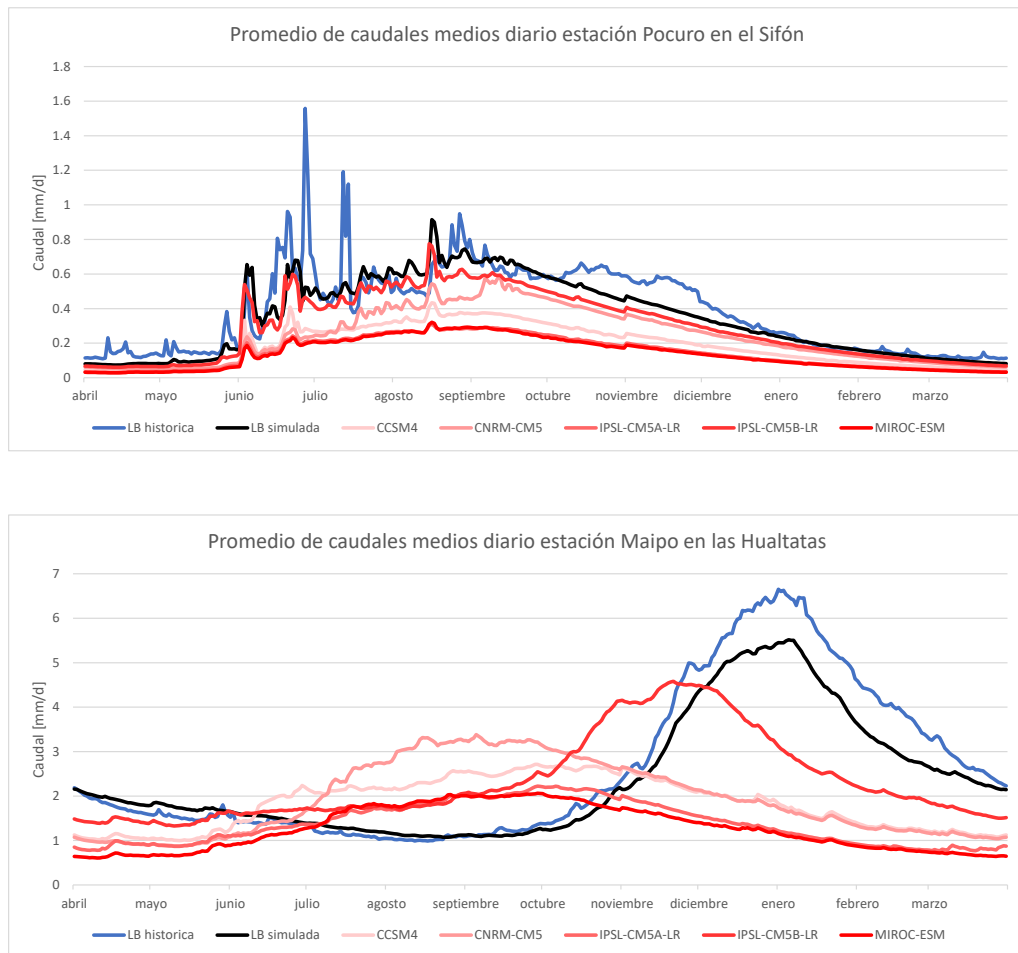


Figura 5.6: Caudales medios mensuales cuencas PS y MH

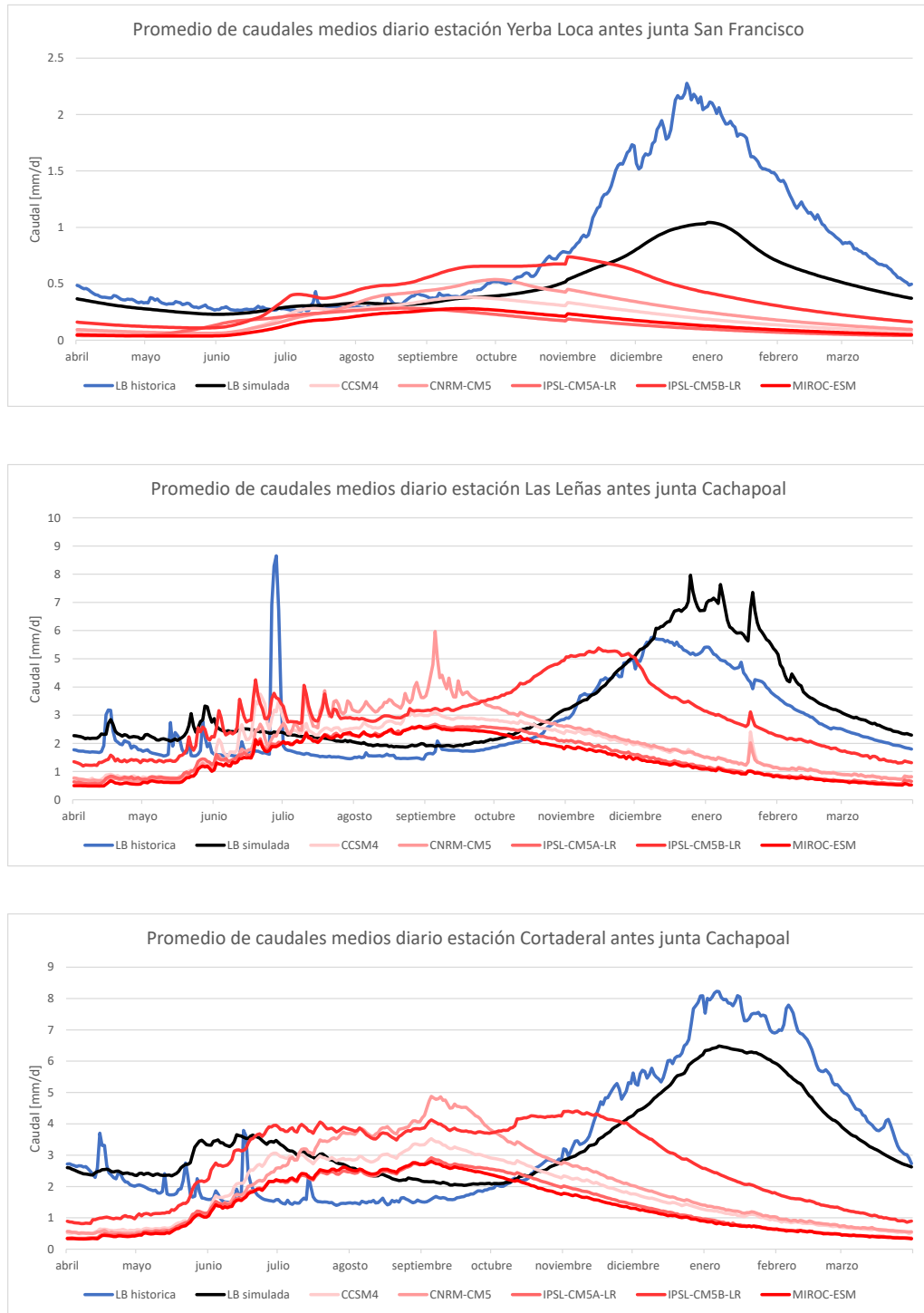


Figura 5.7: Caudales medios mensuales cuencas YLAJSF, LAJC y CAJC.

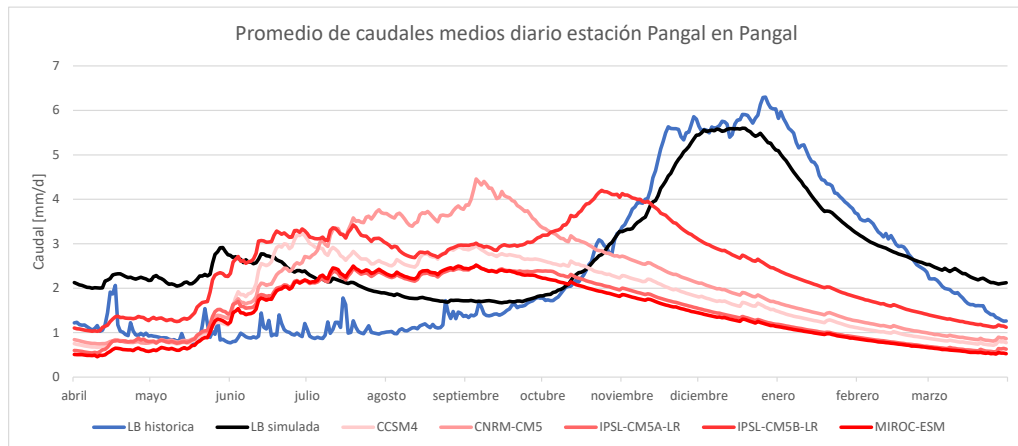


Figura 5.8: Caudales medios mensuales cuenca PP.

En los gráficos se aprecia que las estaciones con mejor ajuste, PS y MH tienen pequeñas diferencias entre las LB histórica y simulada. En PS no se modelan los peaks en los meses junio y julio, y en MH los caudales de deshielo son subestimados por el modelo. En las cuencas restantes existen mayores diferencias, tanto en caudales de invierno, como de verano.

En las estaciones MH, YLAJSF, LAJC, CAJC y PP las proyecciones de caudales producto de los GCMs sugieren un adelantamiento de caudales de deshielo para el GCM menos agresivo (IPSL-CM5B-LR) y un cambio de régimen desde nival a pluvial, con peaks de caudales entre julio y septiembre para el resto de los GCMs. La cuenca PS no sugiere un cambio de estacionalidad, sino que solamente una baja en los caudales disponibles.

Contrastando los caudales proyectados con la LB simulada, se puede ver que la disponibilidad del recurso hidráulico subirá entre julio y octubre, y disminuirá durante el resto del año. En promedio, anualmente, se dispondrá de menos agua.

La Tabla 5.2 muestra el centroide temporal de las estaciones en estudio en la situación de línea base histórica, también se muestran los deltas de retraso (valores positivos) o adelantamiento (valores negativos) de este centroide, para la línea base simulada y los GCMs.

Tabla 5.2: Centroide temporal de las estaciones con mejor ajuste.

Estación	Centroide	Delta					
		LB simulada	CCSM4	CNRM-CM5	IPSL-CM5A-LR	IPSL-CM5B-LR	MIROC-ESM
PS	16 de septiembre	1	3	10	1	1	1
MH	14 de noviembre	-11	-44	-44	-48	-26	-47
YLSJSF	22 de noviembre	-18	-47	-42	-68	-39	-48
LAJC	25 de octubre	3	-33	-32	-35	-19	-34
CAJC	16 de noviembre	-24	-59	-56	-61	-50	-62
PP	14 de noviembre	-26	-55	-53	-57	-47	-56

De los datos muestran un adelantamiento del centroide para todas las cuencas, excepto PS, que se trata de una cuenca pluvial, en la que el centroide se retrasa. El promedio del delta de la LB simulada es de -12.5 días, lo que quiere decir que es el fallo promedio del modelo con respecto a la LB histórica. Los delta de los GCMs van desde -30 para el modelo IPSL-CM5B-LR (menos agresivo) y -44.7 para el modelo IPSL-CM5A-LR (más agresivo), los modelos intermedios tienen promedios de -32.2, -39.2 y -41 para los modelos CNRM-CM5, CCSM4 y MIROC-ESM, respectivamente.

### 5.2.3. Caudales máximos

Realizando un análisis de frecuencias con la probabilidad empírica de Weibull se obtienen los resultados de la Tabla 5.3, en donde se muestran los caudales para los periodos de retorno de 50, 100 y 200 años en los periodos de invierno y verano. Y las Figuras 5.9 y 5.10 muestran los caudales en dichos periodos de retorno, en los periodo de invierno (línea azul) y verano (línea roja).

En las Figuras 5.9 y 5.10 se observa un cambio de estacionalidad para los caudales de periodo de retorno alto, que se puede observar en la situación en que la línea azul sobrepasa la línea roja, incluso para el modelo IPSL-CM5B-LR menos agresivo (excepto la estación MH). Cabe mencionar que el cambio en la estacionalidad no se da en el caso de la estación PS, en donde se mantiene el dominio de los caudales de invierno. Otra cosa observable es la disminución de los caudales para todos los periodos de retorno.

Tabla 5.3: Caudales para varios periodos de retorno en temporada de invierno y verano.

Estacion	Temporada	Periodo Retorno	LB	LB	CCSM4	CNRM	IPSL	IPSL	MIROC ESM
			historica	simulada		CM5	CM5A-LR	CM5B-LR	
PS	Invierno	50	2.777	1.82	1.032	1.198	0.803	1.638	0.786
		100	3.683	2.166	1.246	1.478	0.945	1.888	0.935
		200	5.079	2.883	1.371	1.964	1.026	2.695	1.015
	Verano	50	1.666	1.05	0.607	0.866	0.487	0.906	0.465
		100	1.899	1.232	0.758	0.995	0.601	1.1	0.584
		200	2.141	1.418	0.891	1.17	0.71	1.297	0.691
MH	Invierno	50	3.037	3.218	4.884	6.602	3.624	3.685	3.703
		100	3.933	3.845	6.154	7.248	4.263	4.051	4.322
		200	6.156	4.404	7.309	8.057	4.818	4.35	4.632
	Verano	50	10.371	11.163	5.22	4.826	3.737	9.469	3.389
		100	11.035	12.633	5.718	5.569	4.283	11.659	3.71
		200	12.611	14.18	6.488	6.081	4.594	13.971	4.004
YLAJSF	Invierno	50	0.891	0.988	1.043	1.166	0.81	1.718	0.767
		100	1.063	1.088	1.268	1.308	0.896	2.21	0.887
		200	1.256	1.153	1.376	1.522	0.935	2.571	0.953
	Verano	50	4.094	2.504	0.845	1.121	0.503	1.763	0.617
		100	4.688	3.106	1.044	1.332	0.581	1.964	0.74
		200	6.235	3.588	1.116	1.42	0.669	3.067	0.804
LAJC	Invierno	50	4.736	4.742	5.592	7.436	4.553	6.597	4.43
		100	7.263	5.314	6.578	10.047	5.223	7.66	4.98
		200	13.987	5.972	11.834	17.017	5.917	13.739	5.712
	Verano	50	8.308	14.325	4.185	4.531	3.626	8.394	3.29
		100	9.402	15.595	4.482	4.944	3.945	9.68	3.605
		200	9.949	18.061	4.802	5.479	4.109	12.443	3.732
CAJC	Invierno	50	4.289	7.619	7.196	9.214	5.454	9.775	5.439
		100	5.572	8.709	8.174	9.901	6.089	10.979	6.004
		200	10.195	9.655	8.99	10.333	6.55	12.385	6.452
	Verano	50	11.609	10.768	4.318	5.18	3.721	7.733	3.309
		100	12.396	11.286	4.813	5.892	4.168	8.352	3.727
		200	13.143	12.842	5.154	6.834	4.415	9.023	4.009
PP	Invierno	50	3.239	5.519	6.732	8.607	5.392	8.069	5.358
		100	4.33	6.536	8.714	9.442	6.077	9.817	6.209
		200	6.165	7.169	10.026	10.391	6.683	11.278	6.704
	Verano	50	10.231	10.381	3.848	4.405	3.278	6.299	3.055
		100	11.173	11.635	4.202	5.04	3.551	6.978	3.371
		200	11.95	12.637	4.509	5.679	3.809	8.19	3.521

