

# Análisis de la Estadística Hidrológica utilizada en los procesos de la Comisión Nacional de Energía

## Informe Final

31 de marzo 2020

Preparado por:



**meteodata**  
Especialistas en Meteorología y Calidad del Aire

## Tabla de contenidos

1	Introducción	4
1.1	Objetivos del estudio	5
1.2	Contenidos de este informe	5
2	Selección de puntos de control y cuencas	6
2.1	Cuencas escogidas	7
2.1.1	Cuenca río Rapel	9
2.1.2	Cuenca río Maule	11
2.1.2.1	Afluentes río Melado	11
2.1.2.2	Laguna Invernada	13
2.1.2.3	Afluentes Laguna del Maule	15
2.1.2.4	Hoya intermedia de Pehuenche	16
2.1.2.5	Hoya intermedia de Colbún	17
2.1.3	Cuenca del río Laja	20
2.1.3.1	Afluentes Laguna del Laja	20
2.1.3.2	Polcura en bocatoma central Antuco	22
2.1.4	Cuenca del río Biobío	23
2.1.4.1	Afluentes embalse Ralco	23
2.1.4.2	Afluentes río Huequecura	25
2.1.4.3	Afluentes cuenca intermedia Angostura	26
2.1.5	Cuenca del río Pullinque	28
2.1.6	Cuenca de la central Canutillar	30
3	Planteamiento de Metodología de trabajo	32
3.1	Descripción metodológica general	32
3.2	Modelación Hidrológica	34
3.2.1	Forzantes Meteorológicas y fuentes de información complementarias	35
3.2.2	Modelo VIC	35
3.2.3	Proceso de Calibración	38
3.2.4	Selección final de parámetros	40
3.3	Proyecciones Meteorológicas	45
3.3.1	Escenarios de Cambio Climático	45
3.3.2	Escalamiento estadístico	47
3.4	Proyecciones Hidrológicas	52
4	Análisis de Hidrología presente/pasada (1960-2017)	56
4.1	Revisión bibliográfica de variabilidad natural interdecadal	56

4.2	Efectos del cambio climático y variabilidad natural en estadística histórica	57
4.3	Simulaciones hidrológicas para el siglo XX	61
5	Análisis de proyecciones hidrológicas	65
5.1	Validación de los resultados de las simulaciones para periodo histórico	65
5.2	Descripción generalizada de resultados	67
5.3	Análisis por cuenca	68
5.3.1	Rapel	70
5.3.2	Hoya intermedia Colbún	72
5.3.3	Hoya intermedia Pehuenche	72
5.3.4	Embalse Melado	75
5.3.5	Laguna Invernada	75
5.3.6	Laguna Maule	78
5.3.7	Antuco	78
5.3.8	Laguna Laja	81
5.3.9	Ralco	81
5.3.10	Huequecura	84
5.3.11	Angostura	84
5.3.12	Pullinque	84
5.3.13	Canutillar	88
5.4	Formato de entrega de la información	90
6	Generalización de la metodología a todos los puntos de interés	92
6.1	Preselección de puntos a calibrar	92
6.2	Metodología alternativa propuesta	94
6.3	Cuencas modeladas	96
6.4	Cuencas con metodología alternativa	102
6.5	Resumen	105
7	Conclusiones y recomendaciones	106
8	Referencias	110
9	Anexos	114
	Resultados del proceso de calibración	114

## 1 Introducción

El presente informe se enmarca en el desarrollo del proyecto “Análisis de la Estadística Hidrológica utilizada en los procesos de la Comisión Nacional de Energía” (CNE), cuyo objetivo es realizar una revisión de la base de datos estadística de hidrología con la que actualmente opera la CNE. La motivación para realizar este estudio surge de cuestionamientos a la validez de la información hidrológica histórica en un contexto de cambio climático. En el contexto reciente de la megasequía, muchas dudas han surgido respecto a la validez de la información que se dispone actualmente, aludiendo también a influencia de otro fenómeno muy presente actualmente, el cambio climático. Sin embargo, usualmente se tiende a olvidar que adicionalmente a posibles efectos de cambio climático, el clima también presenta una variabilidad interna natural, que se encuentra muy pobremente documentada, debido a los largos periodos de información que se requieren para estudiarla. Algunos esfuerzos notables son, por ejemplo:

- En [1], a través de proxies paleo climáticos<sup>1</sup> se estudia la variabilidad natural de las precipitaciones en la Patagonia, asociada a cambios en el régimen de circulación atmosférica de vientos,
- [2], donde se estudia la variabilidad de la precipitación en el norte de Chile durante los últimos 40 años, lo cual resulta de particular dificultad debido al régimen principalmente asociado a procesos convectivos que presentan y,
- [3], en particular, cuantifica separadamente el efecto del cambio climático y de la variabilidad natural. Cerca de la mitad de la tendencia en el descenso de las precipitaciones en Chile central es asociada a la variabilidad climática natural, representada por fenómenos atmosféricos de gran escala y baja frecuencia como la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO). Solo un cuarto de la tendencia al descenso de las precipitaciones se encuentra asociada directamente a efectos antropogénicos. Dicho esto, la influencia que puede tener la superposición de los efectos de la variabilidad natural con el fenómeno de cambio climático, resulta una materia de estudio crítica en la planificación de los recursos hídricos.

Considerando lo anterior, surge la inquietud desde la CNE de realizar un estudio que permita identificar y cuantificar la influencia de estos fenómenos, así como también evaluar la validez de la información con que se cuenta (estadística hidrológica), como insumo para los estudios que consideren periodos futuros. Así mismo, en el caso de que se identificara que dicha información ya no resulta válida, surge entonces la necesidad de desarrollar una nueva base de información sobre la que apoyarse en la planificación.

---

<sup>1</sup> Un proxy paleo climático hace referencia a algún tipo de registro como por ejemplo anillos de árboles o acumulaciones de sedimento, los cuales entregan información sobre las condiciones climáticas en un periodo de tiempo superior a un siglo.

## 1.1 Objetivos del estudio

### Objetivo General

El objetivo general es analizar la representatividad de las hidrologías utilizadas en los modelos de planificación utilizados en la CNE, considerando el impacto de la variabilidad natural y el impacto proyectado por el cambio climático.

### Objetivos Específicos

- a) Analizar los efectos del cambio climático y la variabilidad natural de los caudales representados en la información estadística hidrológica utilizada en los modelos de planificación.
- b) Analizar la representatividad de la estadística hidrológica disponible, determinando las hidrologías que se recomienda utilizar en los procesos de planificación.
- c) Definir una metodología que permita determinar la información estadística a utilizar en los modelos de planificación a medida que se dispone de un mayor volumen de información.

## 1.2 Contenidos de este informe

El presente documento consiste en el planteamiento y desarrollo de una metodología piloto sobre puntos de control seleccionados cuyo fin corresponde a obtener información de la estadística hidrológica en dichas ubicaciones considerando los efectos del cambio climático.

En el capítulo 2, se presenta la selección de los puntos de control que definen las cuencas sobre las que se desarrolla este estudio, así como las razones por las cuales fueron elegidas como representativas.

En el capítulo 3, se plantea la metodología de trabajo a aplicar. Se describen las distintas componentes que componen la metodología, entre las que se incluyen: un proceso de modelación hidrológica a desarrollar para cada una de las cuencas en estudio, la preparación de información de forzantes meteorológicas para el periodo 2020-2050, y ejemplos de la aplicación de dichas forzantes en conjunto con los modelos hidrológicos.

En el capítulo 4 se revisa y estudia todo lo referente a la información hidrológica del periodo histórico comprendido por los años donde se cuenta con información en la estadística hidrológica. Se pone especial énfasis en revisar la variabilidad natural de las series, para lo cual se busca apoyo también en herramientas de modelación que permiten extender el registro histórico hasta comienzos del siglo XX.

En el capítulo 5, se analizan las proyecciones de información fluviométrica obtenidas de aplicar la metodología propuesta. En una primera parte, el enfoque se lleva a validar los resultados, y revisarlos desde una perspectiva general, para luego llevar la discusión a puntos específicos definidos cuenca por cuenca

Finalmente, en el capítulo 6, se presentan las conclusiones y recomendaciones que surgen como fruto de este estudio.

## 2 Selección de puntos de control y cuencas

Para el desarrollo del presente estudio, la CNE dispuso de las estadísticas mensuales de caudales asociadas a diferentes cuencas y/o centrales Hidroeléctricas del país. Las estadísticas de caudal corresponden a valores de caudal promedio, habiendo un total de cuatro valores por mes (aproximadamente un valor por semana). Los registros de este tipo se encuentran disponibles entre abril del año 1960 y marzo de 2018, proviniendo del Coordinador Eléctrico Nacional (en adelante Coordinador).

Debido a que se busca utilizar información semanal de buena calidad para comprender la variabilidad de los caudales, es necesario realizar previamente una revisión de las estadísticas de caudal manejadas. Esta revisión conlleva a la selección de las cuencas que son de mayor provecho para el estudio. Para esto, es necesario realizar un proceso de selección de las cuencas, cumpliendo con un cierto proceso de **control de calidad**. Se aplicarán las siguientes medidas, como control de la calidad de los datos asociados a la información fluviométricas de las cuencas:

1. **Relevancia de la cuenca o punto de control:** desde el punto de vista de la hidroelectricidad, la relevancia de un punto de control está asociada a su capacidad de generación eléctrica y la capacidad de embalsamiento de agua. En este estudio se consideran solo centrales que tienen una potencia instalada de generación igual o superior a 50 MW, o presencia de un embalse.
2. **Datos constantes:** las estadísticas que presenten datos constantes, ya sea durante un periodo prolongado o valores semanales repetidos a nivel mensual, son descartadas del análisis.
3. **Datos repetidos de forma periódica:** en ocasiones, las estadísticas poseen valores que se repiten de forma cíclica (generalmente con periodo de un año), los que pueden estar asociados al comportamiento promedio de la cuenca a lo largo de los meses. En la práctica, esta información no sirve para evaluar la variabilidad del caudal, porque no representan el valor real del caudal observado. Debido a lo anterior, los registros de este tipo son descartados.
4. **Inconsistencia entre periodos de información:** cambios notorios en caudales, como modificación de su línea de base o periodos con información demasiado disímil, también son considerados como motivo para descartar información.

5. **Registros ruidosos:** los caudales que presenten variabilidad intersemanal (entre semanas) demasiado acusada, en especial en periodos posteriores a crecidas, son descartados. Esto se debe a que la disminución de los caudales en régimen natural por lo general presenta un decaimiento suave.
6. **Registros truncados:** similar a lo anterior, los registros que presentan truncamiento no pueden corresponder a un régimen natural de caudales, por lo que son desechados.
7. **Caudal no físico o con variabilidad no natural:** son descartados además estadísticas de caudal que posean valores de caudal negativos, cercanos a 0 m<sup>3</sup>/s, o que no presenten variabilidad de tipo interanual esperada (por ejemplo: una reducción del caudal en los últimos años producto de la sequía).

## 2.1 Cuencas escogidas

El desarrollo de una metodología que permita evaluar la representatividad para periodos futuros de las series de estadística hidrológica con que se cuenta es un procedimiento que debe hacerse con un gran nivel de detalle, por lo cual no resulta factible realizar este proceso considerando todos los puntos de control válidos incorporados dentro de la red de la CNE. En función de esto, se plantea seleccionar un subconjunto de puntos de control que resulten representativos de las variadas características definidas en todos los puntos de interés. Se plantea por tanto en este documento todos los procedimientos que eventualmente serán aplicados a todos los puntos de control, donde sea aplicable, considerados en la programación de la CNE.

La aplicación de los criterios descritos permite seleccionar un total de trece cuencas que cumplen con los requisitos establecidos anteriormente. Cada una de estas cuencas se encuentra asociada a una o más centrales Hidroeléctricas, ya sea de paso o con presencia de embalse. Estas cuencas tienen una capacidad instalada de 4.448 MW, que representa cerca del 65% del total asociado a hidroelectricidad en el país (total de 6.822 MW; si se considera que, según el Coordinador, un 27% de la capacidad total instalada corresponde a centrales Hidroeléctricas (Coordinador,2019)). Adicionalmente, se decidió la inclusión de algunas cuencas para lograr una mayor representatividad espacial de la zona de estudio.