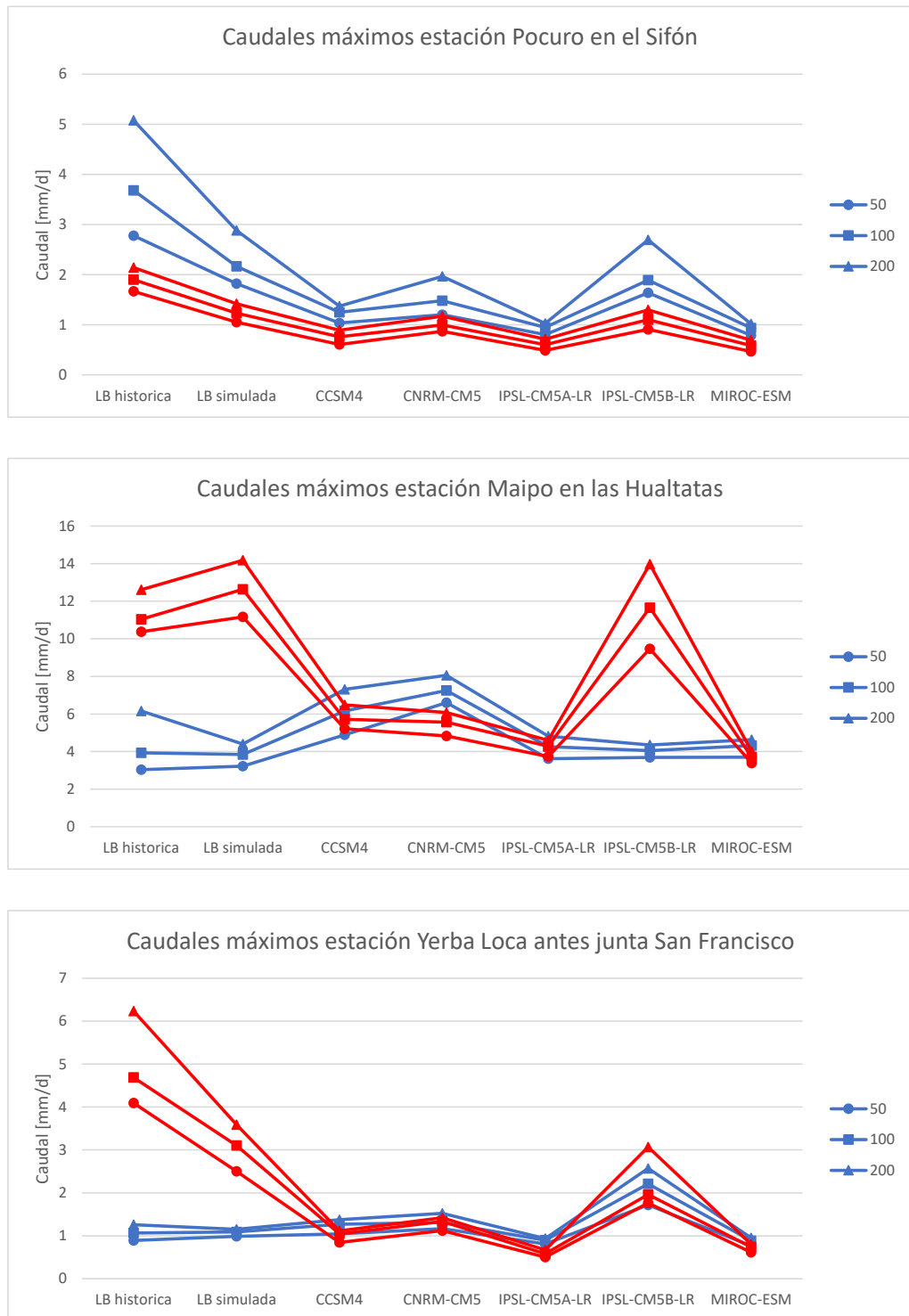


Figura 5.9: Caudales extremos cuencas PS, MH y YLAJSF, en verano (línea roja) e invierno (línea azul), para distintos periodos de retorno.

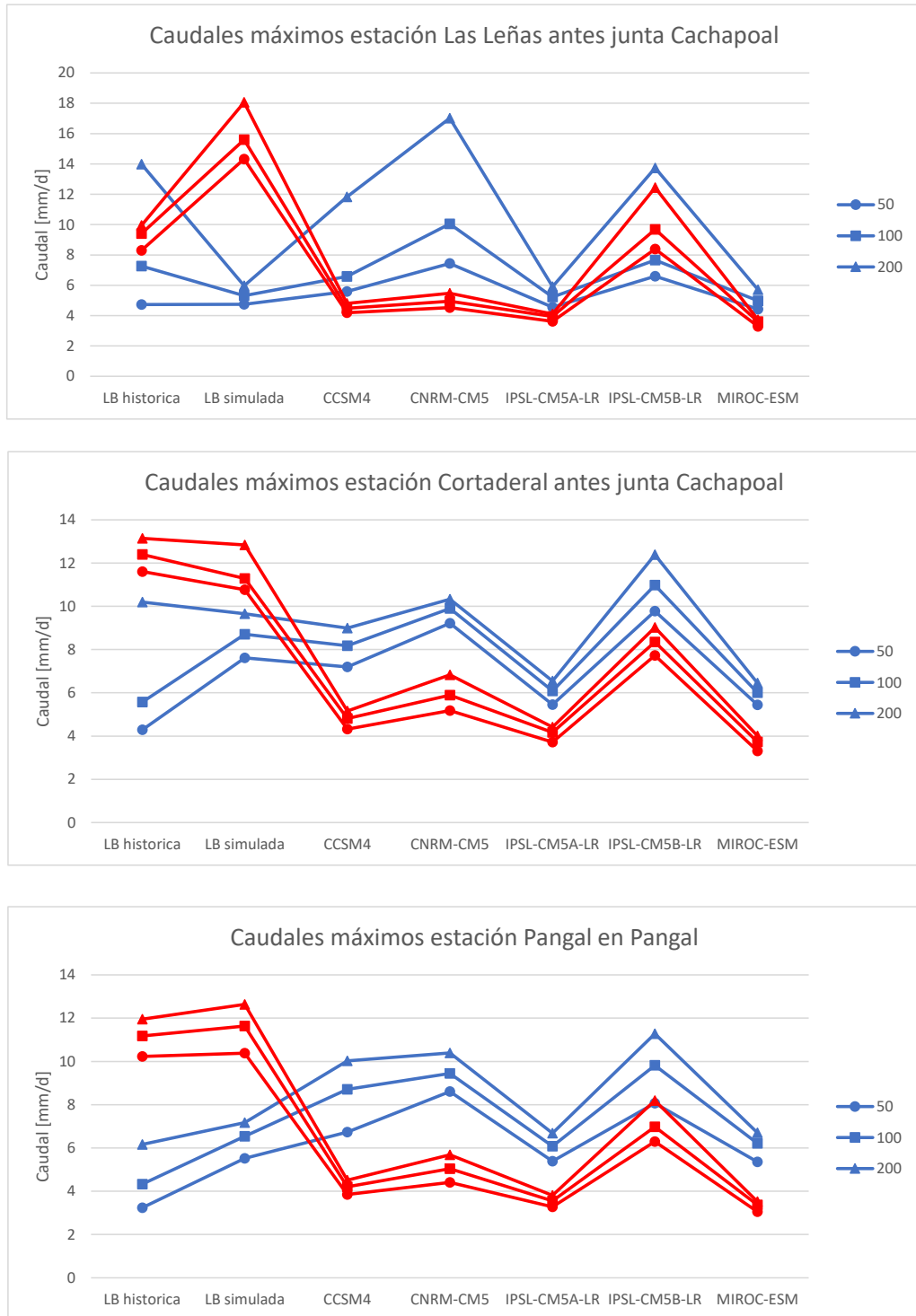


Figura 5.10: Caudales extremos cuencas LAJC, CAJC y PP, en verano (línea roja) e invierno (línea azul), para distintos periodos de retorno.

---

## Capítulo 6

---

# DISCUSIONES

### 6.1. Incertidumbre

Existe incertidumbre en los datos y el modelo. Los datos utilizados son de la base de datos CAMELS-CL y los GCMs, de los que se abordan las fuentes de error producto del modo de obtención de los mismos. Luego se continúa con la incertidumbre del modelo, del que se discute de la incertidumbre producto de los procesos que este considera, si es que son verdaderamente representativos de la cuenca en estudio; los datos que este utiliza y la forma en la que se calibra.

#### 6.1.1. Datos

Los datos utilizados en este estudio provienen de dos fuentes: la base de datos CAMELS-CL, del CR2 y 5 GCMs de diversas instituciones.

##### 6.1.1.1. CAMELS-CL

Esta base de datos contiene la precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial y caudales observados, entre otras, integrados a escala de cuenca. Los procesos hidrológicos son no lineales, lo que quiere decir que al considerar los datos como homogéneos en toda la cuenca es una fuente de error. La utilización de las forzantes climáticas usadas por el modelo (temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial) distribuidas espacialmente mejoraría el desempeño del modelo en representar los caudales observados. La Figura 6.1 muestra los resultados de modelar distintas

cuencas a través de un modelo concentrado y un modelo distribuido [CORFO, 2018].

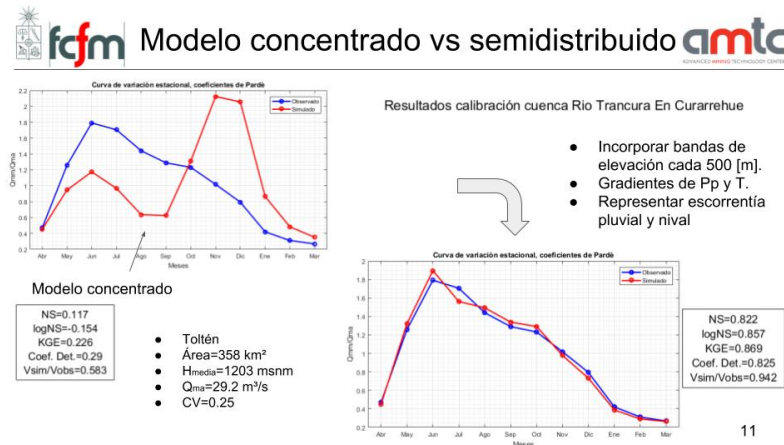


Figura 6.1: Comparación entre un modelo concentrado vs un modelo distribuido [CORFO, 2018].

La precipitación, temperatura y evapotranspiración provienen de reanálisis de información satelital (ERA-Interim y MODIS), calibrados con observaciones locales. Al ser reanálisis satelitales se tiene un incertidumbre por no ser información tomada en terreno y estar sujeta a una calibración.

La evapotranspiración tiene una mención especial, dado que los datos provienen del producto MOD16, un reanálisis del satélite MODIS de la NASA, se usó este producto, ya que es una manera rápida y fácil de obtener los datos deseados. Los datos de ETp están desde el año 2000 al 2016, y para el resto del periodo de estudio, 1987 al 1999, se extrapoló mediante una relación cuadrática con la temperatura. La evapotranspiración es un proceso dinámico que tiene muchos otros procesos relacionados, y relacionarlo simplemente con la temperatura es una simplificación bastante básica. Como se ve en la Figura 3.1 y las Figuras del Anexo A, la relación entre la ETp y la temperatura presenta una alta variabilidad, por lo que extrapolarla por su relación con la temperatura presentaría errores. De acuerdo a Ruhoff et. al. (2013), la ETp del producto MOD16 es subestimada un 20 % por errores en la caracterización del uso de suelo (land use cover), obteniéndose mejores resultados en zonas más áridas y en periodos de verano. Por lo que para futuros estudios, se podría considerar el uso del método de Thornthwaite o de Hargreaves (que está en la base de datos CAMELS-CL) para la obtención de la ETp.

Los caudales observados son obtenidos de las estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA). Existen errores en las mediciones producto del error humano en la manipulación instrumental o en el tipeo de los valores, falta de datos o también cambios en la curva de descarga producto del cambio en la sección del lecho del río (transporte de sedimentos).

### 6.1.1.2. GCMs

Los GCMs contienen las proyecciones de temperatura y presentación a escala global, en una malla de entre 0.9 °y 3.8 °de resolución. Las proyecciones provienen de modelos climáticos que difieren en los procesos que toman en cuenta por lo que como resultado se tiene mucha dispersión en las temperaturas y precipitaciones modeladas.

Por otro lado, dada la resolución espacial de los modelos, fue necesario un escalamiento de los datos. El escalamiento espacial utilizado, el inverso de la distancia, no toma en cuenta información geoespacial, sino que solamente interpola por la distancia a un punto de información. En futuros trabajos se podría intentar la implementación de métodos de escalamiento estadístico o dinámico, en vez de deltas a modo de mejorar la incertidumbre.

### 6.1.2. Modelo TUW

El modelo hidrológico utilizado, es del tipo semi-distribuido, pero en este trabajo fue utilizado de forma concentrada. En la naturaleza, los procesos hidrológicos son no lineales, por lo que varían de un punto a otro y tomarlos como un promedio por cuenca es una fuente de error.

Los procesos hidrológicos son modelados a través de 15 parámetros, que crean una rutina de nieve, una de balance de humedad del suelo y una respuesta y función de transferencia. Las cuencas del estudio son cordilleranas, por lo que presentan glaciares en las partes más altas. El modelo no tiene un componente glaciar, por lo que no modela bien las cuencas que tengan una componente importante de este proceso hidrológico. La Tabla 6.1 muestra el porcentaje de área cubierta por glaciares de cada cuenca del estudio. En la Figura 6.2 se observan los glaciares presentes en la zona de estudio (Fuente: Mapoteca Digital DGA, Inventario Glaciares Nacionales al año 2015).

Tabla 6.1: Porcentaje de área glaciar.