A continuación, se presenta un resumen donde se detallan las características principales de cada uno de los puntos seleccionados, separando según la cuenca en la que se encuentra. La Tabla 2.1 presenta una descripción de los puntos de control seleccionados, donde se detallan las centrales Hidroeléctricas que se encuentran dentro de cada una de ellas. El caso particular de la cuenca de Laguna del Maule, que no presenta ninguna central asociada (aunque a

futuro contará con la central Los Cóndores), se debe a que geográficamente forma parte de la cuenca del Maule, la cual representa una de las de mayor capacidad de generación instalada, y que, por lo tanto, interesa modelar completamente.

Tabla 2.1. Listado de cuencas y puntos de control asociados, seleccionados para modelar. Se indica además centrales Hidroeléctricas asociadas y capacidad asociada a cada una de ellas, junto con la potencia total instalada para cada cuenca. Los valores de potencia instalada son extraídos desde antecedentes facilitados por el Coordinador. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Punto de control		Central Hidroeléctrica	Potencia instalada (MW)	Potencia instalada total en cuenca (MW)
Rapel	Afluentes embalse Rapel		Rapel	375	906
			Sauzal	77	
			Sauzalito	12	
			La Confluencia	163	
			La Higuera	155	
			Chacayes	112	
			Coya	12	
Maule	Afluentes Laguna del Maule		-		1.401
	Hoya intermedia de Colbún	Hoya intermedia de Pehuenche	Loma Alta	39	
			Curillinque	87	
			Ojos de Agua	9	
			Isla	69	
			La Mina	37	
		Laguna Invernada	Cipreses	105	
		Afluentes río Melado	Pehuenche	550	
			Los Hierros	25	
			Los Hierros II	6	
		-	Colbún	474	
Laja	Polcura en bocatoma Antuco	Afluentes Laguna del Laja	El Toro	450	906
		-	Antuco	320	
	-	Abanico	136		
Biobío	Afluentes embalse Ralco		Ralco	690	1.014
	Afluentes río Huequecura		Angostura	324	
Pullinque	Pullinque		Pullinque	51	51
Lago Chapo	Lago Chapo		Canutillar	170	170
<b>TOTAL</b>				<b>4.448</b>	

### 2.1.1 Cuenca río Rapel

De acuerdo con la Figura 2.1, la cuenca del embalse Rapel se caracteriza por presentar precipitaciones concentradas durante los meses fríos de invierno, que se traducen en crecidas de caudales que alcanzan su máximo entre los meses de julio y agosto.

Esta cuenca, según se aprecia en la Figura 2.2, se caracteriza por tener un gran tamaño, abarcando casi la totalidad de la región de O'Higgins. Las aguas de los ríos Tinguiririca y Cachapoal se juntan para dar origen al río Rapel, el cual alimenta al embalse Rapel, donde se ubica la central del mismo nombre.

Se debe destacar que esta cuenca cuenta con una importante presencia de actividad agrícola, razón por la que las cuencas aportantes principales (ríos Tinguiririca y Cachapoal) presentan un alto nivel de intervención. Esta situación provoca que sea difícil estimar caudales en régimen natural, siendo necesario hacer algunas aproximaciones para poder estimar montos de caudal razonables.

Esto resulta un antecedente crítico en el proceso de modelación. Sin embargo, la inclusión de esta cuenca fue motivada debido a la gran potencia instalada que tiene, así como también por su ubicación geográfica.

La

Tabla 2.2 presenta un resumen de las características geomorfológicas de la cuenca, así como también de las centrales Hidroeléctricas ubicadas en su interior.

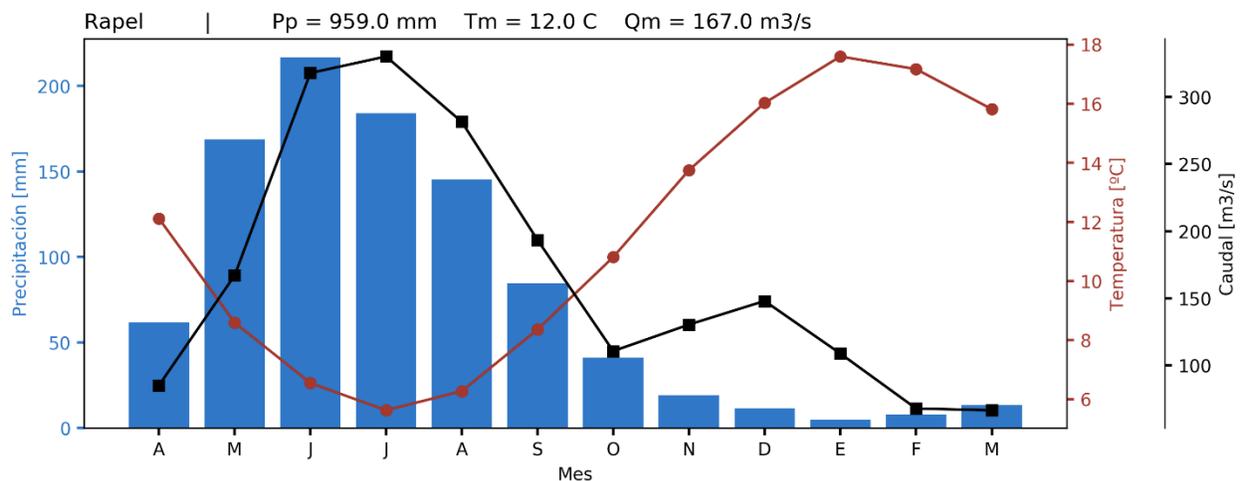


Figura 2.1. Valores mensuales de precipitación (barras), temperatura (curva con puntos rojos) y caudal (curva con puntos negros), para el punto de control de afluentes al embalse Rapel. En la parte superior del gráfico se indican los valores medios de estas tres variables. Fuente: elaboración propia.

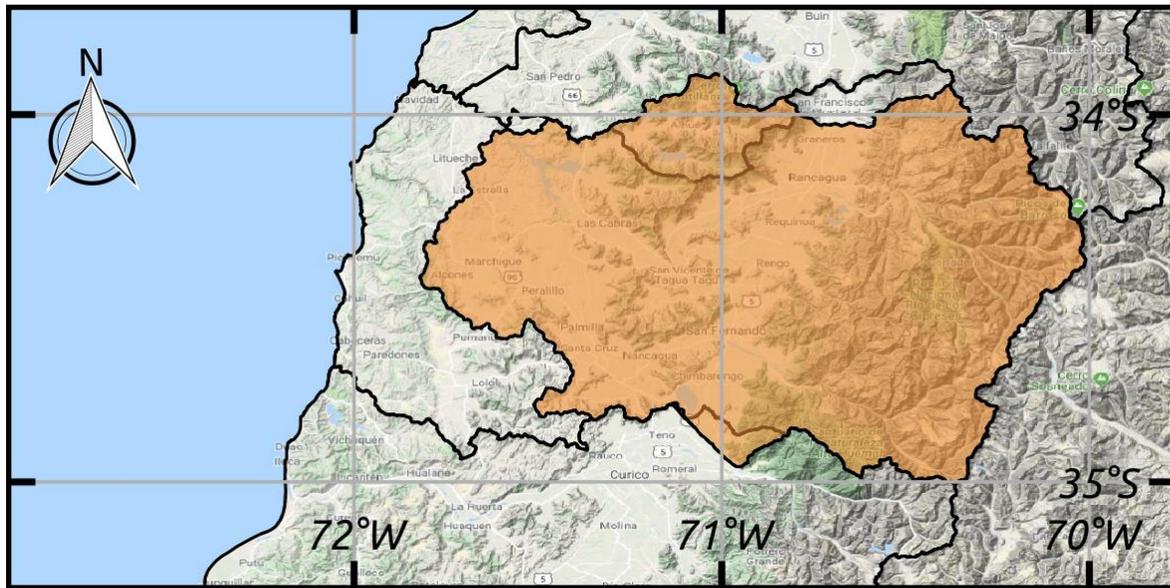


Figura 2.2. Mapa de la zona representativa del punto de control afluentes del embalse Rapel (destacada en color naranja). Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.2. Resumen de características asociadas al punto de control afluentes al embalse Rapel. Se destaca nombre del punto, nombre en código, cuenca principal, tipo de régimen de caudales, caudal medio ( $m^3/s$ ), área total ( $km^2$ ), altura (mínima, media y máxima; en msnm), capacidad instalada total (MW), centrales Hidroeléctricas operativas asociadas, embalses artificiales asociados, y lagos o lagunas. Fuente: elaboración propia.

Punto de control	Afluentes embalse Rapel	
Nombre en código	Rapel	
Cuenca principal	Tinguiririca/Cachapoal	
Tipo de régimen	Pluvial	
Caudal medio ( $m^3/s$ )	167	
Área total ( $km^2$ )	13.533	
Altura (msnm)	Mínima	108
	Media	1.201
	Máxima	5.153
Capacidad instalada total (MW)	906	
Centrales Hidroeléctricas operativas asociadas	Rapel (375 MW; embalse - ENEL), Sauzal (77 MW; pasada - ENEL), Sauzalito (12 MW; mini pasada - ENEL), La Confluencia (163 MW; pasada - Pacific Hydro), La Higuera (155 MW; pasada - Pacific Hydro), Chacayes (112 MW; pasada - Pacific Hydro), Coya (12 MW; mini pasada - Pacific Hydro)	
Embalses artificiales asociados	Lago Rapel, embalse Caren, embalse Convento Viejo	
Lagos o lagunas asociadas	Laguna Cauquenes	

## 2.1.2 Cuenca río Maule

La cuenca del río Maule es una de la que presenta una mayor cantidad de centrales Hidroeléctricas y embalses a nivel nacional. Se plantean dentro de esta cuenca cinco modelos asociados a distintas centrales. La zona de estudio propuesta se enfoca en la presencia de cuatro grandes embalses presentes en la cuenca: Cipreses, Laguna del Maule, Melado y Colbún. Se describen a continuación las características de los puntos de control determinados para esta cuenca.

### 2.1.2.1 Afluentes río Melado

La cuenca de los afluentes al embalse Melado presenta, de acuerdo a la Figura 2.3, precipitaciones que se concentran en los meses de invierno, principalmente entre mayo y julio. Asociado a esto, el caudal medio durante estos meses también se ve incrementado. No obstante, las mayores crecidas se producen entre septiembre y diciembre, coincidiendo con el aumento estacional de temperaturas y la época de deshielo.

La Figura 2.4 muestra que la cuenca en cuestión posee un aporte importante de sectores cordilleranos de la región del Maule, descendiendo hacia zonas más bajas. Es por esta razón que los caudales tienen un carácter mixto, observándose dos alzas durante el año. Las aguas del río Melado son contenidas en el embalse del mismo nombre, las que a su vez son empleadas para alimentar a la central Pehuenche, en conjunto con los aportes que provienen desde la zona alta del Maule.

La Tabla 2.3 presenta un resumen de las características geomorfológicas del punto de control, así como también de las centrales Hidroeléctricas ubicadas en su interior.

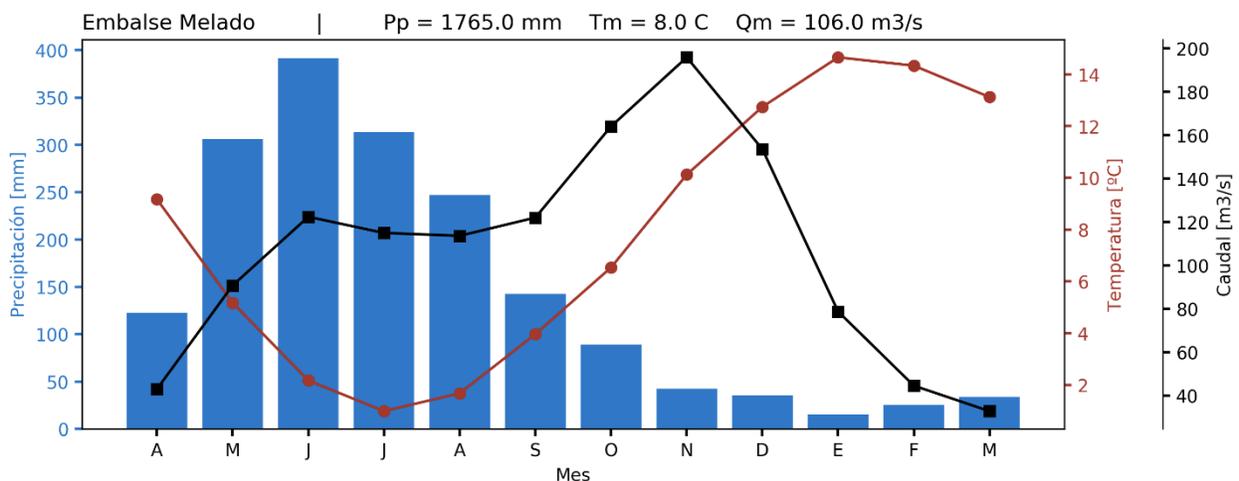


Figura 2.3. Valores mensuales de precipitación (barras), temperatura (curva con puntos rojos) y caudal (curva con puntos negros), para el punto de control de los afluentes al embalse Melado. En la parte superior del gráfico se indican los valores medios de estas tres variables. Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.3. Resumen de características asociadas al punto de control de los afluentes al río Melado. Se destaca nombre del punto, nombre en código, cuenca principal, tipo de régimen de caudales, caudal medio (m<sup>3</sup>/s), área total (km<sup>2</sup>), altura (mínima, media y máxima; en msnm), capacidad instalada total (MW), centrales Hidroeléctricas operativas asociadas, embalses artificiales asociados, y lagos o lagunas. Fuente: elaboración propia.

Punto de control		Afluentes río Melado
Nombre en código		Melado
Cuenca principal		Maule
Tipo de régimen		Mixto
Caudal medio (m <sup>3</sup> /s)		106
Área total (km <sup>2</sup> )		2.274
Altura (msnm)	Mínima	648
	Media	1.933
	Máxima	3.617
Capacidad instalada total (MW)		581
Centrales Hidroeléctricas operativas asociadas		Pehuenche (550 MW; embalse – ENEL), Los Hierros (25 MW; pasada – Besalco), Los Hierros II (6 MW; pasada – Besalco)
Embalses asociados		Embalse Melado
Lagos o lagunas asociadas		No posee

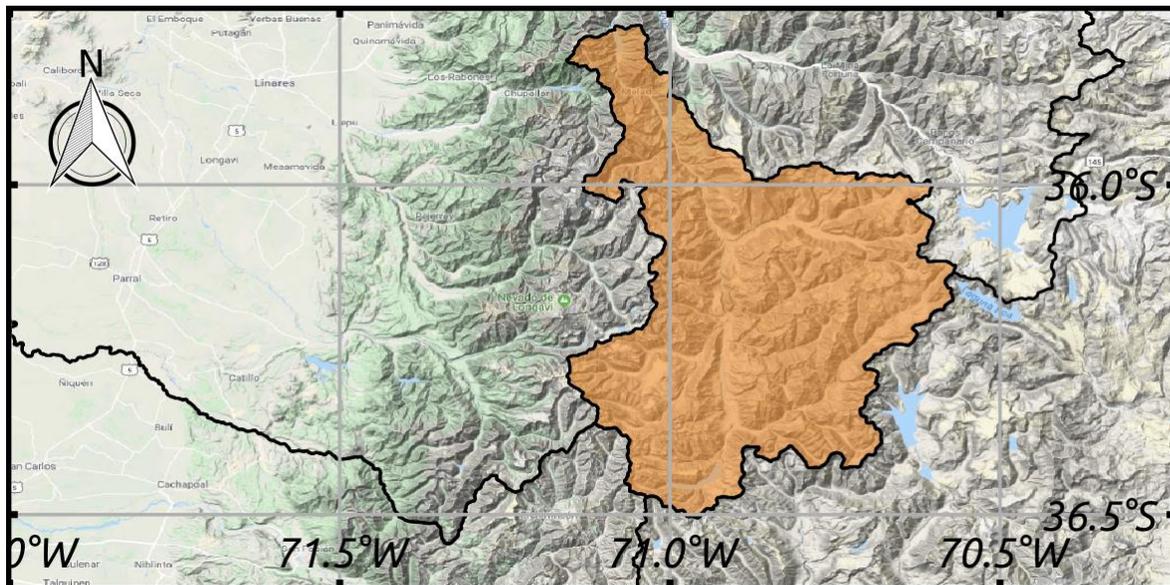


Figura 2.4. Mapa de la zona representativa del punto de control los afluentes del embalse Melado (destacada en color naranja). Fuente: elaboración propia.

### 2.1.2.2 Laguna Invernada

Las precipitaciones en la Laguna Invernada, de acuerdo a la Figura 2.5, se concentran durante la estación de invierno, alcanzando sus máximos valores acumulados entre mayo y julio. Debido a las bajas temperaturas asociadas durante estos meses, es de suponer que parte importante de la precipitación que cae en esta zona es sólida, depositado como nieve y hielo. Las crecidas de caudal se producen durante los meses de primavera y verano (época de deshielo), asociadas al alza estacional de las temperaturas.

De acuerdo a la Figura 2.6, la Laguna Invernada se encuentra hacia el norte de la hoya intermedia de la central Pehuenche y la Laguna del Maule, inmersa en una zona montañosa, la cual le hace presentar una altura media relativamente alta. Esta laguna es aprovechada por la central Cipreses para generar energía eléctrica, existiendo además un posterior uso de estas aguas por parte de otras centrales en la zona.

La Tabla 2.4 presenta un resumen de las características geomorfológicas del punto de control, así como también de las centrales Hidroeléctricas ubicadas en su interior.

**Tabla 2.4. Resumen de características asociadas al punto de control de la Laguna Invernada. Se destaca nombre del punto, nombre en código, cuenca principal, tipo de régimen de caudales, caudal medio (m<sup>3</sup>/s), área total (km<sup>2</sup>), altura (mínima, media y máxima; en msnm), capacidad instalada total (MW), centrales Hidroeléctricas operativas asociadas, embalses artificiales asociados, y lagos o lagunas. Fuente: elaboración propia.**

Punto de control		Afluentes Laguna Invernada
Nombre en código		L. Invernada
Cuenca principal		Maule
Tipo de régimen		Nival
Caudal medio (m <sup>3</sup> /s)		37
Área total (km <sup>2</sup> )		865
Altura (msnm)	Mínima	1.307
	Media	2.469
	Máxima	3.937
Capacidad instalada total (MW)		105
Centrales Hidroeléctricas operativas asociadas		Cipreses (105 MW; embalse – ENEL)
Embalses asociados		No posee
Lagos o lagunas asociadas		Laguna La Invernada

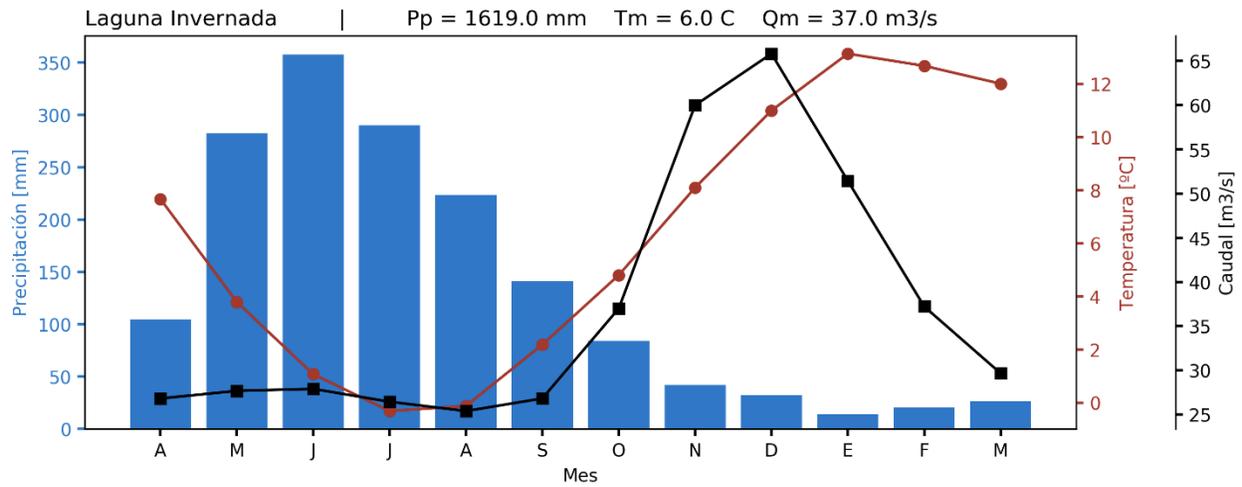


Figura 2.5. Valores mensuales de precipitación (barras), temperatura (curva con puntos rojos) y caudal (curva con puntos negros), para el punto de control de la Laguna Invernada. En la parte superior del gráfico se indican los valores medios de estas tres variables. Fuente: elaboración propia.

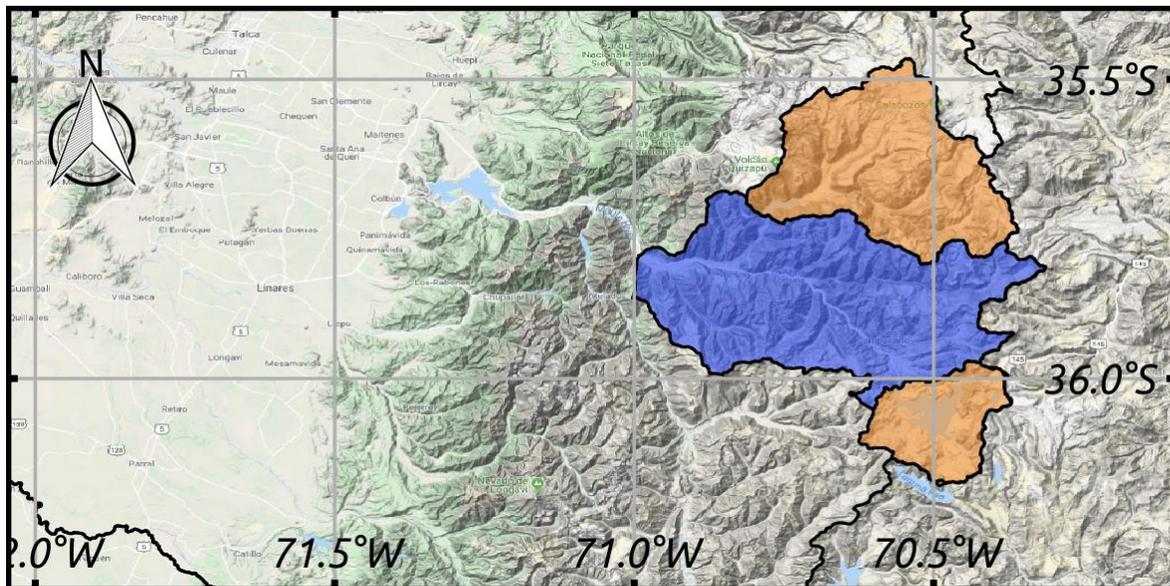


Figura 2.6. Mapa de las zonas representativas de los puntos de control de la Laguna Invernada (destacada en color naranja, ubicada más hacia el norte), Laguna del Maule (destacada en naranja, ubicada hacia el sur) y la hoya intermedia Pehuenche (destacada en color azul). Fuente: elaboración propia.

### 2.1.2.3 Afluentes Laguna del Maule

La cuenca que representa los afluentes a la Laguna del Maule se caracteriza por presentar, de acuerdo a la Figura 2.7, precipitaciones que se concentran durante los meses de invierno, principalmente entre mayo y julio. Asociado a las mayores precipitaciones se aprecia un incremento del caudal medio, no obstante, este presenta sus mayores crecidas durante los meses del deshielo, entre octubre y enero.

De acuerdo a la Figura 2.6, la Laguna del Maule también se encuentra inmersa en una zona cordillerana, compartiendo una altura media similar a la Laguna Invernada. No obstante, la cuenca asociada a la Laguna del Maule es de menor tamaño. Actualmente, las aguas de la laguna en cuestión alimentan a la central La Mina, no obstante, en un futuro próximo en esta zona también se encontrará la central Los Cóndores.

La Tabla 2.5 presenta un resumen de las características geomorfológicas del punto de control, así como también de las centrales Hidroeléctricas ubicadas en su interior.