ID	% Glaciar	ID	% Glaciar
RAJC	5.33	MAJSF	3.92
PS	0	YLAJSF	19.24
PRP	1.09	AM	0.15
HD	1.58	CP	0.18
MH	8.63	LAJC	6.49
GE	18.06	CAJC	32.65
CAJO	12.91	PP	11.61
OAJC	16.91	CHN	1.67

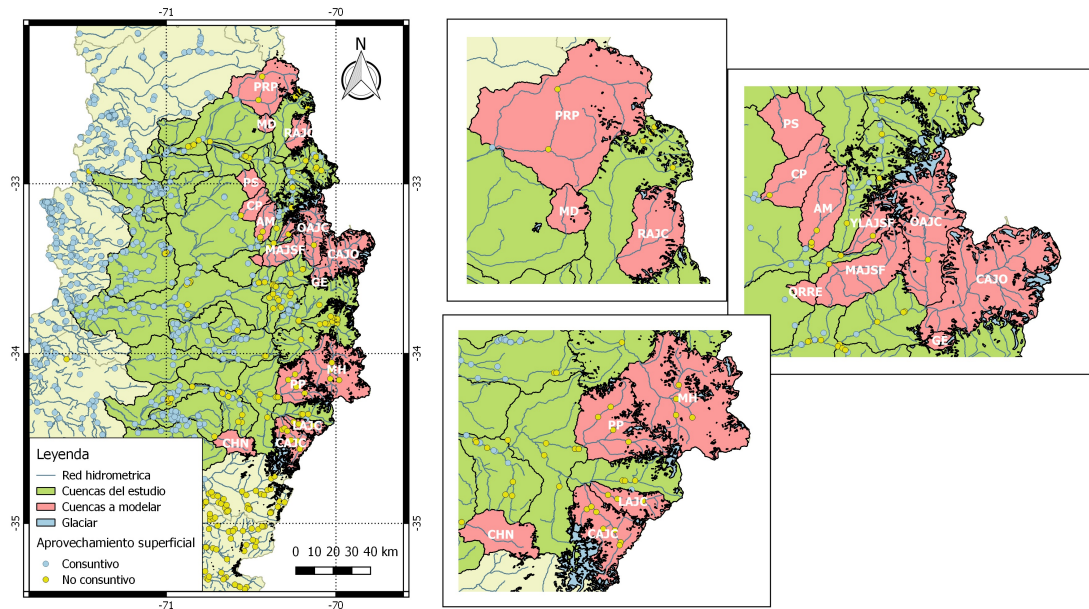


Figura 6.2: Inventario de glaciares en la zona de estudio

Las cuencas con una presencia importante de glaciares son GE, CAJO, OAJC, YLAJSF, CAJC y PP. Esto puede explicar los resultados de las cuencas CAJO, OAJC y YLAJSF. Sin embargo, como consecuencia de la parametrización, el modelo TUW puede replicar en cierto modo el escurrimiento glaciar de la cuenca CAJC, a pesar de su alta presencia glaciar.

Dado que el modelo tiene una gran cantidad de parámetros, existe un problema con la calibración de estos, en donde hay varias soluciones óptimas. En este caso el método de calibración utilizado, el algoritmo genético, puede no ser el mejor, pudiendose optar por métodos más sofisticados para encontrar soluciones óptimas.

Las cuencas consideradas en este estudio son cuencas sin extracciones superficiales del tipo consuntivo, obtenidas desde el catastro de la DGA. Como se muestra en la Figura 6.3, existen extracciones superficiales no consuntivas no catastradas como la del río Colorado y la del río Olivares, bocatoma 1 y 2 respectivamente, pertenecientes a AES Gener. En la imagen de la izquierda se ve una extracción superficial no consuntiva catastrada perteneciente a RP Global Chile Energias Renovables S.A., que en conversaciones con la empresa señaló que no está siendo ocupado (fecha de consulta: 05/04/2018).

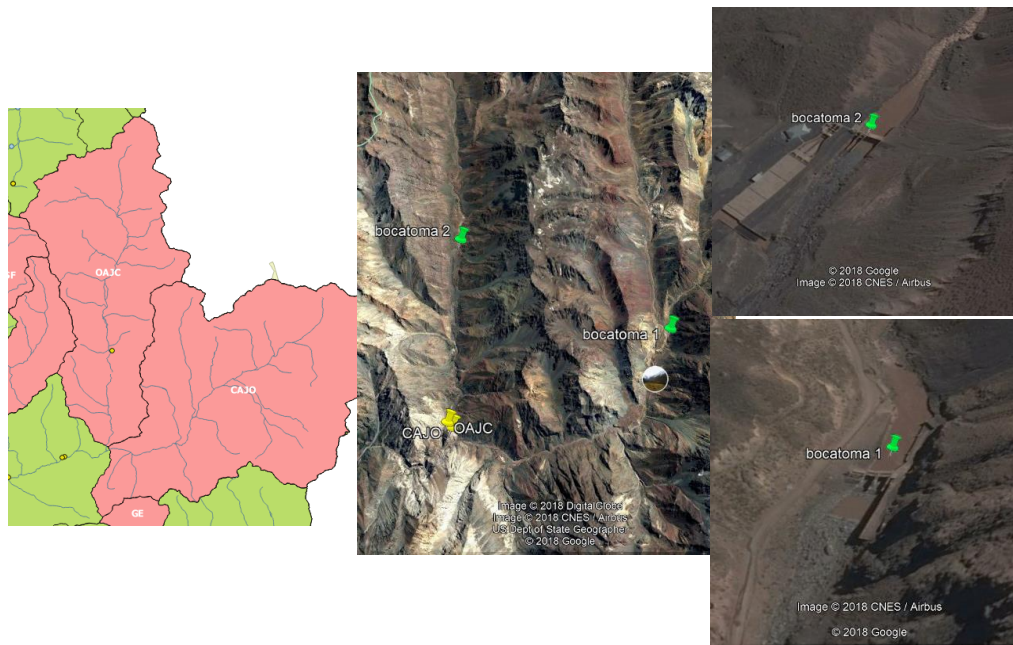


Figura 6.3: Extracciones no catastradas

## 6.2. Resultados

### 6.2.1. Calibración y validación

Del proceso de calibración y validación surgen 5 cuencas con resultados de modelación aceptables. Estas 5 cuencas son PS, MH, LAJC, CAJC y PP. En estas el índice KGE es mayor a 0.5 y visualmente se ajustan adecuadamente los caudales bajos y medios, mientras que los caudales altos son subestimados.

### 6.2.2. Curva de duración

Las curvas de duración muestran que la línea base histórica y la simulada se ajustan bien en la zona media, probabilidades de excedencia entre 0.2 y 0.8, y se subestiman los caudales extremos mínimos y máximos ( $P_{exc} < 0.2$  y  $P_{exc} > 0.8$ ). En la cuenca PP se sobrestiman los caudales con  $P_{exc} > 0.3$ , situación esperable dado que es la cuenca con un índice KGE menor de entre las de mejor comportamiento.

Las proyecciones climáticas tienen una alta dispersión, todas indican una baja en la disponibilidad del recurso hidráulico, pero unas con mayor agresividad que otras. El modelo menos agresivo es

el IPSL-CM5B-LR y los más agresivos son el IPSL-CM5A-LR y el MIROC-ESM. Esto concuerda con la Figura 3.2, en la que se muestra gráficamente los cambios en precipitaciones y temperatura.

Esto concuerda con lo predicho por Krellenberg and Hansjürgens (2014) quienes dicen que para finales del siglo se tendrá una menor disposición de caudales y analizan las consecuencias de esto en materia económica, por la dependencia del recurso en el ámbito energético, agropecuario, sanitario.

### 6.2.3. Promedio de caudales medios diarios

Los promedios de caudales medios diarios muestran diferencias entre la línea base histórica y la simulada, pero la estacionalidad de las cuencas está bien modelada.

Las proyecciones climáticas indican un cambio en la estacionalidad de las cuencas nivales (MH, LAJC, CAJC y PP) a un régimen pluvial, con crecidas entre los meses de julio y octubre. Dependiendo de la agresividad del modelo climático, esto se ve más o menos acentuado. La cuenca pluvial PS no presenta un cambio de régimen, sino que, más bien una disminución en la disponibilidad total del recurso hidráulico.

Este cambio de estacionalidad concuerda con lo dicho por Migliavacca et. al. (2015). Quien producto de la elevación de la isoterma 0 °C predice un retroceso de glaciares, que tendrá como resultado una alta escorrentía inicial en el periodo de deshielo, que irá decreciendo a medida que avanza el siglo. Los caudales de invierno bajarán de igual manera, especialmente bajo el escenario RCP8.5.

### 6.2.4. Caudales máximos

Los caudales máximos, para periodos de retorno de 50, 100 y 200 años sugieren una baja en la cantidad de agua de estas crecidas, por lo que las obras diseñadas para estos caudales quedarían sobredimensionadas en el escenario de fin de siglo. Sin embargo, el ajuste del modelo no es aceptable para tales periodos de retorno, es posible ver esto en las Figuras 5.9 y 5.10, donde existen diferencias entre los primeros dos puntos de LB histórica y la LB simulada, pero aún así las proyecciones producto de los GCMs muestran una tendencia a la baja de los caudales para estos periodos de retorno.

Esta situación difiere con lo propuesto por Lagos y Vargas (2013), donde se postula que producto de escenarios de cambio climático, a finales del siglo XXI, la crecida de 1000 años de la cuenca del embalse Puclaro aumentará en un 85 % respecto de la crecida de 1000 años obtenida con los datos actuales.

Luego en el estudio Lagos y Vargas (2014), refinan el estudio, incorporando el análisis de distintas combinaciones de periodo de retorno de precipitaciones y de altura de línea de nieves. Donde se llega a la conclusión de que en la crecida obtenida, mediante el método de hidrograma unitario sintético tipo Snyder, el efecto de la elevación de línea de nieves es tanto o más importante que el de la precipitación, dada su importancia en el área aportante pluvial para la crecida.

El común denominador en los estudios Lagos y Vargas (2013), Lagos y Vargas (2014) y este estudio es la dispersión de los datos. El método utilizado en los dos primeros estudios (HUS tipo Snyder) y en este estudio (Modelo TUW, concentrado) tienen mucho error, comparados con un modelo distribuido (ver Figura 6.1).

### 6.2.5. Función objetivo

Para tratar de mejorar los resultados de los índices de las cuencas con peor desempeño se probó cambiando la función objetivo. Las cuencas modeladas dos veces fueron CHN, GE y QRRE, usando el MSE y KGE como funciones objetivo.

La Figura 6.4 muestra el desempeño del modelo ante una calibración usando el MSE y luego el KGE como función objetivo (FO). El gráfico no muestra resultados concluyentes en cuanto a qué índice es mejor para la calibración que otro.

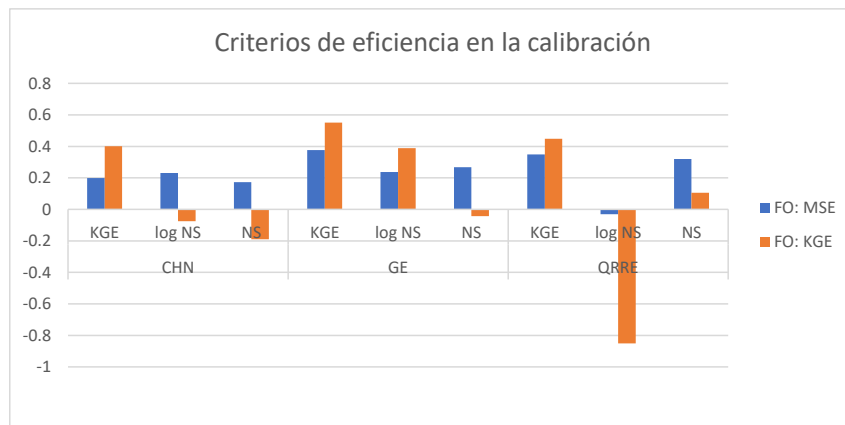


Figura 6.4: Comparación del uso del MSE y KGE como FO.

---

# CONCLUSIONES

---

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo se puede concluir lo siguiente:

Las curvas de duración dan información sobre la disponibilidad general del recurso hídrico. Al ver las cuencas que tienen mejor ajuste (PS, MH, YLAJSF, LAJC, CAJC y PP) se observa una disminución en todo el espectro de caudales. Todos los modelos indican una baja en los caudales, desde el modelo IPSL-CM5B-LR menos agresivo, al IPSL-CM5A-LR más agresivo. Esto afectará profundamente el sistema socio-económico chileno, donde el agua es indispensable para el sector productivo del país.

El KGE de las cuencas estudiadas en mayor profundidad fué de entre 0.5 a 0.8. El ajuste se puede ver en las diferencias entre los caudales de la Línea Base histórica y la Línea Base simulada. En todos los casos se tiene un ajuste aceptable en los caudales medios, es decir, con probabilidad de excedencia entre 0.2 y 0.8. Los caudales extremos son subestimados.

Los promedios de caudales medios diarios muestran la estacionalidad de las cuencas con mejor ajuste. Estas presentan un régimen marcadamente nival, exceptuando PS con régimen pluvial, con caudales máximos entre diciembre y febrero. Las proyecciones climáticas sugieren un cambio de estacionalidad, a un régimen pluvial o un régimen nivo-pluvial (para el modelo IPSL-CM5B-LR menos agresivo). Además la fecha del centroide temporal de los caudales presenta un adelantamiento. Esto tiene consecuencias en el sistema agrícola chileno, donde los derechos de agua son ocupados en la temporada de verano, justamente donde habrá un cambio en la disponibilidad de aguas. Dado el descenso en la disponibilidad de aguas en verano, la operación de embalses deberán considerar este nuevo escenario y restringir el uso de agua para riego.

Para los caudales de periodo de retorno alto existen diferencias entre la Línea Base histórica y la Línea Base simulada. Sin embargo, contrastando la Línea Base simulada con los escenarios de los GCMs se observa una baja en el periodo de verano y una baja menor y/o mantención (dependiendo del modelo) para el periodo de invierno. Esto quiere decir que las obras diseñadas para estos caudales estarán sobredimensionadas, además de que los eventos de mayor caudal ocurrirán en el periodo de invierno y no en verano en estas cuencas. Esta situación difiere con otros estudios, como Lagos y

---

Vargas (2013) y Lagos y Vargas (2014), en donde se llega a crecidas en el periodo futuro, producto del cambio climático, de entre 70-80 % mayores respecto de las crecidas de diseño en el caso del embalse Puclaro.

Finalmente, se recomienda realizar más estudios de cambio climático, tanto para diseño de obras hidráulicas, como para disponibilidad del recurso hídrico, ya que se tiene una alta dispersión de los resultados, que podría disminuirse usando datos de mejor calidad y/o modelos distribuidos. Estos estudios tendrían un gran impacto, debido a la importancia de la disponibilidad de agua para las actividades humanas y un diseño correcto y seguro de obras hidráulicas, para evitar así alguna falla, siempre pensando en la larga vida útil proyectada de ellas.