**Tabla 2.5. Resumen de características asociadas al punto de control de los afluentes a la Laguna del Maule. Se destaca nombre del punto, nombre en código, cuenca principal, tipo de régimen de caudales, caudal medio (m<sup>3</sup>/s), área total (km<sup>2</sup>), altura (mínima, media y máxima; en msnm), capacidad instalada total (MW), centrales Hidroeléctricas operativas asociadas, embalses artificiales asociados, y lagos o lagunas. Fuente: elaboración propia.**

Punto de control		Afluentes laguna del Maule
Nombre en código		L. Maule
Cuenca principal		Maule
Tipo de régimen		Nival
Caudal medio (m <sup>3</sup> /s)		13
Área total (km <sup>2</sup> )		309
Altura (msnm)	Mínima	2.178
	Media	2.457
	Máxima	3.153
Capacidad instalada total (MW)		0
Centrales Hidroeléctricas operativas asociadas		No posee
Embalses asociados		Laguna del Maule
Lagos o lagunas asociadas		No posee

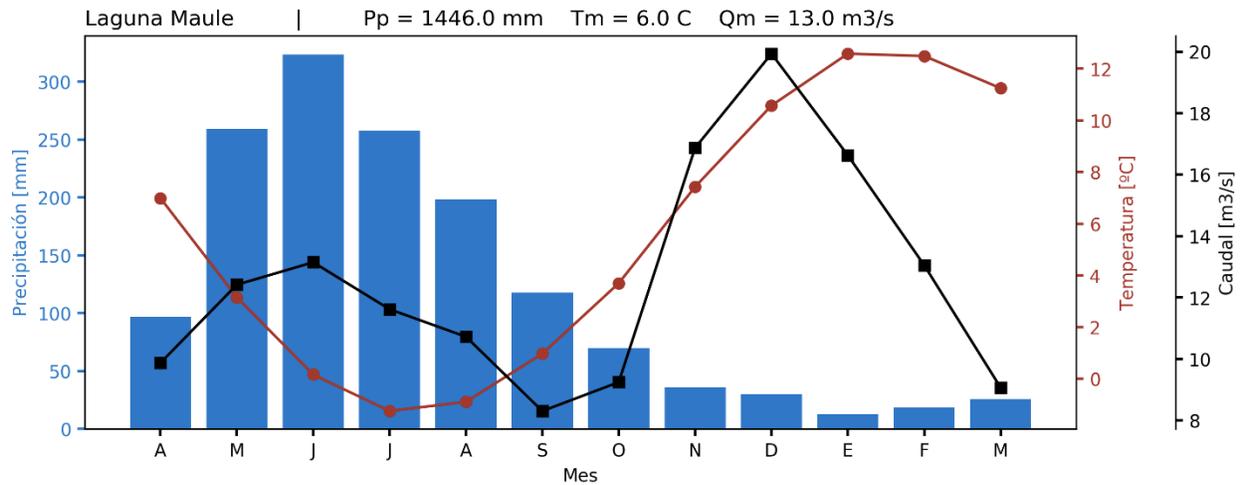


Figura 2.7. Valores mensuales de precipitación (barras), temperatura (curva con puntos rojos) y caudal (curva con puntos negros), para el punto de control de la Laguna del Maule. En la parte superior del gráfico se indican los valores medios de estas tres variables. Fuente: elaboración propia.

#### 2.1.2.4 Hoya intermedia de Pehuenche

De acuerdo a la Figura 2.8, la hoya intermedia de la central Pehuenche tiene asociadas precipitaciones que se incrementan durante los meses de invierno, especialmente entre mayo y julio. Asociado a estos mayores montos de precipitación se aprecia un incremento de los caudales medios, no obstante, estos son mayores durante la época de deshielo, cuando las temperaturas presentan su alza estacional. Noviembre es el mes con las máximas crecidas.

En la Figura 2.6 se aprecia que la hoya intermedia de la central Pehuenche se encuentra entre las lagunas La Invernada y del Maule, extendiéndose desde sectores cordilleranos a zonas más bajas. El agua que es aprovechada por la central Pehuenche proviene, en un alto porcentaje, desde otras centrales Hidroeléctricas, que se encuentran en zonas más alta de la cuenca del río Maule.

La Tabla 2.6 presenta un resumen de las características geomorfológicas del punto de control, así como también de las centrales Hidroeléctricas ubicadas en su interior.

Tabla 2.6. Resumen de características asociadas al punto de control de la hoya intermedia de la hoya intermedia de la central Pehuenche. Se destaca nombre del punto, nombre en código, cuenca principal, tipo de régimen de caudales, caudal medio (m<sup>3</sup>/s), área total (km<sup>2</sup>), altura (mínima, media y máxima; en msnm), capacidad instalada total (MW), centrales Hidroeléctricas operativas asociadas, embalses artificiales asociados, y lagos o lagunas. Fuente: elaboración propia.

Punto de control	Hoya intermedia de central Pehuenche	
Nombre en código	Pehuenche	
Cuenca principal	Maule	
Tipo de régimen	Mixto	
Caudal medio (m <sup>3</sup> /s)	62	
Área total (km <sup>2</sup> )	1.381	
Altura (msnm)	Mínima	646
	Media	2.084
	Máxima	3.852
Capacidad instalada total (MW)	241	
Centrales Hidroeléctricas operativas asociadas	Loma Alta (39 MW; pasada – ENEL), Curillinque (87 MW; pasada – ENEL), Ojos de Agua (9 MW; mini pasada – ENEL), Isla (69 MW; pasada – ENEL) , La Mina (37 MW; pasada - Colbún), Cipreses (106 MW; embalse – ENEL)	
Embalses asociados	Embalse Melado, laguna del Maule	
Lagos o lagunas asociadas	Laguna La Invernada	

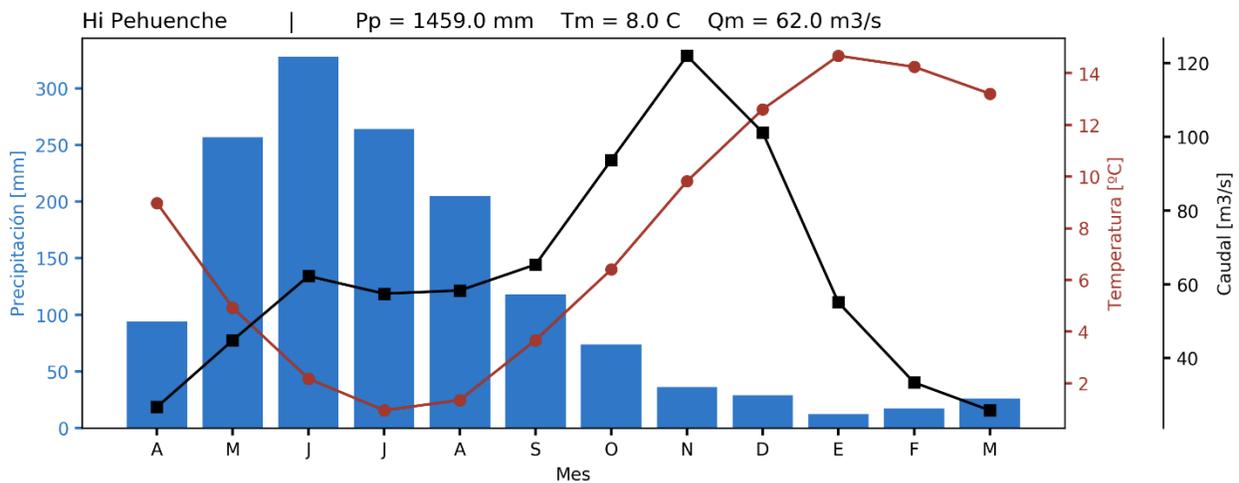


Figura 2.8. Valores mensuales de precipitación (barras), temperatura (curva con puntos rojos) y caudal (curva con puntos negros), para el punto de control de la hoya intermedia de la central Pehuenche. En la parte superior del gráfico se indican los valores medios de estas tres variables. Fuente: elaboración propia.

### 2.1.2.5 Hoya intermedia de Colbún

La hoya intermedia de Colbún presenta precipitaciones que se concentran entre los meses de mayo y julio (de acuerdo a la Figura 2.9). Asociado a las precipitaciones se aprecia un aumento importante del caudal, no obstante, este incremento es mayor durante los meses cálidos, alcanzando los valores más altos durante el mes de noviembre.

La cuenca asociada a la hoya intermedia de Colbún, según se aprecia en la Figura 2.10, abarca el área que comprende la hoya intermedia de Pehuenche, en conjunto con todos los afluentes que se encuentran entre este punto y el embalse Colbún (como el río Melado). Por su extensión, esta zona tiene características tanto de cordillera como de valles y zonas precordilleranas.

La Tabla 2.7 presenta un resumen de las características geomorfológicas del punto de control, así como también de las centrales Hidroeléctricas ubicadas en su interior.

**Tabla 2.7. Resumen de características asociadas al punto de control de hoya intermedia de Colbún. Se destaca nombre del punto, nombre en código, cuenca principal, tipo de régimen de caudales, caudal medio (m<sup>3</sup>/s), área total (km<sup>2</sup>), altura (mínima, media y máxima; en msnm), capacidad instalada total (MW), centrales Hidroeléctricas operativas asociadas, embalses artificiales asociados, y lagos o lagunas. Fuente: elaboración propia.**

Punto de control	Hoya Intermedia de Colbún	
Nombre en código	Colbún	
Cuenca principal	Maule	
Tipo de régimen	Mixto	
Caudal medio (m <sup>3</sup> /s)	181	
Área total (km <sup>2</sup> )	4.401	
Altura (msnm)	Mínima	425
	Media	1.922
	Máxima	3.920
Capacidad instalada total (MW)	1.401	
Centrales Hidroeléctricas operativas asociadas	Colbún (474 MW; embalse – Colbún), La Mina (37 MW; pasada - Colbún), Pehuenche (550 MW; embalse – ENEL), Cipreses (105 MW; embalse – ENEL), Curillinque (87 MW; pasada – ENEL), Loma Alta (39 MW; pasada - ENEL), Isla (69 MW; pasada – ENEL), Ojos de Agua (9 MW; mini pasada – ENEL), Los Hierros (25 MW; pasada – Besalco), Los Hierros II (6 MW; pasada – Besalco)	
Embalses asociados	Embalse Colbún, embalse Melado, laguna del Maule	
Lagos o lagunas asociadas	Laguna La Invernada	

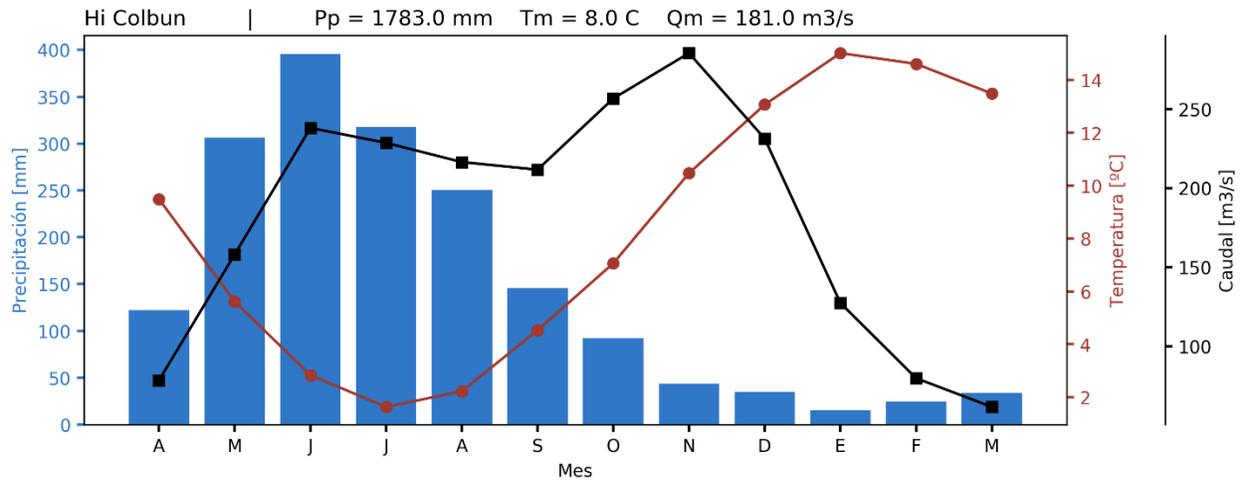


Figura 2.9. Valores mensuales de precipitación (barras), temperatura (curva con puntos rojos) y caudal (curva con puntos negros), para el punto de control de la hoya intermedia Colbún. En la parte superior del gráfico se indican los valores medios de estas tres variables. Fuente: elaboración propia.

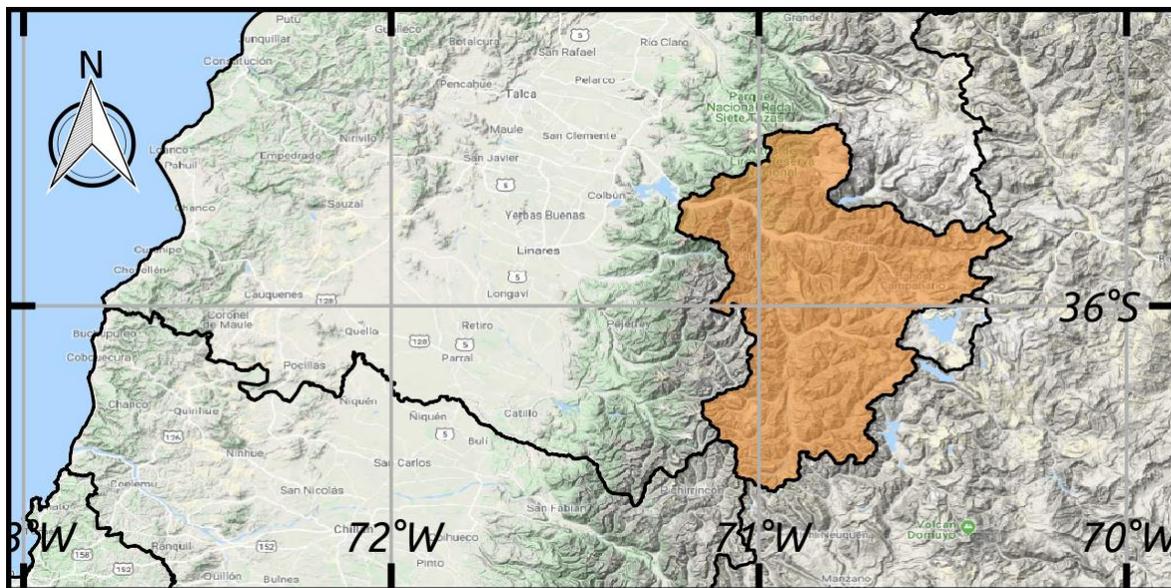


Figura 2.10. Mapa de la zona representativa del punto de control de la hoya intermedia de Colbún (destacada en color naranja). Fuente: elaboración propia.

### 2.1.3 Cuenca del río Laja

La cuenca del río Laja es otra de las cuencas con mayor capacidad de generación Hidroeléctrica instalada, varias de ellas en serie. Además, cuenta con la presencia de la Laguna del Laja, un importante embalse natural, desde donde se alimentan grandes centrales Hidroeléctricas como El Toro, Antuco y Abanico. Se propone la modelación de dos cuencas de cabecera, definidas por el río Antuco y los afluentes a la Laguna del Laja. Los detalles de cada una de estas cuencas se describen a continuación.

#### 2.1.3.1 Afluentes Laguna del Laja

La cuenca que corresponde a los afluentes del río Laja, según se aprecia en la Figura 2.11, presenta precipitaciones que se concentran mayormente entre los meses de mayo y agosto. Asociadas a las mayores precipitaciones, los caudales exhiben una importante crecida. No obstante, la época en que los caudales alcanzan sus máximas crecidas corresponde a los meses de octubre y noviembre, época en que las temperaturas se encuentran elevándose producto de la llegada del verano.

La cuenca en cuestión, señalada en azul en la Figura 2.12, se encuentra en un sector cordillerano, próximo a la frontera con Argentina. Pese a ser una zona cordillerana, la altura media de esta cuenca es menor que la zona alta del Maule. Las aguas de la laguna del Laja son usadas para alimentar tanto a la central El Toro (por medio de un túnel de aducción), como a la central Abanico (donde son aprovechadas las filtraciones, que dependen de la cota de laguna). La Tabla 2.8 presenta un resumen de las características geomorfológicas del punto de control, así como también de las centrales Hidroeléctricas ubicadas en su interior.

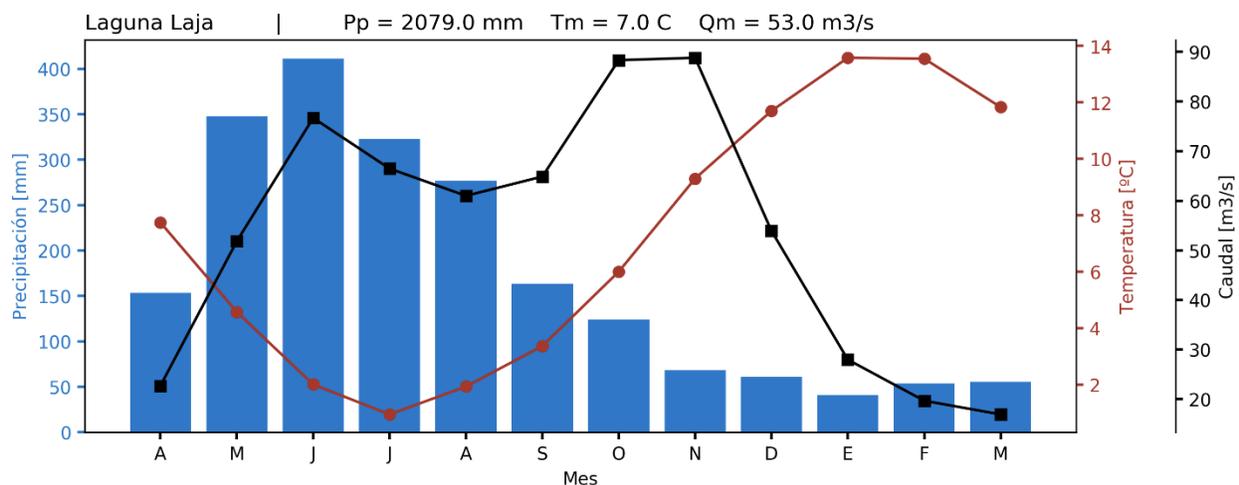


Figura 2.11. Valores mensuales de precipitación (barras), temperatura (curva con puntos rojos) y caudal (curva con puntos negros), para el punto de control de los afluentes a la Laguna del Laja. En la parte superior del gráfico se indican los valores medios de estas tres variables. Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.8. Resumen de características asociadas al punto de control de los afluentes a la Laguna del Laja. Se destaca nombre del punto, nombre en código, cuenca principal, tipo de régimen de caudales, caudal medio (m<sup>3</sup>/s), área total (km<sup>2</sup>), altura (mínima, media y máxima; en msnm), capacidad instalada total (MW), centrales Hidroeléctricas operativas asociadas, embalses artificiales asociados, y lagos o lagunas. Fuente: elaboración propia.

Punto de control		Afluentes Laguna del Laja
Nombre en código		L. Laja
Cuenca principal		Laja/Biobío
Tipo de régimen		Mixto
Caudal medio (m <sup>3</sup> /s)		53
Área total (km <sup>2</sup> )		973
Altura (msnm)	Mínima	1.406
	Media	1.748
	Máxima	3.509
Capacidad instalada total (MW)		450
Centrales Hidroeléctricas operativas asociadas		El Toro (450 MW; embalse - ENEL)
Embalses asociados		No posee
Lagos o lagunas asociadas		Laguna del Laja

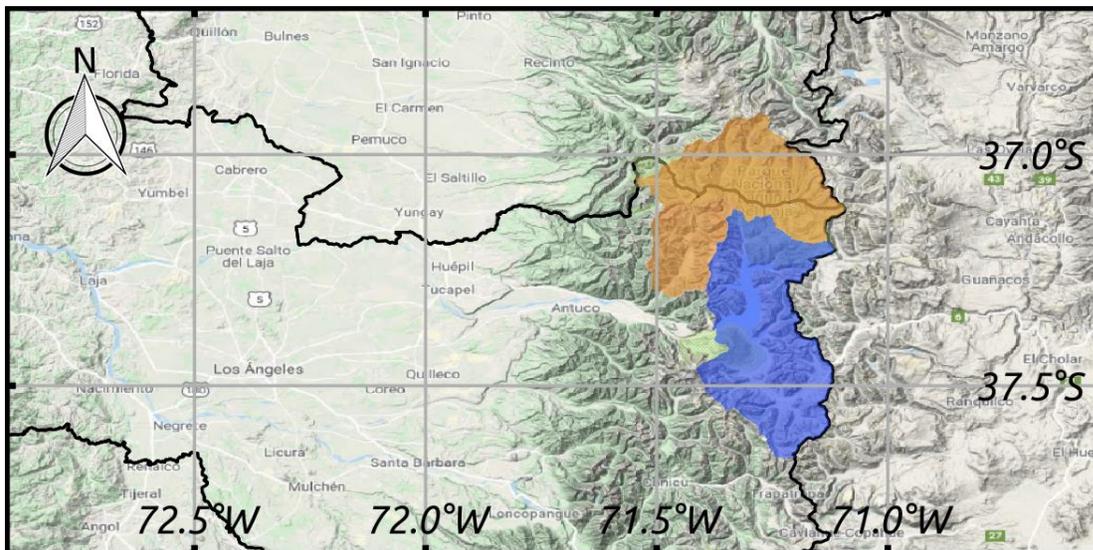


Figura 2.12. Mapa de las zonas representativas de los puntos de control de los afluentes a la Laguna del Laja (destacada en color azul) y de Polcura en bocatoma a la central Antuco (en color naranja). Fuente: elaboración propia.

### 2.1.3.2 Polcura en bocatoma central Antuco

En la zona del río Polcura en la bocatoma de la central Antuco las precipitaciones, tal como muestra la Figura 2.13, se concentran entre los meses de mayo y agosto, con un máximo en junio. Los caudales en esta zona tienen su máximo durante el periodo de mayores precipitaciones, no obstante, entre agosto y noviembre los caudales continúan mostrando valores relativamente altos, asociado probablemente a la época de deshielo.

La cuenca, como se aprecia en la Figura 2.12, se encuentra hacia el norte de la laguna del Laja, también enclavada en un valle cordillerano, el cual desciende levemente hacia el oeste. Ambas cuencas (del Laja y Polcura) descienden hacia el valle de Antuco, donde se encuentra la central Hidroeléctrica homónima.

La Tabla 2.9 presenta un resumen de las características geomorfológicas del punto de control, así como también de las centrales Hidroeléctricas ubicadas en su interior.

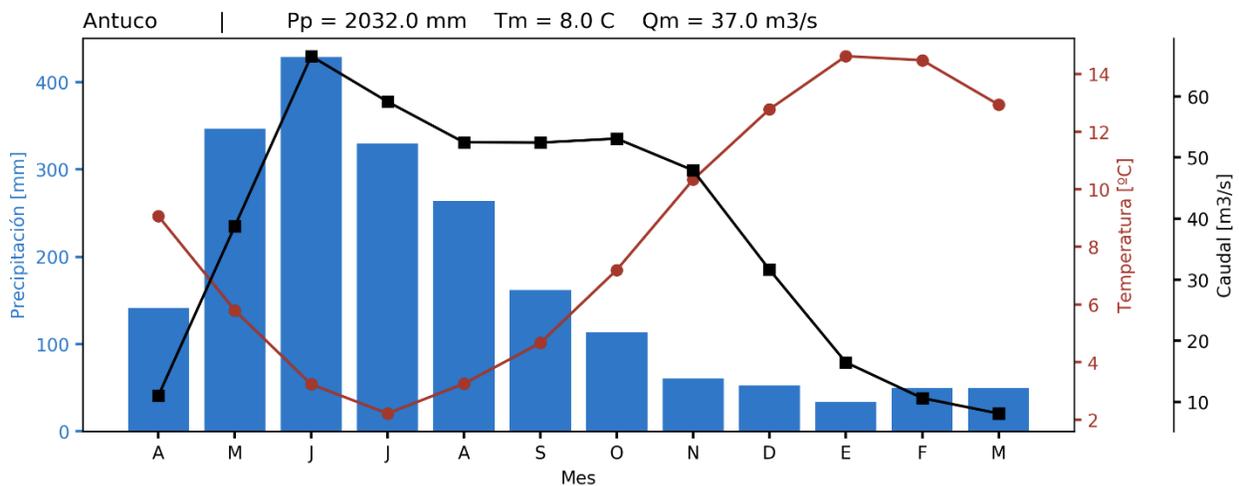


Figura 2.13. Valores mensuales de precipitación (barras), temperatura (curva con puntos rojos) y caudal (curva con puntos negros), para el punto de control de Polcura en la bocatoma de la central Antuco. En la parte superior del gráfico se indican los valores medios de estas tres variables. Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.9. Resumen de características asociadas al punto de control de Polcura en bocatoma de la central Antuco. Se destaca nombre del punto, nombre en código, cuenca principal, tipo de régimen de caudales, caudal medio (m<sup>3</sup>/s), área total (km<sup>2</sup>), altura (mínima, media y máxima; en msnm), capacidad instalada total (MW), centrales Hidroeléctricas operativas asociadas, embalses artificiales asociados, y lagos o lagunas. Fuente: elaboración propia.