---

# REFERENCIAS

---

- [Alvarez-Garreton et al., 2017] Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P., Boisier, J. P., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Addor, N., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., and McPhee, J. (2017). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset, to be submitted to Hydrol. *Earth Syst. Sci. Discuss.*
- [Ardia et al., 2016] Ardia, D., Mullen, K. M., Peterson, B. G., and Ulrich, J. (2016). *DEoptim: Differential Evolution in R*. version 2.2-4.
- [Bergstrom, 1976] Bergstrom, S. (1976). Development and application of a conceptual runoff model for scandinavian catchments.
- [Chadwick et al., 2017] Chadwick, C., Gironás, J., Vicuña, S., Meza, F., and McPhee, J. (2017). Preanálisis de modelos de cambio climático para estudios hidrológicos. In *XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, UTFSM*. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.
- [Christensen et al., 2007] Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, R., Jones, R., Kolli, R. K., Kwon, W., Laprise, R., et al. (2007). Regional climate projections. In *Climate Change, 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, University Press, Cambridge, Chapter 11, pages 847–940.
- [CNR, 2013] CNR (2013). Consultoría telemetría en una cuenca piloto tercera sección del río aconcagua.
- [CORFO, 2018] CORFO (2018). Informe I: Plan de implementación Evaluación de proyecto de una carretera hídrica nacional - Fase 1: Inventario de la oferta y demanda de agua a lo largo de la geografía chilena, Santiago. Ejecutado por el Laboratorio de Análisis Territorial (LAT) de la Facultad de Ciencias Agronómicas y del Advanced Mining Technology Center (AMTC) de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.
- [Garreaud, 2013] Garreaud, R. (2013). Warm winter storms in central chile. *Journal of Hydrometeorology*, 14(5):1515–1534.

- [Kling et al., 2012] Kling, H., Fuchs, M., and Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424:264–277.
- [Krause et al., 2005] Krause, P., Boyle, D., and Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in geosciences*, 5:89–97.
- [Krellenberg and Hansjürgens, 2014] Krellenberg, K. and Hansjürgens, B. (2014). *Climate Adaptation Santiago*. Springer Science & Business Media.
- [Lagos and Vargas, 2011] Lagos, M. and Vargas, X. (2011). Variación de eventos extremos de precipitación diaria proyectados a mediados del siglo xxi, resultados en regiones de coquimbo y maule. In *XX Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, UTFSM*. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.
- [Migliavacca et al., 2015] Migliavacca, F., Confortola, G., Soncini, A., Senese, A., Diolaiuti, G. A., Smiraglia, C., Barcaza, G., and Bocchiola, D. (2015). Hydrology and potential climate changes in the rio maipo (chile). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 38(2):155–168.
- [MOP-DGA, 2003] MOP-DGA (2003). Evaluación de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río maipo.
- [MOP-DGA, 2015] MOP-DGA (2015). Atlas del agua: Chile 2016 [en línea]. / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. <http://www.dga.cl/atlasdelagua/Paginas/default.aspx>, [26-03-2018].
- [MOP-DGA, 2004a] MOP-DGA, C.-I. (2004a). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivo de calidad. *Cuenca del río Aconcagua. Santiago, Chile*.
- [MOP-DGA, 2004b] MOP-DGA, C.-I. (2004b). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivo de calidad. *Cuenca del río Maipo. Santiago, Chile*.
- [MOP-DGA, 2004c] MOP-DGA, C.-I. (2004c). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivo de calidad. *Cuenca del río Rapel. Santiago, Chile*.
- [Moss et al., 2010] Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., et al. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282):747–756.
- [Mu et al., 2011] Mu, Q., Zhao, M., and Running, S. W. (2011). Improvements to a modis global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 115(8):1781–1800.

- [Pachauri et al., 2014] Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q., Dasgupta, P., et al. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.
- [Palacios, 2006] Palacios, R. (2006). Matlab central, deg2utm routine.
- [Rioseco and Tesser, 2018] Rioseco, R. and Tesser, C. (2018). Cartografía interactiva de los climas de Chile [en línea]. Instituto de Geografía. Pontificia Universidad Católica de Chile. [www.uc.cl/sw\\_educ/geografia/cartografiainteractiva](http://www.uc.cl/sw_educ/geografia/cartografiainteractiva), [26-03-2018].
- [Seibert and Vis, 2012] Seibert, J. and Vis, M. (2012). Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9):3315.
- [Stocker, 2014] Stocker, T. (2014). *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- [Taylor et al., 2012] Taylor, K. E., Stouffer, R. J., and Meehl, G. A. (2012). An overview of cmip5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4):485–498.
- [Vargas et al., 2017] Vargas, X., McPhee, J., Gómez, T., and Saavedra, F. (2017). Análisis hidrológico del evento de abril de 2016 en el río mapocho. In *XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, UTFSM*. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.
- [Viglione and Parajka, 2016] Viglione, A. and Parajka, P. (2016). Tuv model: Lumped hydrological model for educational purposes. *Version 0.1-8*.

---

## Apéndice A

---

# RELACIONES ETP VS TEMPERATURA

A continuación, se muestran la relación entre la evapotranspiración potencial y la temperatura, usadas para extrapolar la ETP donde no existen datos. En cada Figura se muestra una curva polinomial  $y$  que ajusta la relación y el coeficiente  $R^2$  que corresponde al coeficiente de determinación.

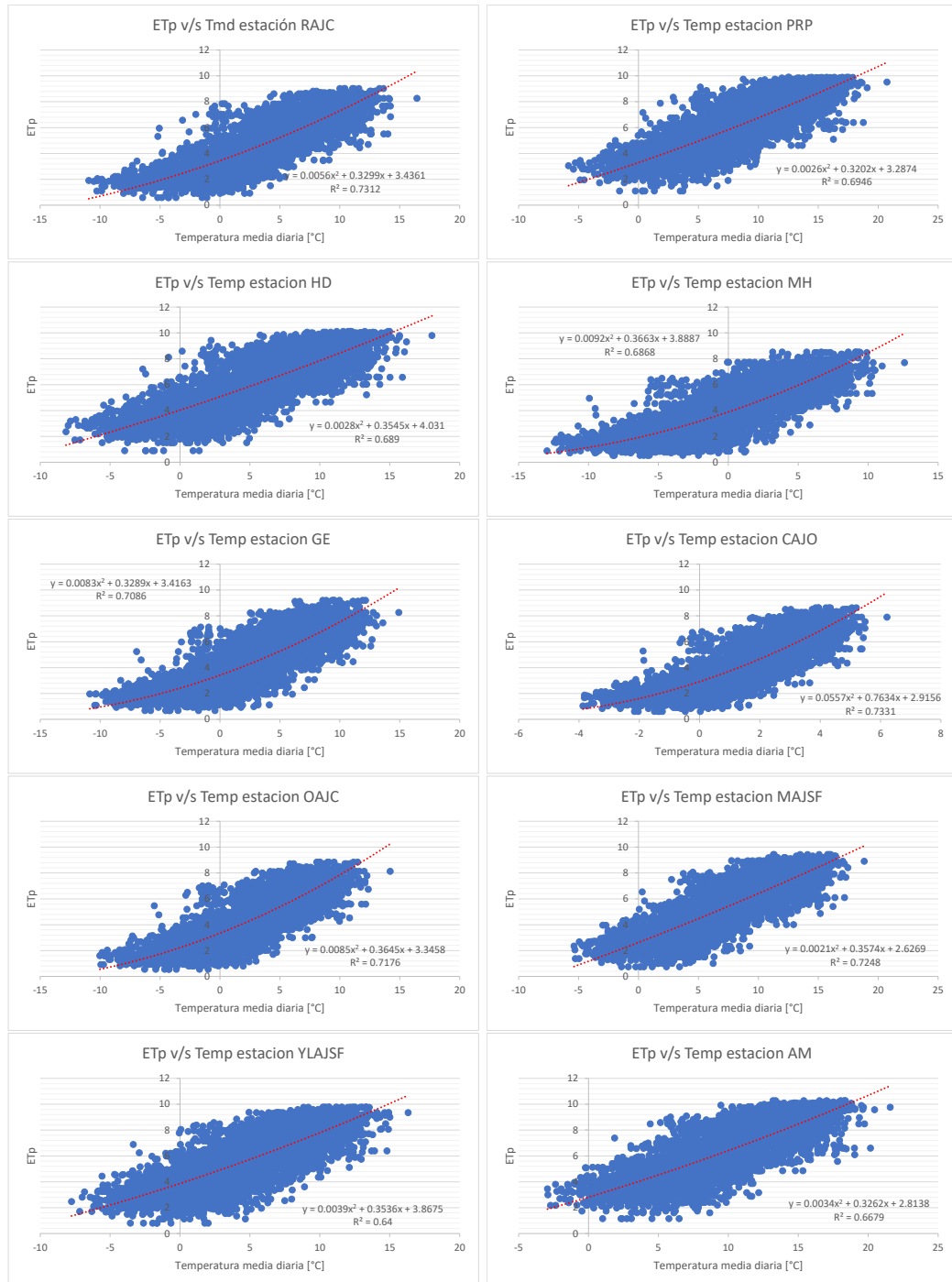


Figura A.1: Relaciones ETp vs temperatura de las estaciones en estudio.

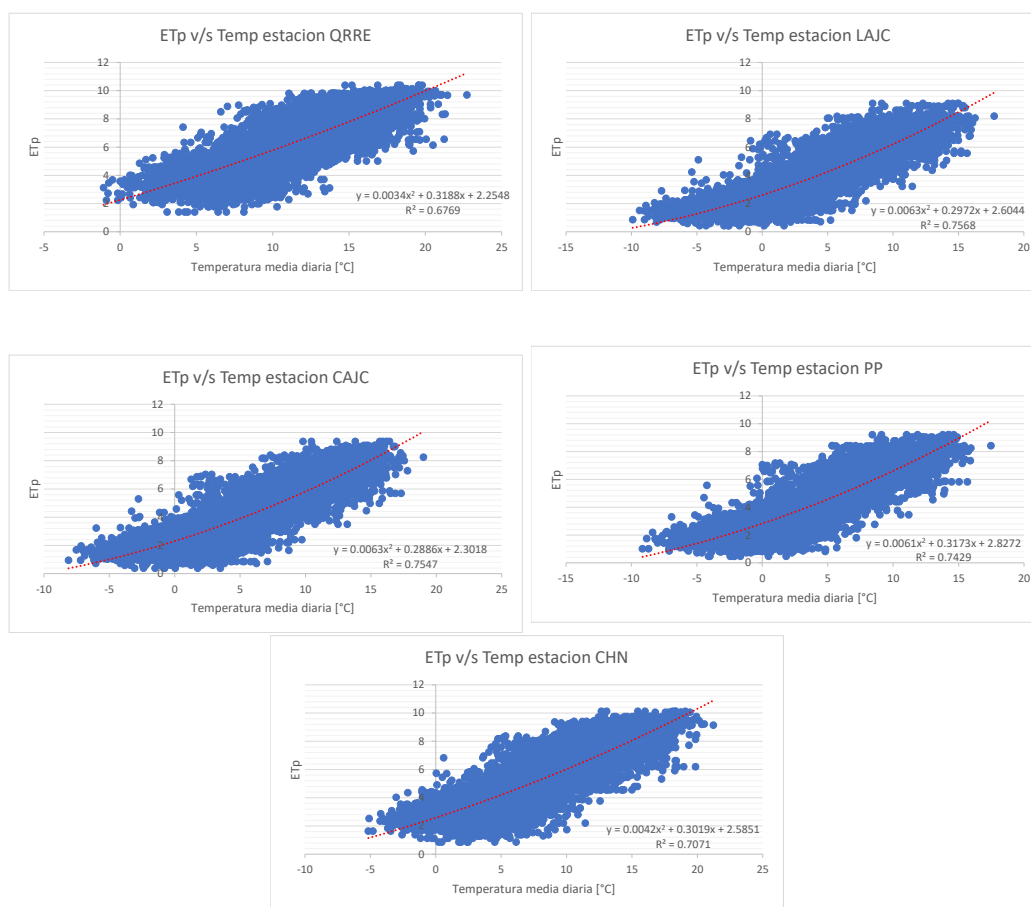


Figura A.2: Relaciones ETP vs temperatura de las estaciones en estudio.

---

# Apéndice B

---

## DELTAS GCM

A continuación, se muestran los deltas de precipitación y temperatura de los 5 GCMs usados en este estudio. Los deltas son obtenidos de la diferencia entre el promedio de temperatura y precipitación medias diarias de cada mes, en la situación futura (2071-2100) y la situación histórica (1979-2005).

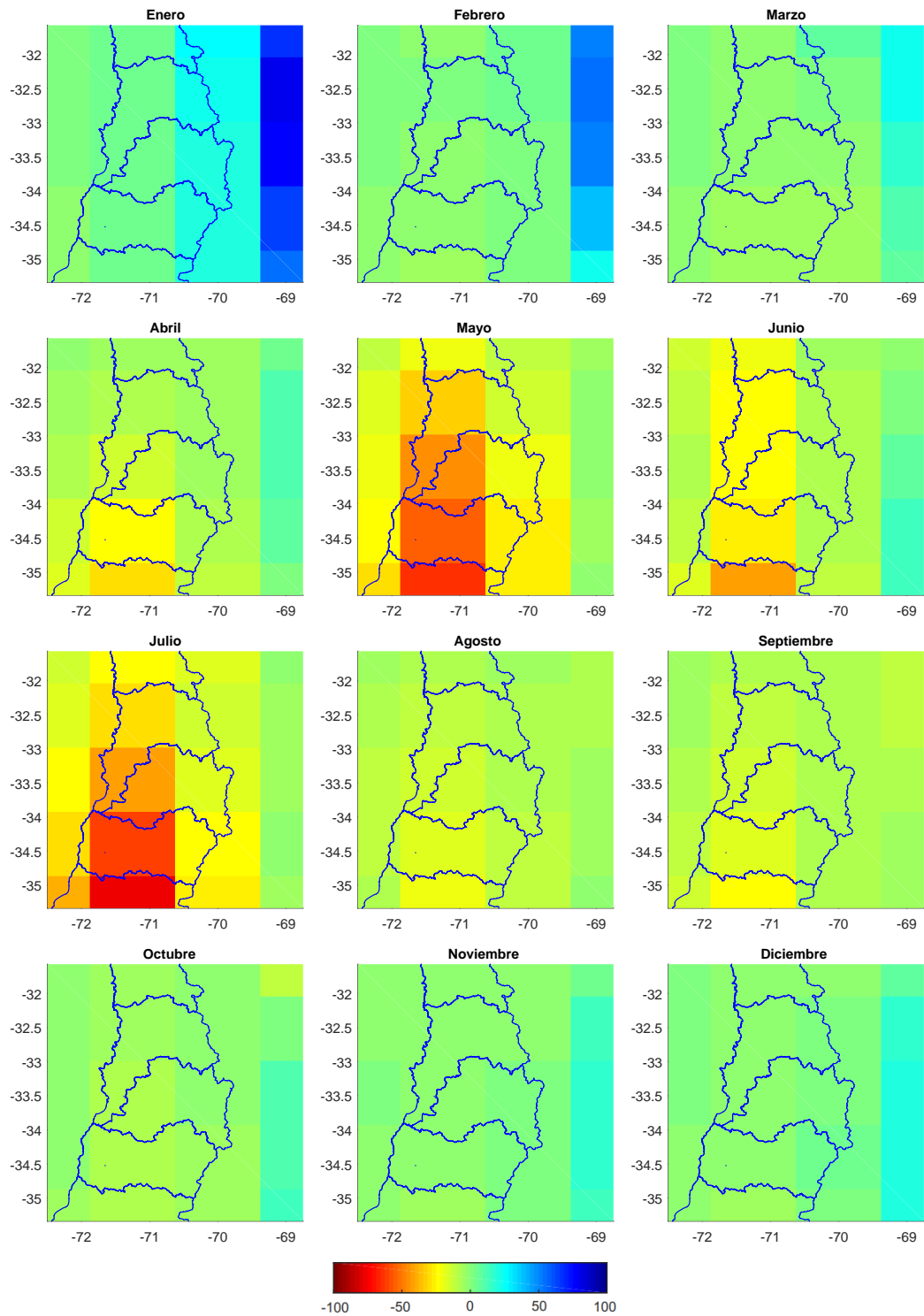


Figura B.1: Deltas de precipitaciones acumuladas mensuales en mm del modelo CCSM4.

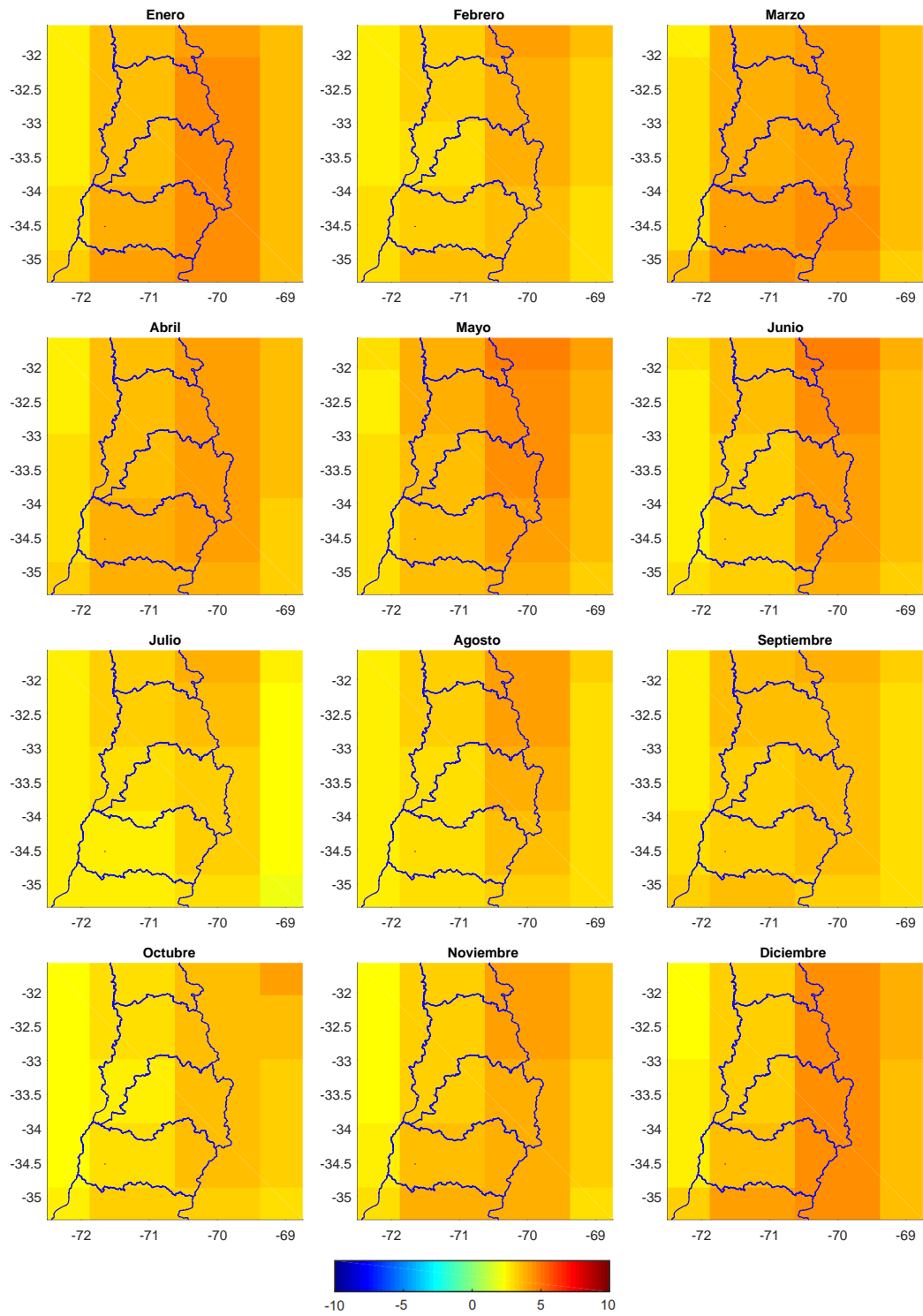


Figura B.2: Deltas de temperatura media diaria en °C del modelo CCSM4.

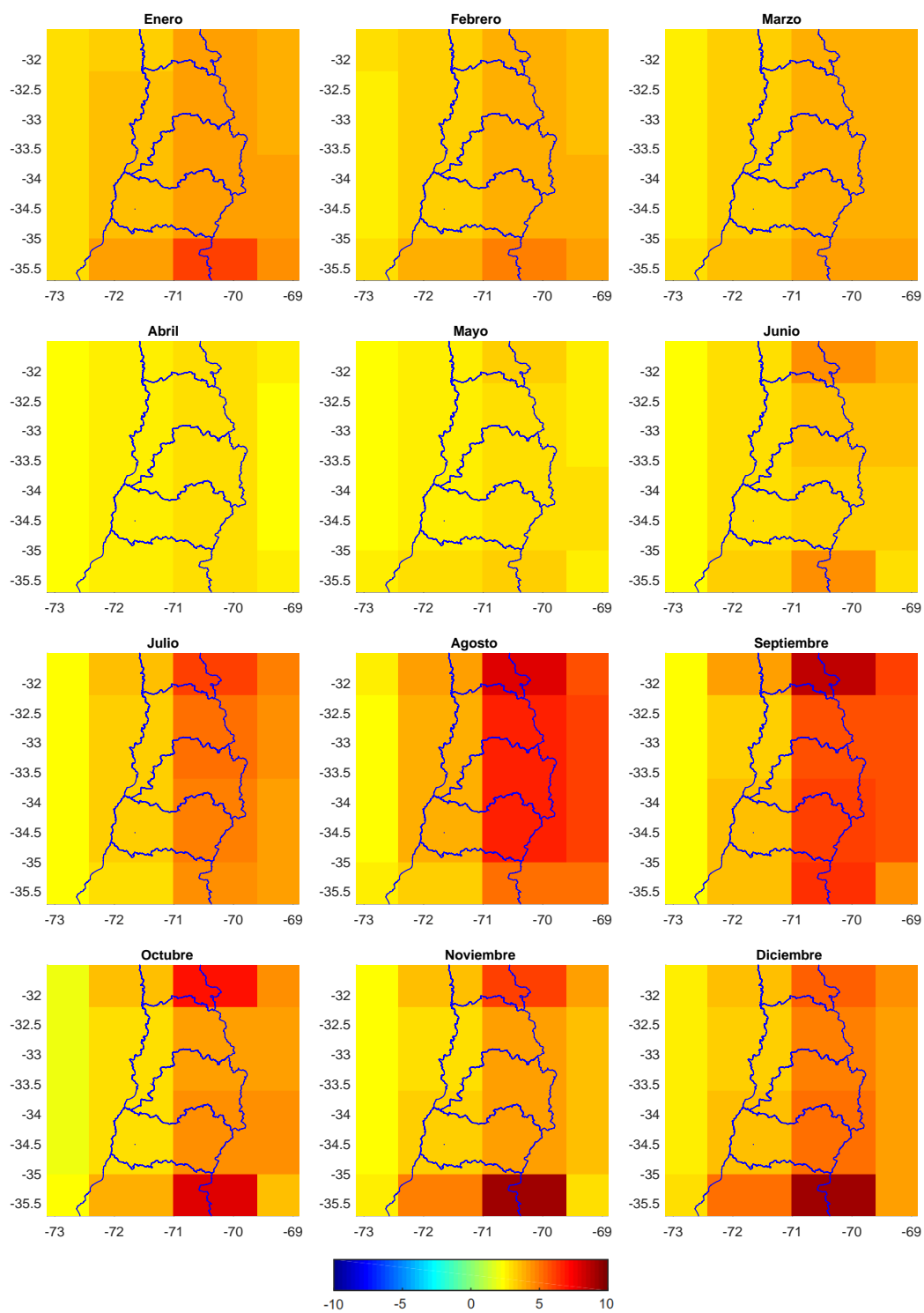


Figura B.3: Deltas de temperatura media diaria en °C del modelo CNRM-CM5.

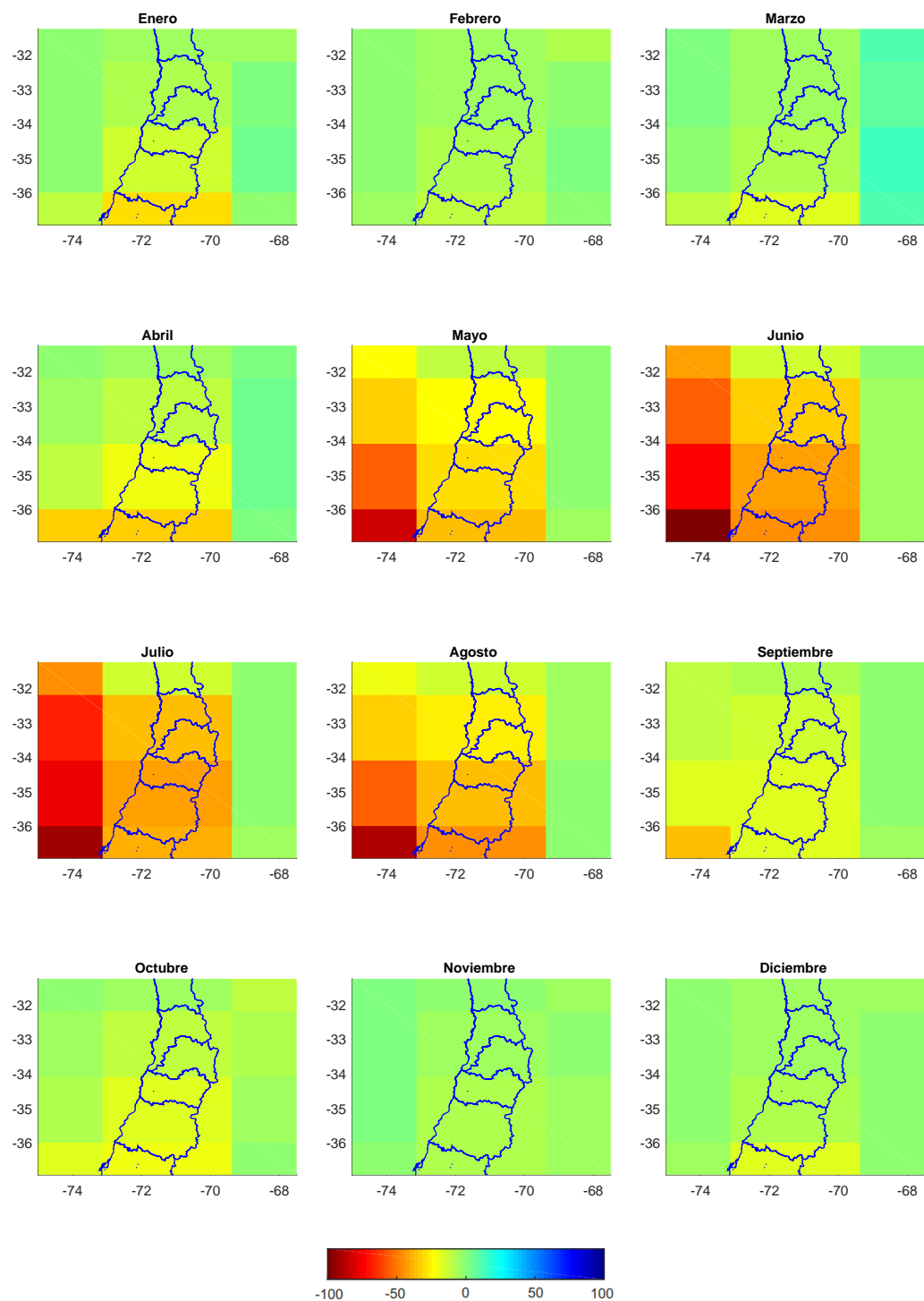


Figura B.4: Deltas de precipitaciones acumuladas mensuales en mm del modelo IPSL-CM5A-LR.

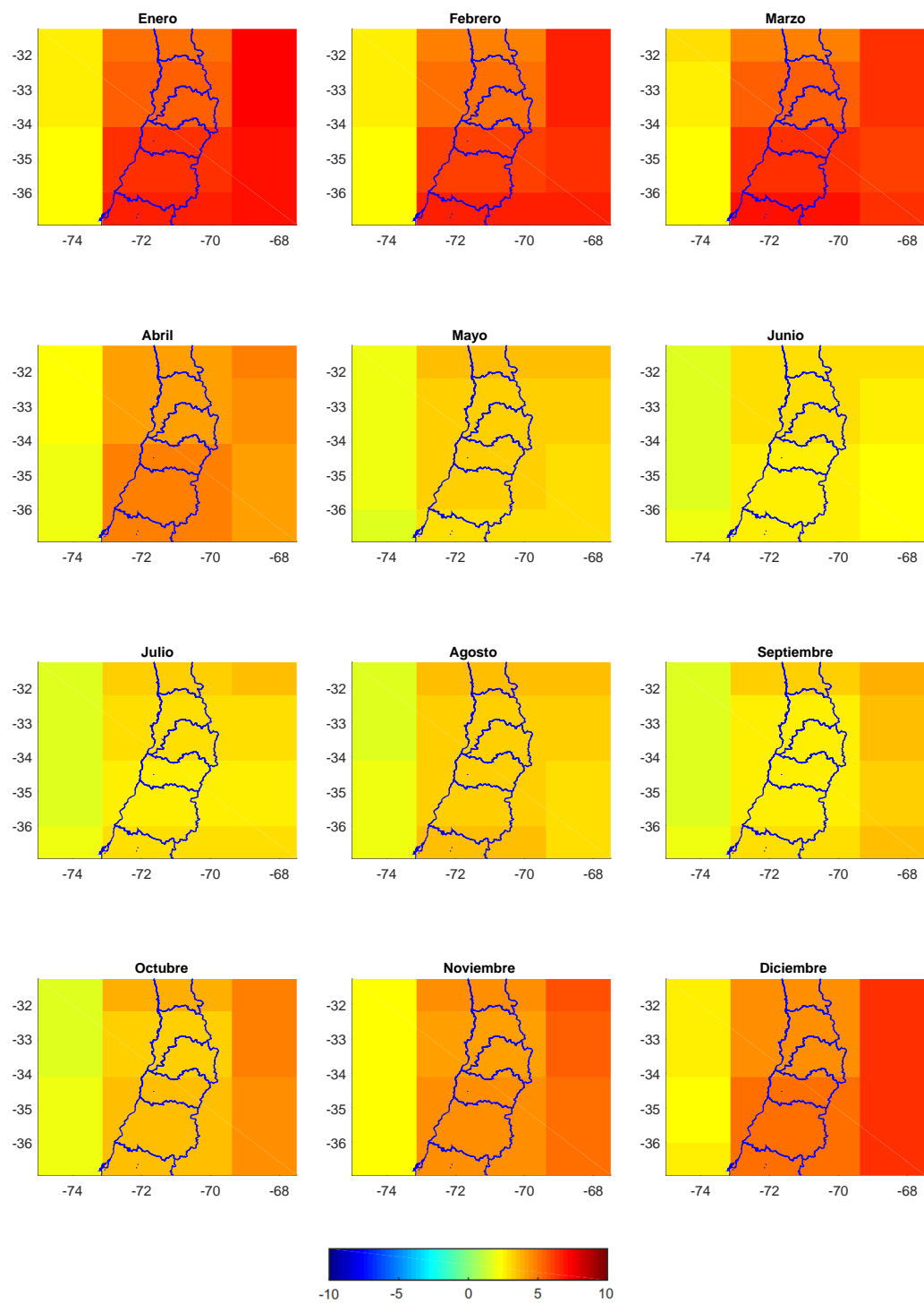


Figura B.5: Deltas de temperatura media diaria en °C del modelo IPSL-CM5A-LR.