Punto de control		Polcura en bocatoma central Antuco
Nombre en código		Antuco
Cuenca principal		Laja/Biobío
Tipo de régimen		Mixto
Caudal medio (m <sup>3</sup> /s)		37
Área total (km <sup>2</sup> )		889
Altura (msnm)	Mínima	766
	Media	1.710
	Máxima	3.085
Capacidad instalada total (MW)		906
Centrales Hidroeléctricas operativas asociadas		Antuco (320 MW; embalse – ENEL), Abanico (136 MW; pasada – ENEL), El Toro (450 MW; embalse – ENEL)
Embalses asociados		Embalse Polcura, embalse Cuatro Vegas
Lagos o lagunas asociadas		Laguna del Laja

## 2.1.4 Cuenca del río Biobío

La cuenca del río Biobío contiene la central Hidroeléctrica más grande a nivel nacional (Ralco, con 690 MW). Asociado a ella se encuentran las centrales Pangue y Angostura, que también cuentan con una capacidad de generación importante (467 y 323 MW, respectivamente). Dado el escaso aporte que presenta la cuenca de Pangue, y lo dependiente que resulta de la operación de la central Ralco, se decidió no incluir esta cuenca. Aportes adicionales a la central Angostura provenientes de río Huequecura se consideran importantes y por tanto se incluyeron como un modelo adicional a desarrollar. Se presentan a continuación los detalles de cada uno de estos modelos.

### 2.1.4.1 Afluentes embalse Ralco

La cuenca del embalse Ralco se caracteriza por presentar precipitaciones que se concentran entre los meses de mayo y junio (según se aprecia en la Figura 2.14). Respecto de los caudales, estos presentan dos máximos relativos, uno concentrado durante los meses de mayores precipitaciones y otro que se produce en los meses de primavera, probablemente asociado al derretimiento de las nieves invernales.

La cuenca del embalse Ralco (indicada como una zona naranja en el mapa de la Figura 2.15) nace en la cordillera del norte de la región de La Araucanía, para abrirse hacia el norte, a los sectores de Alto Biobío, en la región homónima. El embalse Ralco se forma gracias a la construcción de una presa gigante que embalsa las aguas del río Biobío. La Tabla 2.10 presenta un resumen de las características geomorfológicas del punto de control, así como también de las centrales Hidroeléctricas ubicadas en su interior.

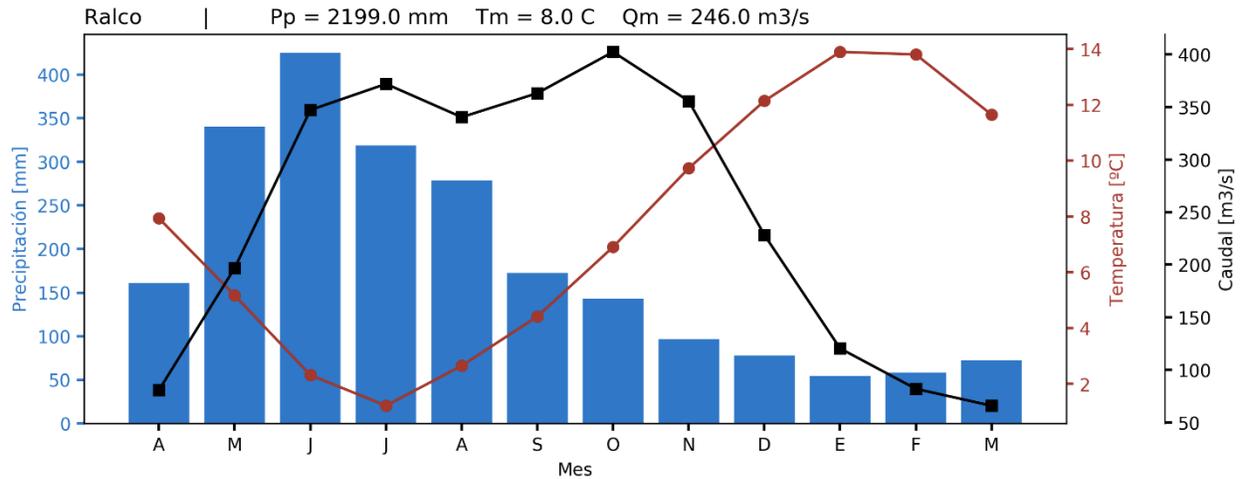


Figura 2.14. Valores mensuales de precipitación (barras), temperatura (curva con puntos rojos) y caudal (curva con puntos negros), para el punto de control de los afluentes al embalse Ralco. En la parte superior del gráfico se indican los valores medios de estas tres variables. Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.10. Resumen de características asociadas al punto de control de los afluentes del embalse Ralco. Se destaca nombre del punto, nombre en código, cuenca principal, tipo de régimen de caudales, caudal medio (m³/s), área total (km²), altura (mínima, media y máxima; en msnm), capacidad instalada total (MW), centrales Hidroeléctricas operativas asociadas, embalses artificiales asociados, y lagos o lagunas. Fuente: elaboración propia.

Punto de control	Afluentes embalse Ralco	
Nombre en código	Ralco	
Cuenca principal	Biobío	
Tipo de régimen	Mixto	
Caudal medio (m³/s)	246	
Área total (km²)	5.110	
Altura (msnm)	Mínima	669
	Media	1.461
	Máxima	2.981
Capacidad instalada total (MW)	690	
Centrales Hidroeléctricas operativas asociadas	Ralco (690 MW; embalse – ENEL)	
Embalses asociados	Embalse Ralco	
Lagos o lagunas asociadas	Laguna Galletué, laguna de Icalma	

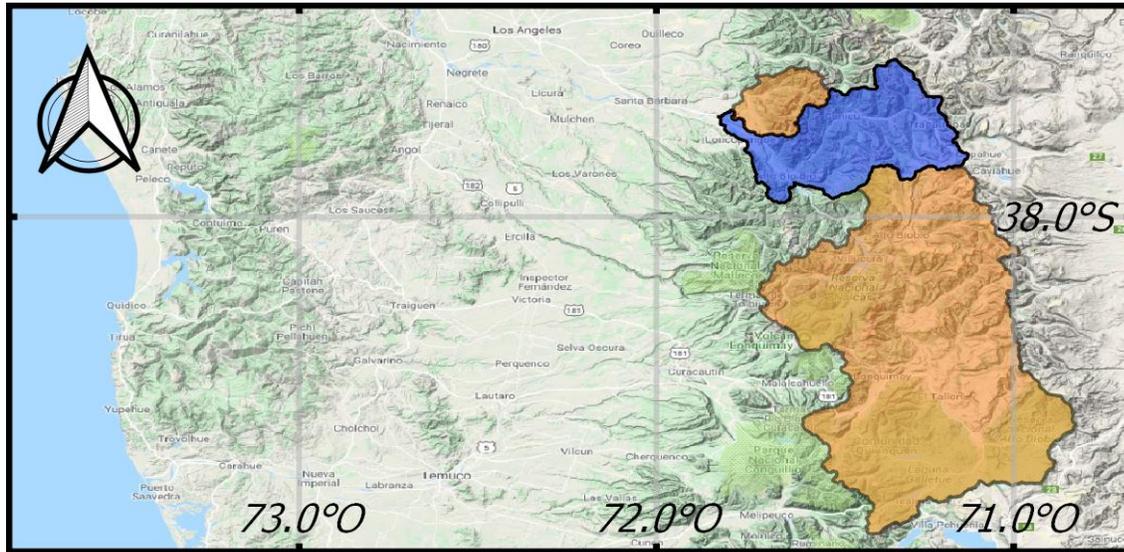


Figura 2.15. Mapa de las zonas representativas de los puntos de control de los afluentes al embalse Ralco (destacada en color naranja, ubicada hacia el sur), la cuenca intermedia Angostura (destacada en color azul) y los afluentes al río Huequecura (en color naranja, pero ubicada hacia el norte). Fuente: elaboración propia.

#### 2.1.4.2 Afluentes río Huequecura

La cuenca que involucra a los afluentes del río Huequecura presenta precipitaciones que, según la Figura 2.16, se concentran durante los meses de mayo y agosto. Los caudales presentan un comportamiento similar a las precipitaciones, mostrando máximas crecidas en la misma época. La Tabla 2.11 presenta un resumen de las características geomorfológicas del punto de control, así como también de las centrales Hidroeléctricas ubicadas en su interior.

Tabla 2.11. Resumen de características asociadas al punto de control de los afluentes al río Huequecura. Se destaca nombre del punto, nombre en código, cuenca principal, tipo de régimen de caudales, caudal medio ( $m^3/s$ ), área total ( $km^2$ ), altura (mínima, media y máxima; en msnm), capacidad instalada total (MW), centrales Hidroeléctricas operativas asociadas, embalses artificiales asociados, y lagos o lagunas. Fuente: elaboración propia.

Punto de control		Afluentes río Huequecura
Nombre en código		Huequecura
Cuenca principal		Biobío
Tipo de régimen		Mixto
Caudal medio ( $m^3/s$ )		23
Área total ( $km^2$ )		338
Altura (msnm)	Mínima	324
	Media	1.029
	Máxima	2.287
Capacidad instalada total (MW)		324
Centrales Hidroeléctricas operativas asociadas		Angostura (324 MW; embalse - Colbún)
Embalses asociados		Embalse Angostura
Lagos o lagunas asociadas		No posee

De acuerdo al mapa de la Figura 2.15, la cuenca de Huequecura se encuentra hacia el norte del embalse Ralco, en la región del Biobío. Esta zona es considerablemente más pequeña que la del embalse señalado, estando además a una menor altura media. Las aguas del río Huequecura confluyen hacia la central Angostura, para luego ser incorporadas al río Biobío.

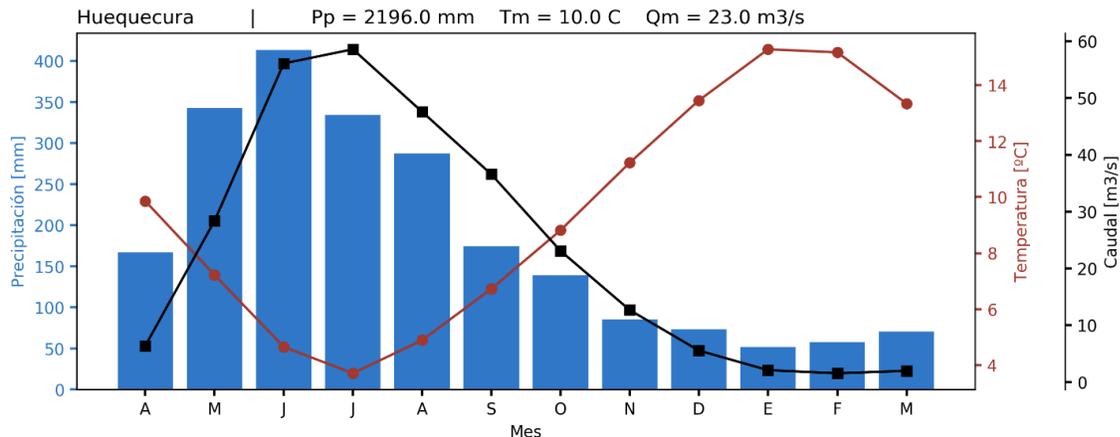


Figura 2.16. Valores mensuales de precipitación (barras), temperatura (curva con puntos rojos) y caudal (curva con puntos negros), para el punto de control de los afluentes al río Huequecura. En la parte superior del gráfico se indican los valores medios de estas tres variables. Fuente: elaboración propia.

### 2.1.4.3 Afluentes cuenca intermedia Angostura

La cuenca intermedia Angostura hace referencia al área aportante a la central Angostura (destacada en azul en la Figura 2.15). Se encuentra directamente hacia el norte de la cuenca que alimenta al embalse Ralco, y no forma parte de las siguientes subcuencas o unidades hidrológicas:

- a) La subcuenca definida por el río Huequecura.
- b) La cuenca definida por el embalse Pangue.

De acuerdo a la Figura 2.17, esta zona presenta un comportamiento muy similar a lo observado para Huequecura, produciéndose una concentración de las precipitaciones durante los meses de invierno, lo que se ve acompañado por temperaturas relativamente bajas. Tanto los montos totales de precipitación como las temperaturas medias son similares a Huequecura, diferenciándose solamente por el caudal medio, el cual es mayor en Angostura.

La Tabla 2.12 presenta un resumen de las características geomorfológicas del punto de control, así como también de las centrales Hidroeléctricas ubicadas en su interior.