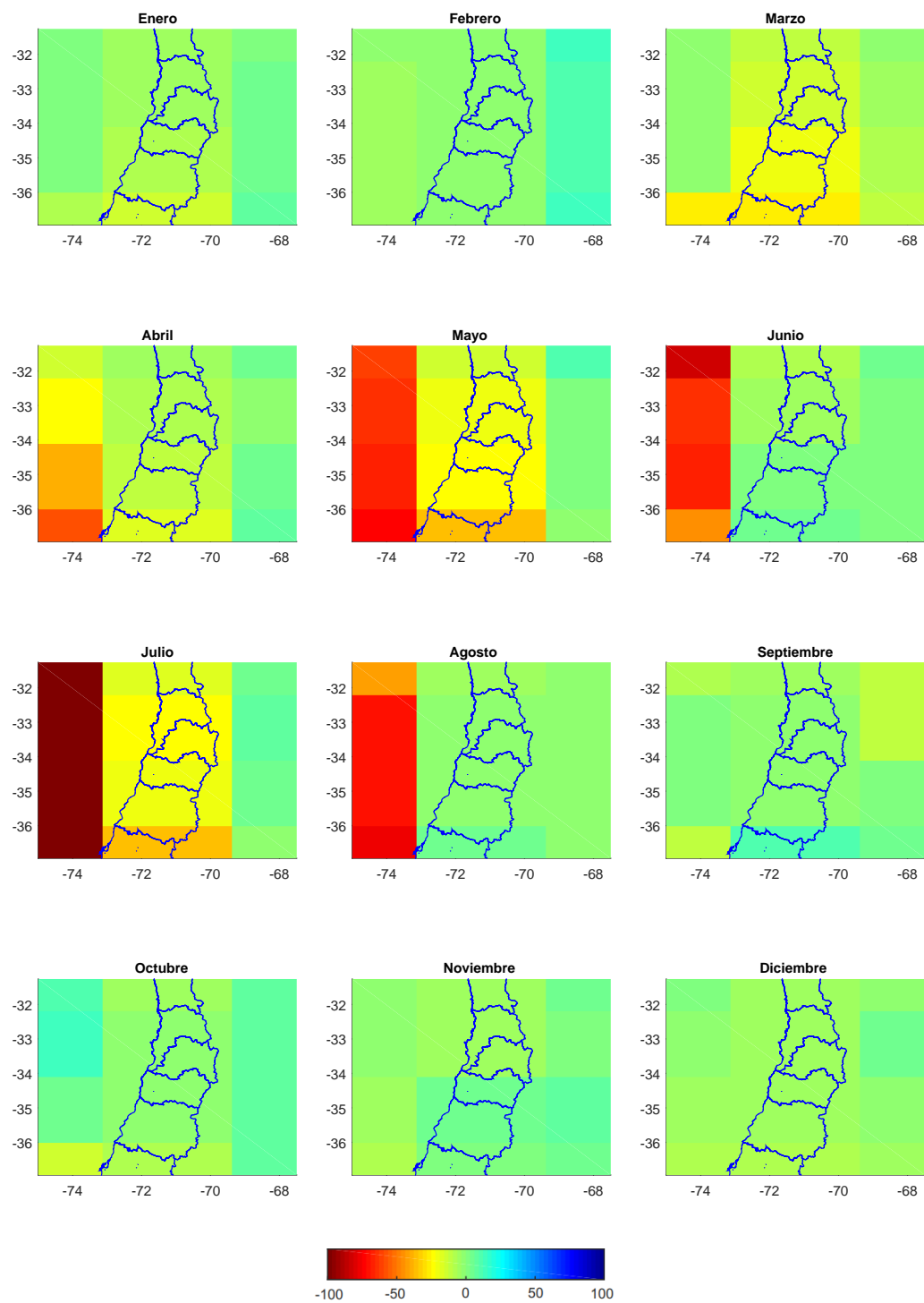


Figura B.6: Deltas de precipitaciones acumuladas mensuales en mm del modelo IPSL-CM5B-LR.

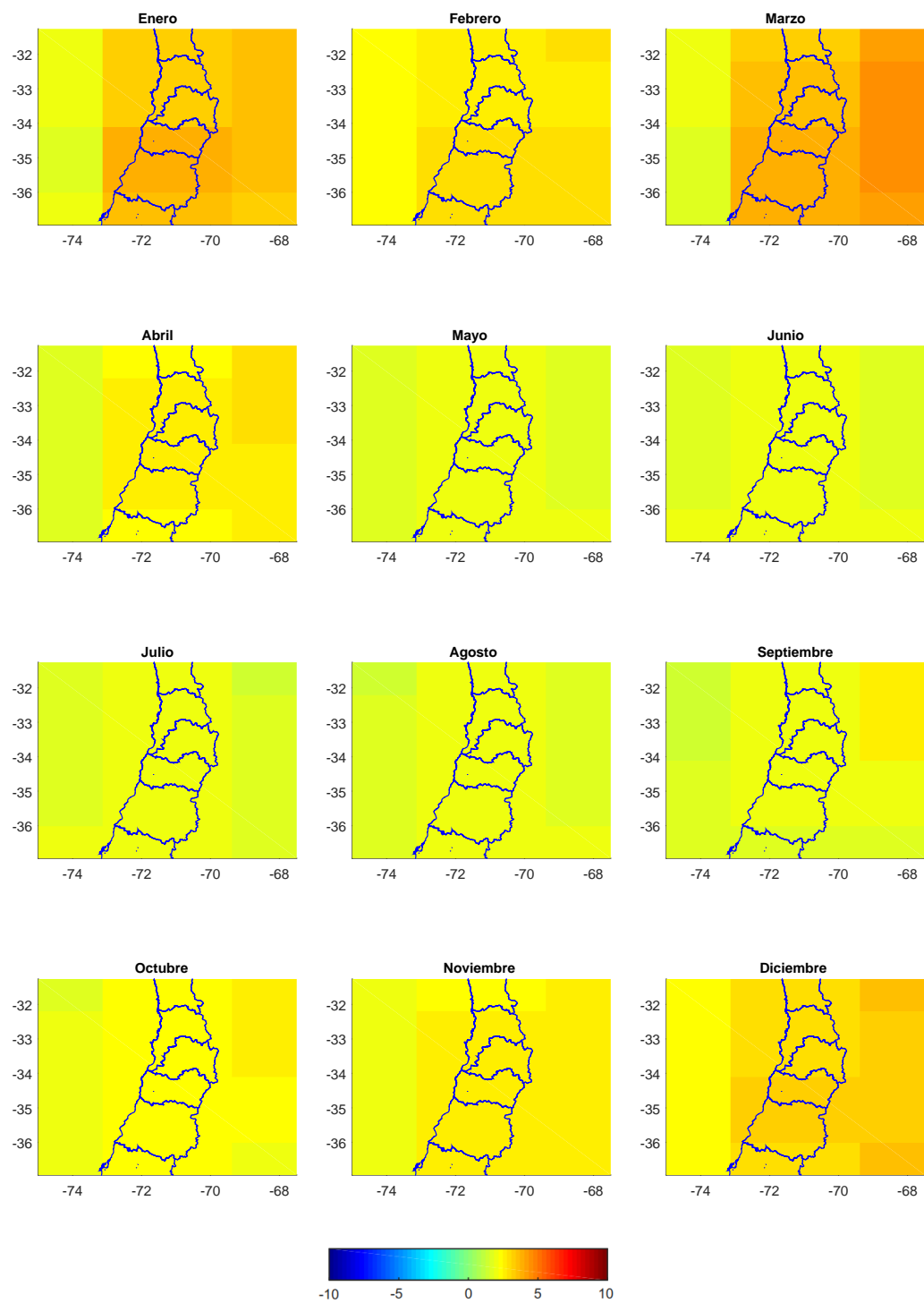


Figura B.7: Deltas de temperatura media diaria en °C del modelo IPSL-CM5B-LR.

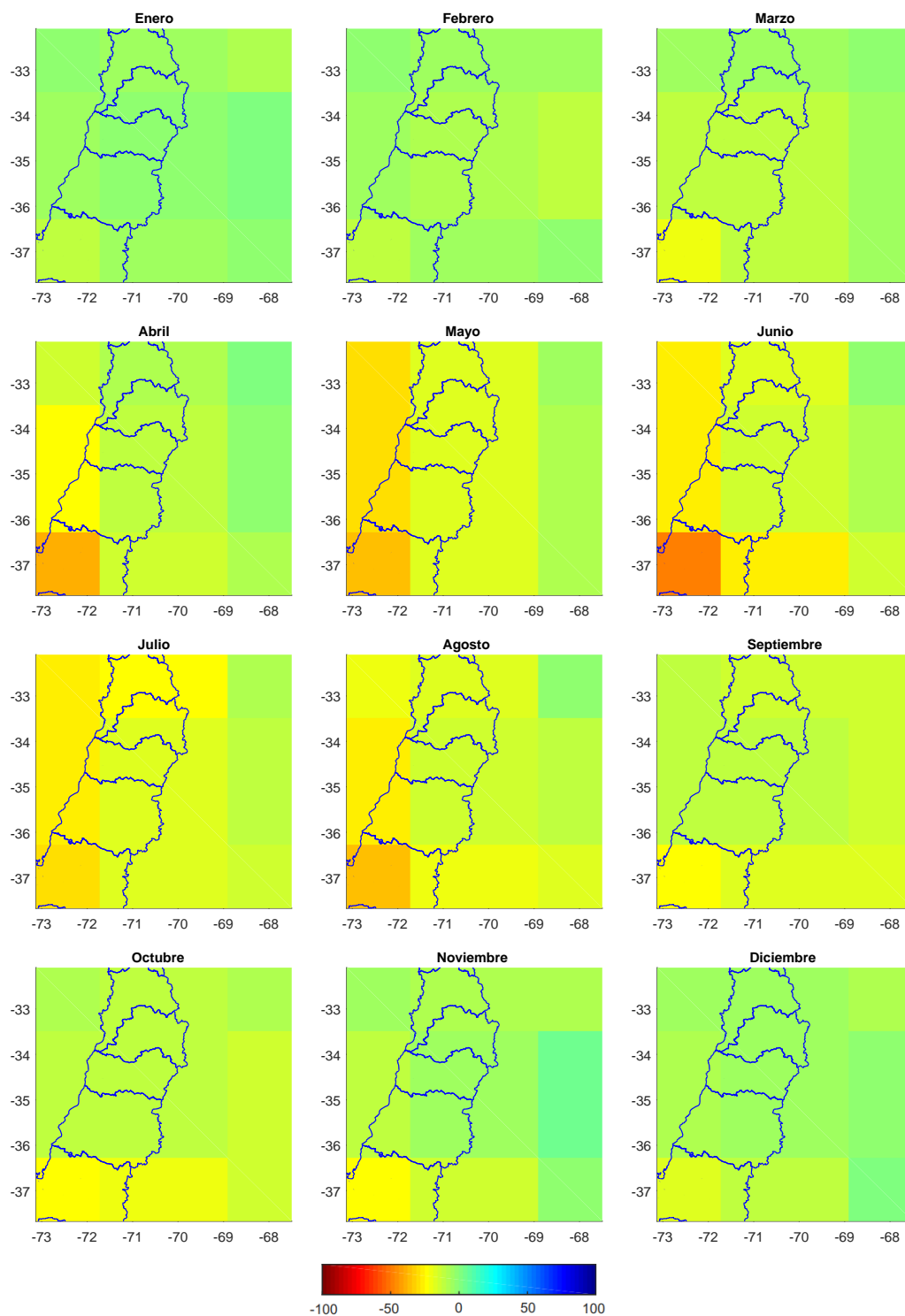


Figura B.8: Deltas de precipitaciones acumuladas mensuales en mm del modelo MIROC-ESM.

---

# Apéndice C

---

## CALIBRACIÓN

A continuación, se muestran los resultados restantes de la calibración de las estaciones, con su valor de NSE.

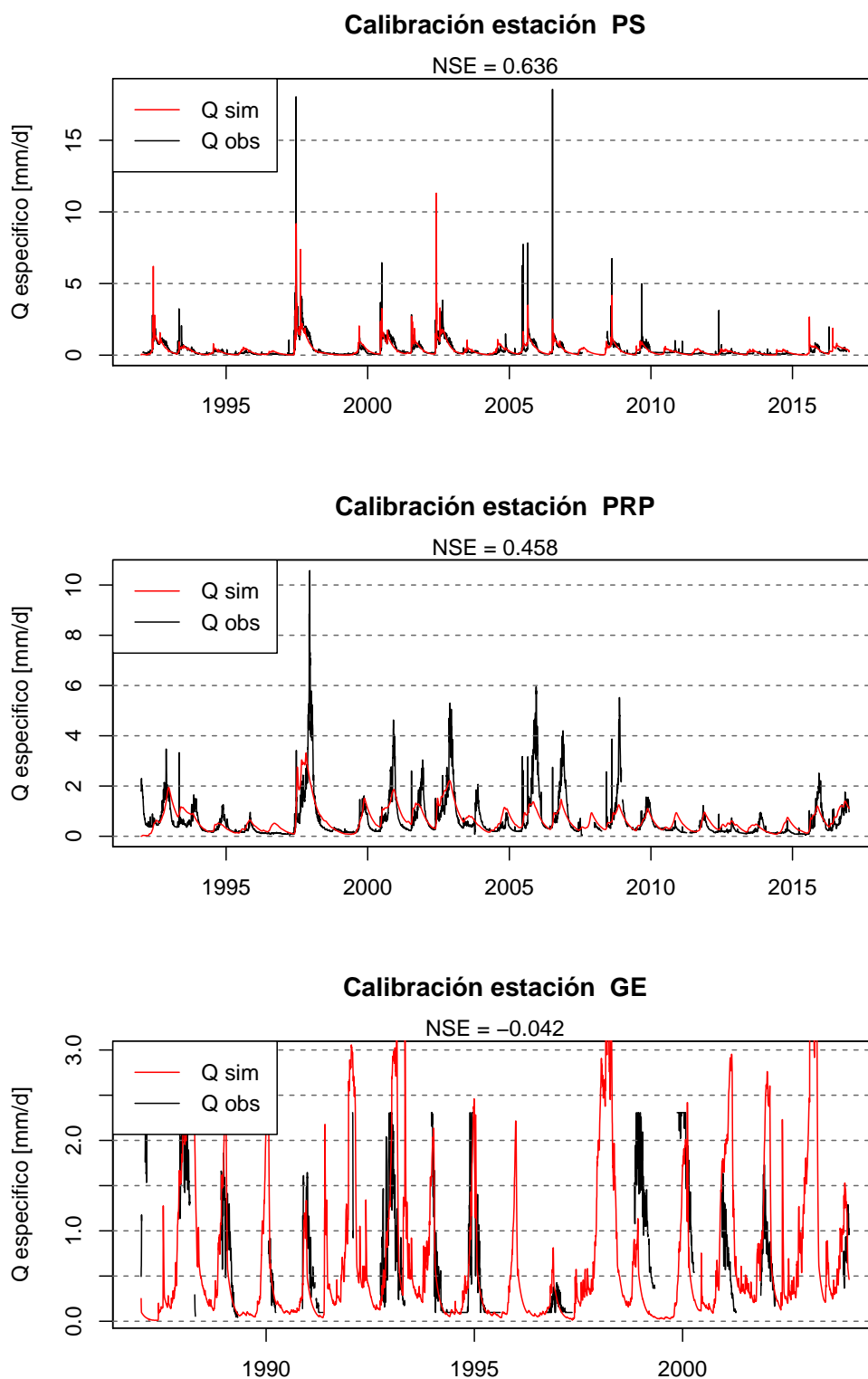


Figura C.1: Resultados del proceso de calibración.

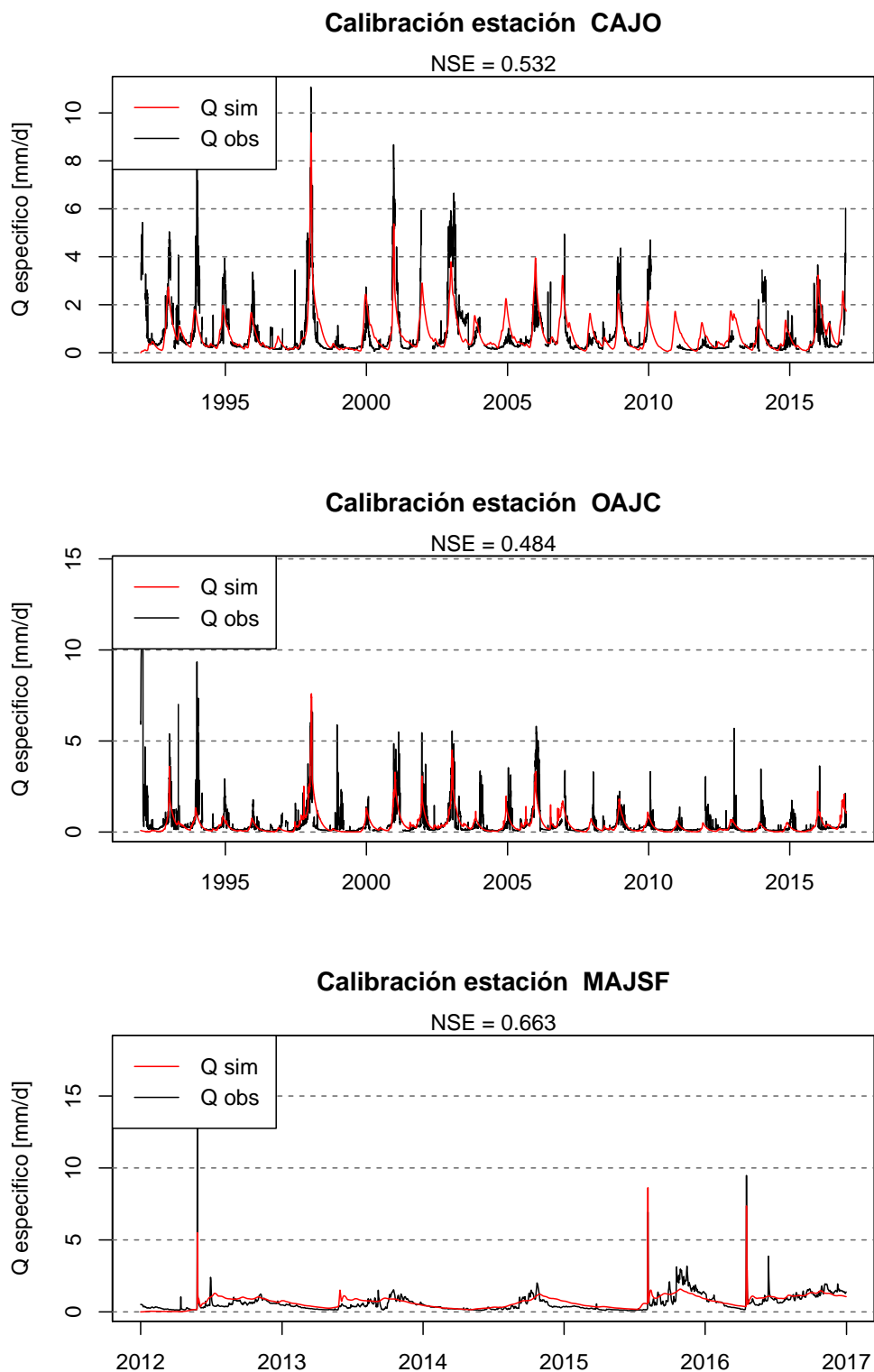


Figura C.2: Resultados del proceso de calibración.

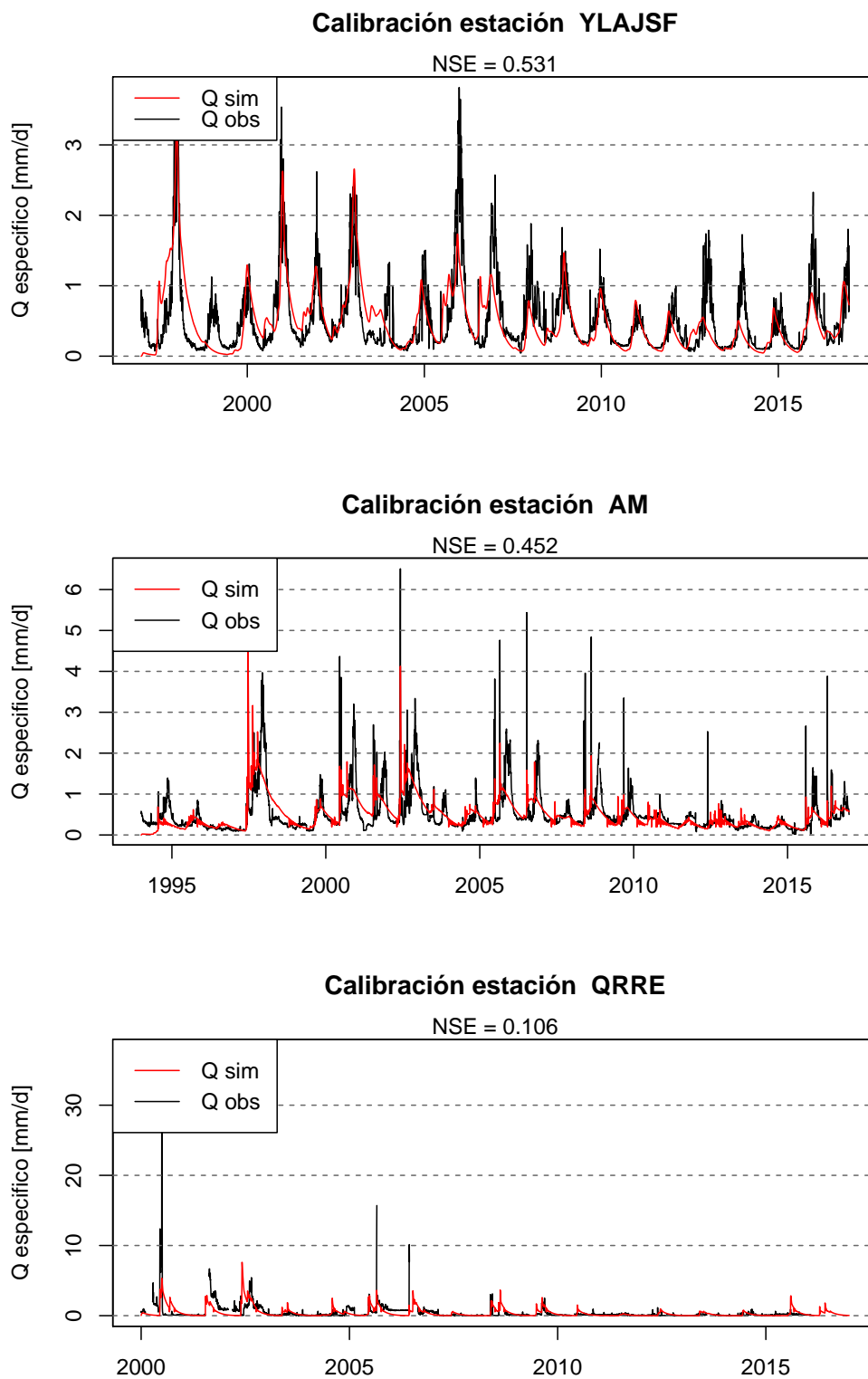


Figura C.3: Resultados del proceso de calibración.

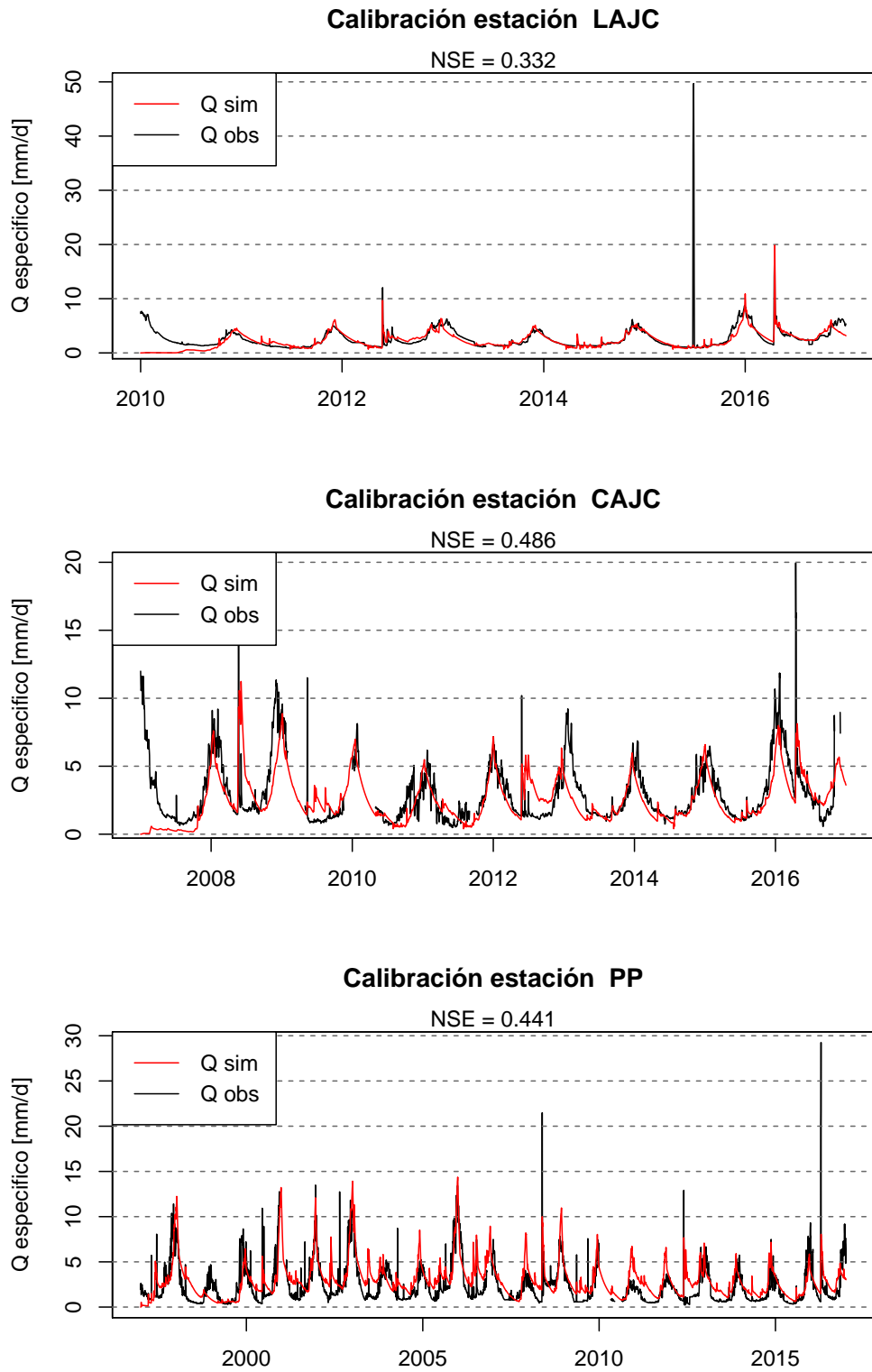


Figura C.4: Resultados del proceso de calibración.

---

# Apéndice D

---

## VALIDACIÓN

A continuación, se muestran los resultados restantes de la validación de las estaciones, con su valor de NSE.