Tabla 2.12. Resumen de características asociadas al punto de control de los afluentes a la cuenca intermedia de la central Angostura. Se destaca nombre del punto, nombre en código, cuenca principal, tipo de régimen de caudales, caudal medio (m<sup>3</sup>/s), área total (km<sup>2</sup>), altura (mínima, media y máxima; en msnm), capacidad instalada total (MW), centrales Hidroeléctricas operativas asociadas, embalses artificiales asociados, y lagos o lagunas. Fuente: elaboración propia.

Punto de control	Afluentes cuenca intermedia Angostura	
Nombre en código	Angostura	
Cuenca principal	Biobío	
Tipo de régimen	Pluvial	
Caudal medio (m <sup>3</sup> /s)	88	
Área total (km <sup>2</sup> )	1.353	
Altura (msnm)	Mínima	290
	Media	1.314
	Máxima	3.095
Capacidad instalada total (MW)	324	
Centrales Hidroeléctricas operativas asociadas	Angostura (324 MW; embalse - Colbún)	
Embalses asociados	Embalse Angostura	
Lagos o lagunas asociadas	No posee	

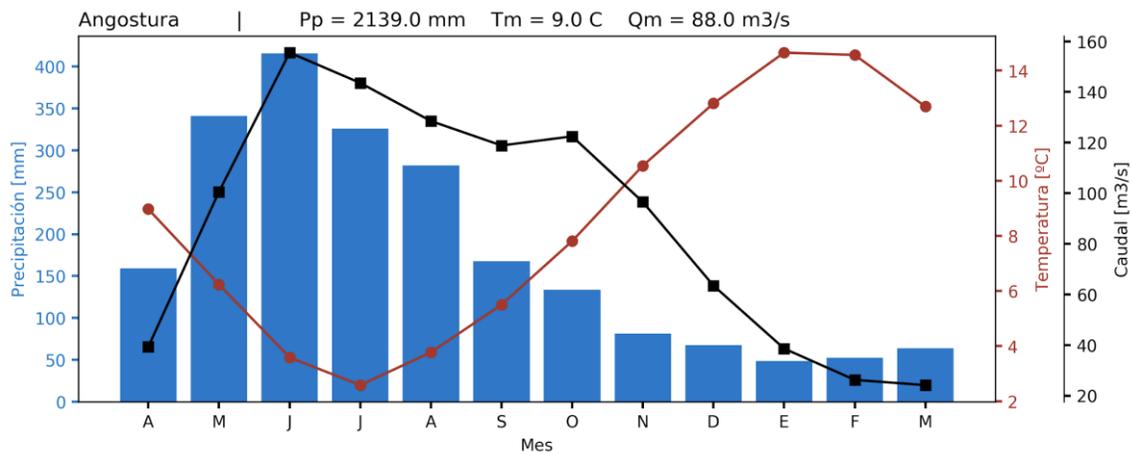


Figura 2.17. Valores mensuales de precipitación (barras), temperatura (curva con puntos rojos) y caudal (curva con puntos negros), para el punto de control de los afluentes a la cuenca intermedia de Angostura. En la parte superior del gráfico se indican los valores medios de estas tres variables. Fuente: elaboración propia.

### 2.1.5 Cuenca del río Pullinque

La cuenca asociada a la central Pullinque se caracteriza por tener precipitaciones que se concentran mayormente entre los meses de mayo y agosto, con un máximo durante junio, según lo que se muestra en la Figura 2.18. Los caudales de esta cuenca presentan un comportamiento similar al de las precipitaciones, sin que se produzcan alzas durante la temporada en que las temperaturas comienzan a aumentar.

La central Pullinque aprovecha las aguas afluentes de sectores cordilleranos de las regiones de La Araucanía y Los Ríos, siendo, además, su caudal regulado por el lago Calafquén y la laguna Pullinque. Su ubicación geográfica general se muestra en la Figura 2.19.

La inclusión de esta cuenca se basa principalmente en su ubicación geográfica, la que permite cubrir espacialmente de forma uniforme las zonas donde se concentran la mayor cantidad de centrales Hidroeléctricas.

La Tabla 2.13 presenta un resumen de las características geomorfológicas del punto de control, así como también de las centrales Hidroeléctricas ubicadas en su interior.

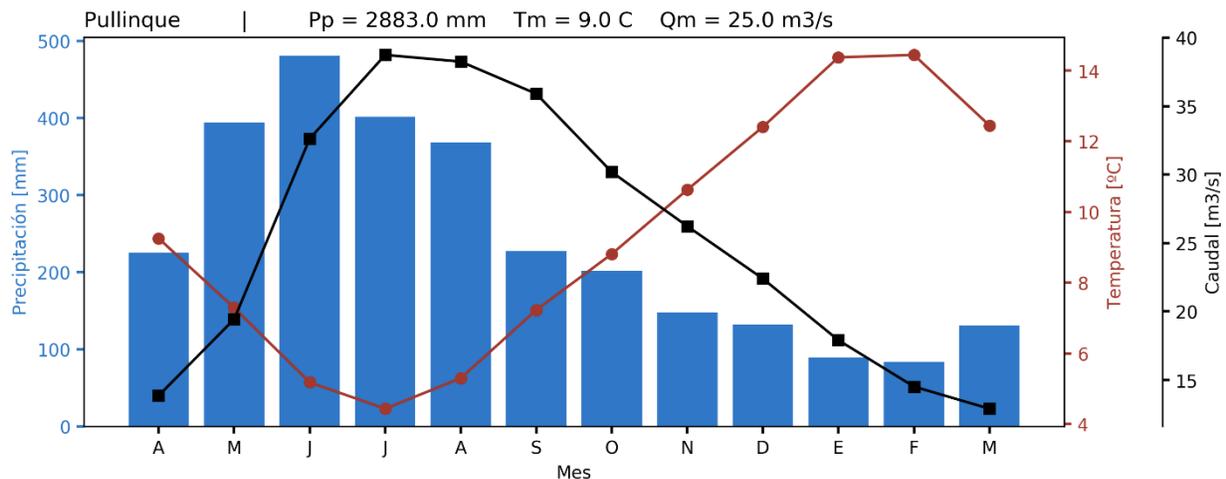


Figura 2.18. Valores mensuales de precipitación (barras), temperatura (curva con puntos rojos) y caudal (curva con puntos negros), para el punto de control de la central Pullinque. En la parte superior del gráfico se indican los valores medios de estas tres variables. Fuente: elaboración propia.

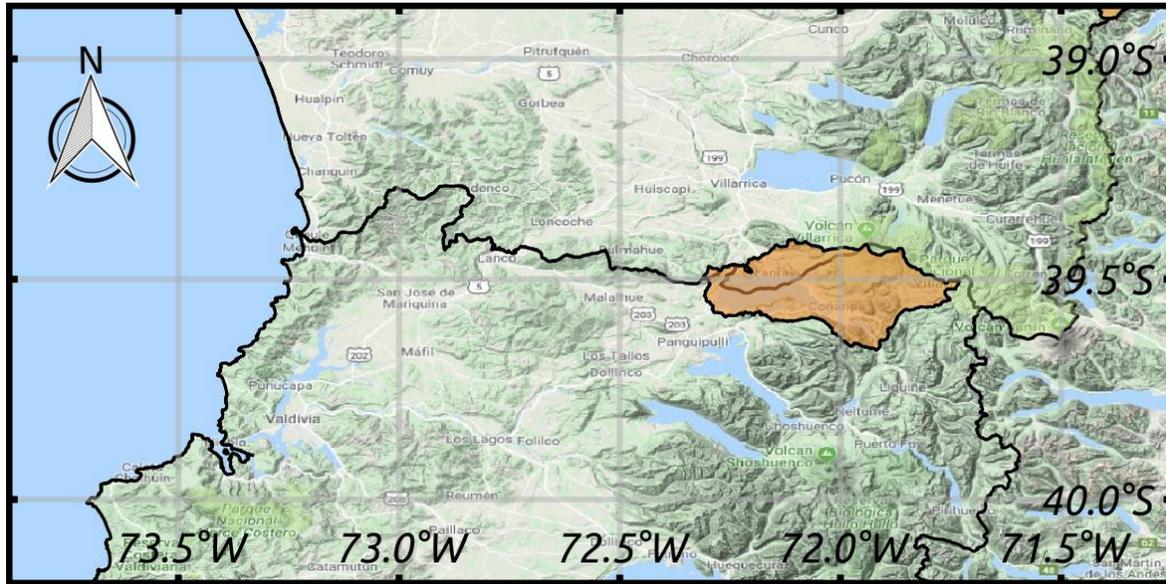


Figura 2.19. Mapa de la zona representativa del punto de control de la central Pullinque (destacada en color naranja). Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.13. Resumen de características asociadas al punto de control de Pullinque. Se destaca nombre del punto, nombre en código, cuenca principal, tipo de régimen de caudales, caudal medio (m<sup>3</sup>/s), área total (km<sup>2</sup>), altura (mínima, media y máxima; en msnm), capacidad instalada total (MW), centrales Hidroeléctricas operativas asociadas, embalses artificiales asociados, y lagos o lagunas. Fuente: elaboración propia.

Punto de control		Pullinque
Nombre en código		Pullinque
Cuenca principal		Lago Calafquén
Tipo de régimen		Pluvial
Caudal medio (m <sup>3</sup> /s)		25
Área total (km <sup>2</sup> )		768
Altura (msnm)	Mínima	205
	Media	714
	Máxima	2.846
Capacidad instalada total (MW)		51
Centrales Hidroeléctricas operativas asociadas		Pullinque (51 MW; pasada – ENEL)
Embalses asociados		No posee
Lagos o lagunas asociadas		Laguna Pullinque, Lago Calafquén, Lago Pellaifa

## 2.1.6 Cuenca de la central Canutillar

La zona del Lago Chapo se caracteriza por presentar precipitaciones que se concentran mayormente entre los meses de mayo y agosto (según se aprecia en la Figura 2.20). Los caudales emulan el comportamiento de las precipitaciones, experimentando las mayores crecidas en los meses en que los montos de precipitación son mayores. No se aprecia un crecimiento de los caudales durante la época de deshielo.

De acuerdo a la Figura 2.21, la cuenca del Lago Chapo se encuentra hacia el este de la ciudad de Puerto Montt, en la región de Los Lagos. Las aguas de este cuerpo de agua son aprovechadas por la central Canutillar, la que luego vierte este caudal hacia el estuario de Reloncaví.

La Tabla 2.14 presenta un resumen de las características geomorfológicas del punto de control, así como también de las centrales Hidroeléctricas ubicadas en su interior.

**Tabla 2.14. Resumen de características asociadas al punto de control del Lago Chapo. Se destaca nombre del punto, nombre en código, cuenca principal, tipo de régimen de caudales, caudal medio (m<sup>3</sup>/s), área total (km<sup>2</sup>), altura (mínima, media y máxima; en msnm), capacidad instalada total (MW), centrales Hidroeléctricas operativas asociadas, embalses artificiales asociados, y lagos o lagunas. Fuente: elaboración propia.**

Punto de control	Lago Chapo	
Nombre en código	Chapo	
Cuenca principal	Lago Chapo	
Tipo de régimen	Pluvial	
Caudal medio (m <sup>3</sup> /s)	57	
Área total (km <sup>2</sup> )	612	
Altura (msnm)	Mínima	248
	Media	743
	Máxima	1910
Capacidad instalada total (MW)	170	
Centrales Hidroeléctricas operativas asociadas	Canutillar (170 MW; embalse– Colbún)	
Embalses asociados	No posee	
Lagos o lagunas asociadas	Lago Chapo	

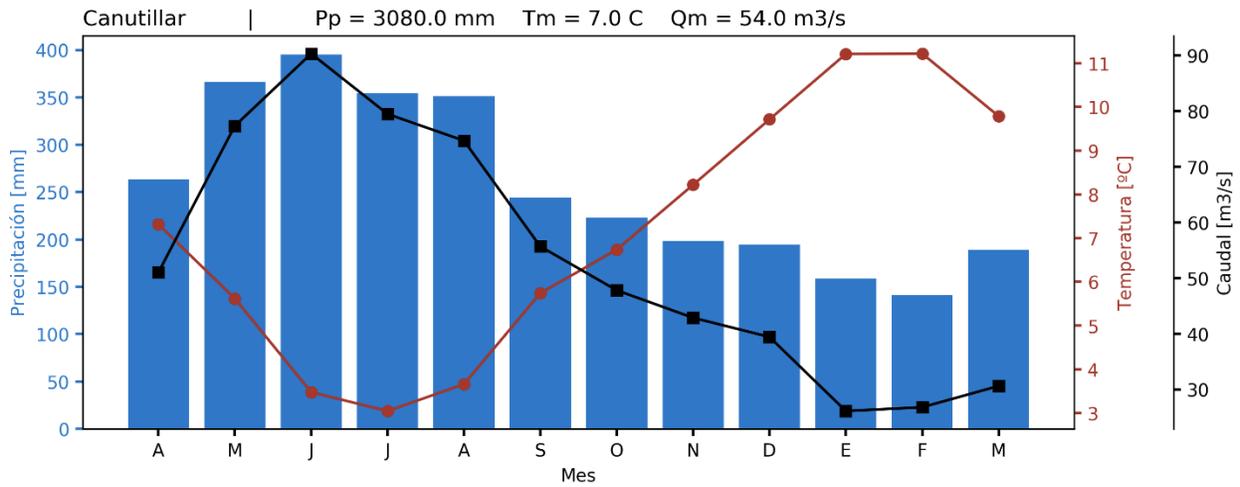


Figura 2.20. Valores mensuales de precipitación (barras), temperatura (curva con puntos rojos) y caudal (curva con puntos negros), para el punto de control del Lago Chapo. En la parte superior del gráfico se indican los valores medios de estas tres variables. Fuente: elaboración propia.