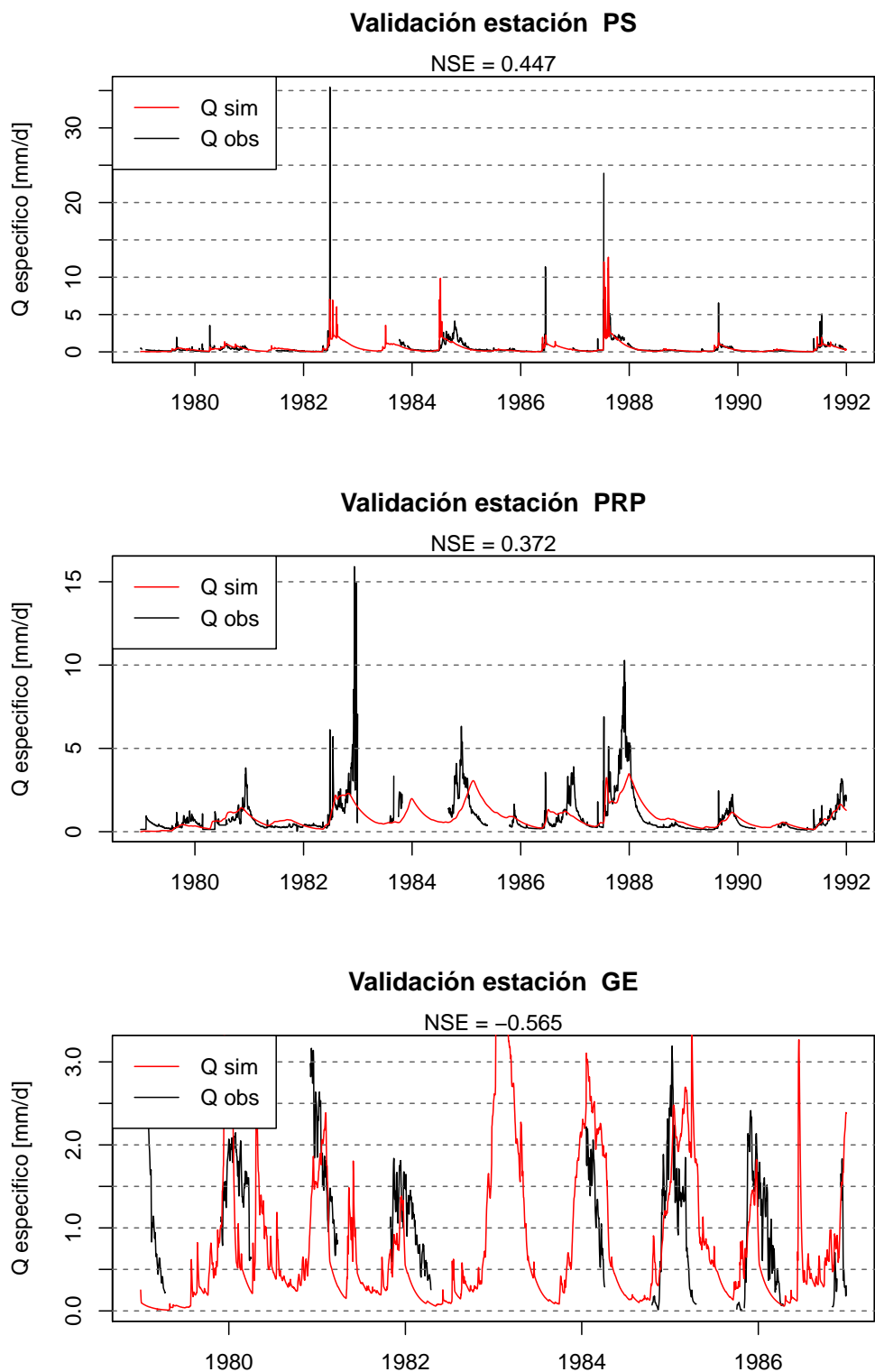


Figura D.1: Resultados del proceso de validación.

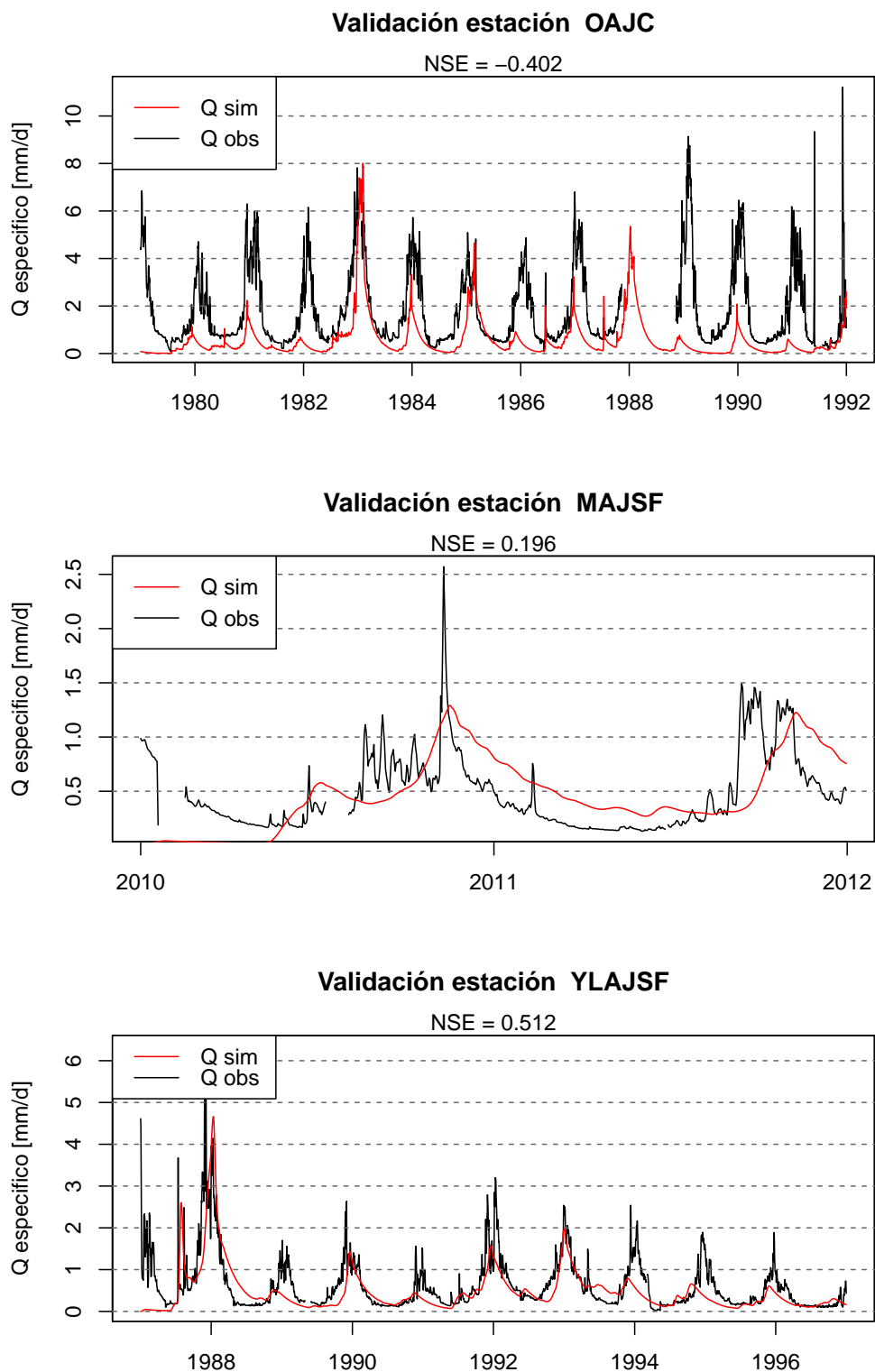


Figura D.2: Resultados del proceso de validación.

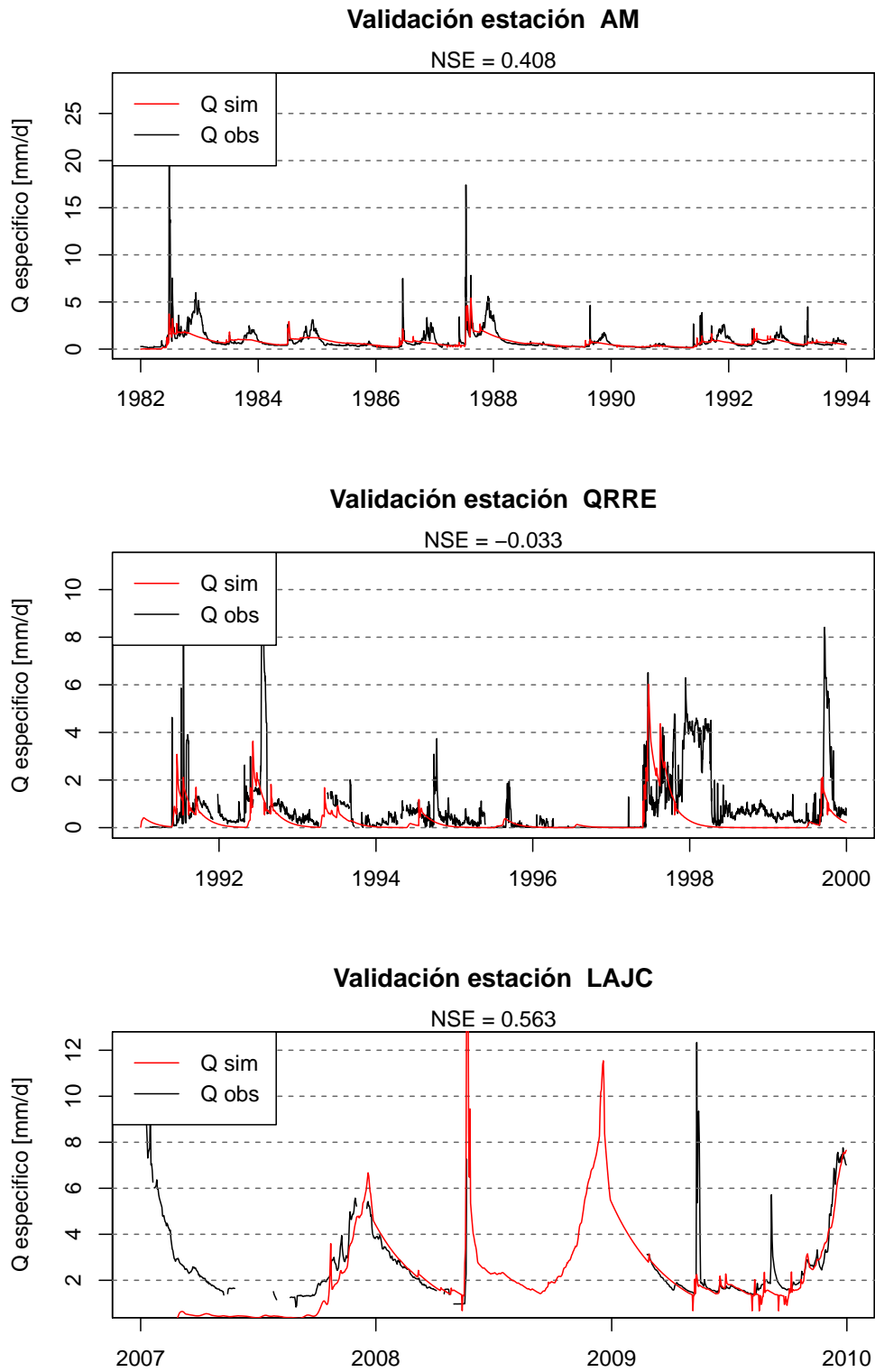


Figura D.3: Resultados del proceso de validación.

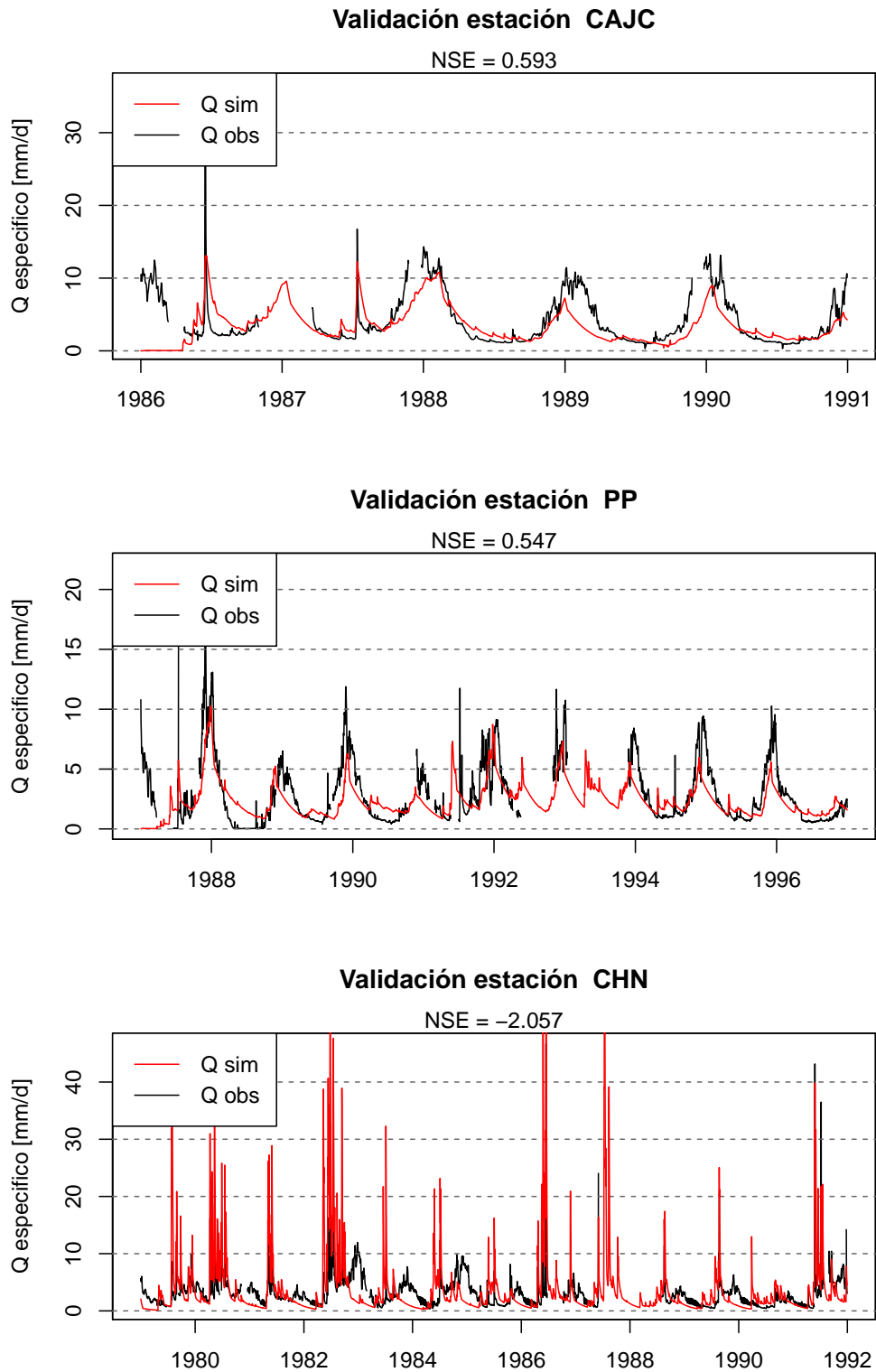


Figura D.4: Resultados del proceso de validación.