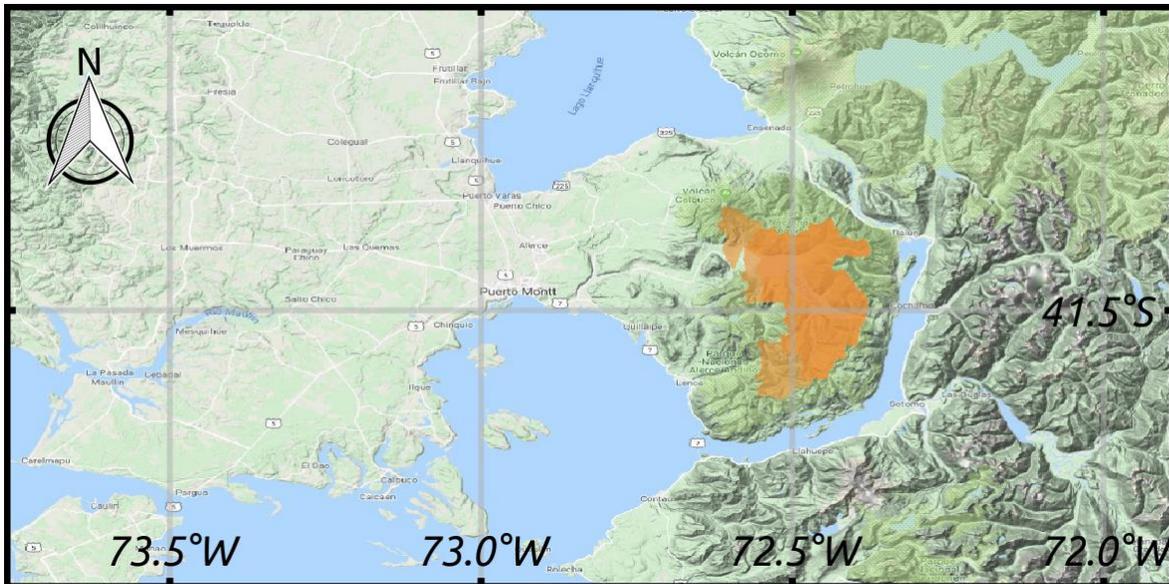


Figura 2.21. Mapa de la zona representativa del punto de control de los afluentes al Lago Chapo (destacada en color naranja). Fuente: elaboración propia.

### 3 Planteamiento de Metodología de trabajo

En este estudio se busca identificar si es que la estadística de caudales con que se cuenta actualmente seguirá siendo válida en el periodo futuro comprendido entre los años 2020-2050. Para realizar esto, conceptualmente, se propone proyectar mediante el uso de herramientas de modelación caudales para dicho periodo, incorporando información de cambio climático a través de forzantes meteorológicas. Si se cuenta con esta información, es posible realizar una comparación entre las series de caudales futuros y las series de caudales históricos, para validar si es que corresponden a una misma distribución. Si esto fuera cierto, la estadística mantendría su validez. De lo contrario, se podría concluir que la estadística histórica no será representativa de lo que ocurra en periodos futuros, y deberá por tanto ser modificada de alguna forma o derechamente descartada como insumo de planificación. En el desarrollo de este capítulo se plantea una descripción metodológica general de cómo realizar lo anterior, seguido por el desarrollo de cada uno de los puntos que se plantean.

#### 3.1 Descripción metodológica general

En la descripción más general posible, la metodología propuesta consiste en realizar una comparación entre caudales históricos y caudales proyectados para el periodo futuro 2020-2050 mediante el uso de herramientas de modelación hidrológica.

En la Figura 3.1 se muestra un esquema de la metodología. En una primera instancia, basado en la información de estadística de caudales, se selecciona un conjunto de puntos de control sobre los que aplicar la metodología. En este caso, se utilizarán los puntos que se obtuvieron como resultado del análisis de la sección 2. Para cada uno de estos puntos se desarrolla un modelo hidrológico, utilizando observaciones meteorológicas e información topográfica. El objetivo de esto es obtener una herramienta que permita la representación de los procesos físicos que ocurren al interior de la cuenca, de manera que se pueda simular la respuesta natural de la cuenca a distintas condiciones de forzantes meteorológicas.

Una vez que se cuente con estos modelos que simulan adecuadamente la respuesta hidrológica de cada cuenca, es posible utilizarlos para estimar series de caudales futuros. Para lograr esto, es necesario contar con estimaciones de forzantes meteorológicas proyectadas a futuro. Esta información será obtenida desde Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés). Estos modelos son el fruto de esfuerzos colaborativos a nivel mundial para representar las condiciones del clima futuro, según lo proyectado en escenarios de desarrollo factibles del siglo XXI y proveen series de información meteorológica para todo el planeta. Esta información debe ser pre-procesada a través de un escalamiento estadístico con el fin de que represente adecuadamente la climatología a una escala regional. Posterior a este ajuste, es utilizada en conjunto con los modelos hidrológicos para obtener series de caudales proyectadas para el periodo futuro.

Paralelamente, es posible utilizar reanálisis atmosféricos (un tipo de producto climático cuyo objetivo es representar el periodo histórico) en conjunto con los modelos hidrológicos, para extender retrospectivamente, basado en principios de representación física, la serie de caudales hasta principios del siglo XX, con el fin de aumentar la base de datos para los procesos históricos.

Como resultado de este proceso, se obtendrá para cada uno de los modelos, asociados a cada punto de control, múltiples series de caudales proyectados para el periodo futuro, gracias al uso de GCM y de distintos reanálisis. Dependiendo de si es que la estadística histórica sigue siendo o no válida, esta información podría incorporarse como base de datos adicional o bien, como su reemplazo.

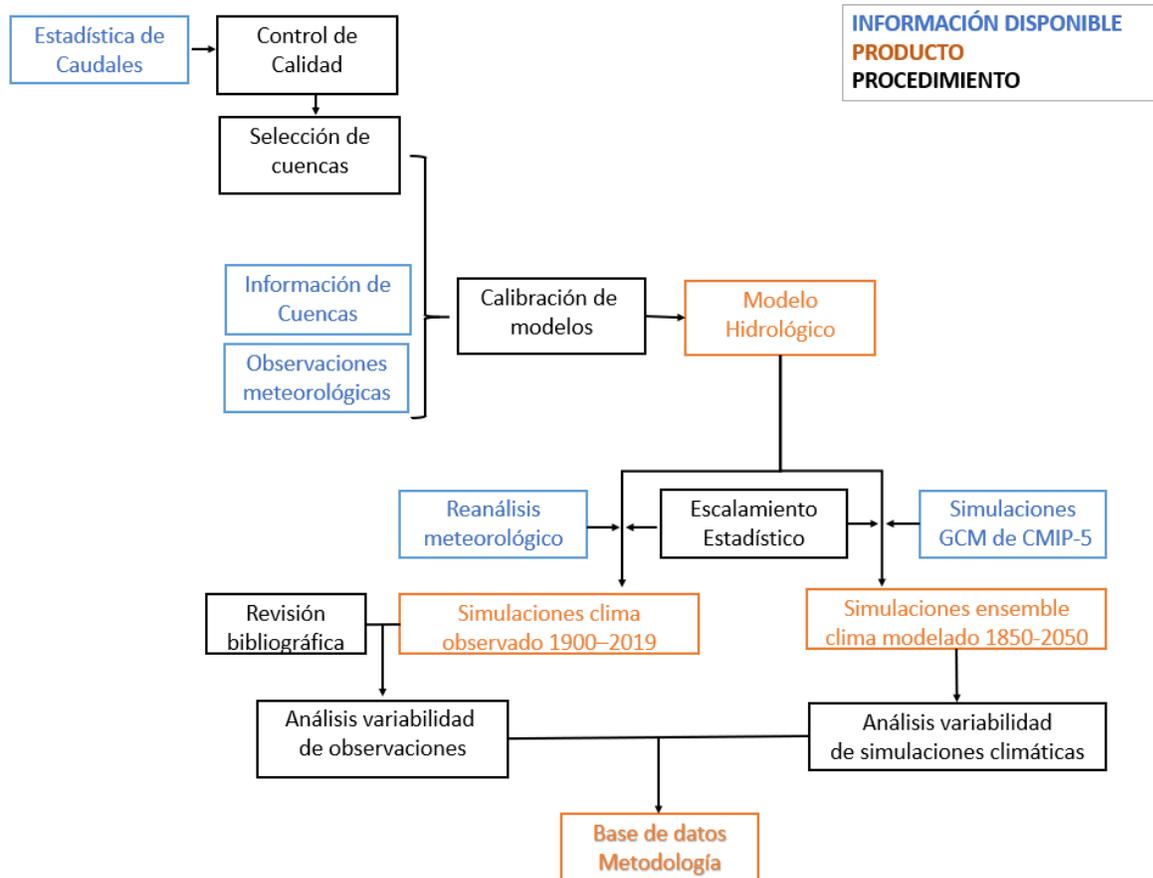


Figura 3.1. Esquema de la metodología de trabajo propuesto.

## 3.2 Modelación Hidrológica

Con el objetivo de estudiar el comportamiento de cada una de las cuencas presentadas en la sección anterior, se plantea desarrollar un modelo hidrológico para cada una de ellas. Un modelo hidrológico corresponde a una herramienta de representación de las cuencas, a través de la cual se pueden simular los caudales que se originan de ellas, y cuyo desarrollo requiere de dos insumos fundamentales:

- i. Información de entrada: forzantes meteorológicas, características topográficas de la cuenca, uso de suelo, entre otras.
- ii. Un conjunto de ecuaciones, las cuales representan la interacción que ocurre entre los distintos elementos del punto anterior, y que entrega como resultado final un valor de caudal simulado.

El correcto uso de estos dos elementos permite obtener una herramienta que represente adecuadamente los procesos físicos que ocurren dentro de una cuenca y, por tanto, analizar y estimar las condiciones en distintos casos, ya sean históricos o futuros, para los que no se cuenta con información.

En el mundo de los modelos hidrológicos, existen múltiples opciones, con diversas características. Existen diferencias en el enfoque espacial que se toma, como, por ejemplo:

- modelos agregados: aquellos que representan una cuenca como un solo elemento, como por ejemplo GR4J-SRG [5],
- modelos distribuidos: aquellos que subdividen una cuenca en múltiples unidades homogéneas según algún criterio, como por ejemplo VIC [6], SWAT [7] y DHSVM [8].

Otra categorización posible corresponde a la forma en que las ecuaciones representan la cuenca, como, por ejemplo:

- modelos empíricos, que se basan en relaciones observadas. Un ejemplo de esto son las relaciones establecidas en [9] para la estimación de crecidas máximas en función de un evento de precipitación.
- modelos conceptuales, que realizan algunas simplificaciones pero que buscan representar la realidad, como por ejemplo HBV [10] y WEAP [11].
- modelos físicos, que buscan representar adecuadamente los flujos que pueden ocurrir al interior de las cuencas, como por ejemplo la escorrentía, la evaporación y la infiltración. Ejemplo de este tipo de modelos son VIC, Sacramento [12] y NOAH-MP [13].

En particular, este último tipo de modelos resultan muy útiles, ya que permiten inferir información sobre procesos que de otra manera resultarían muy costosos y difícil estimar

(como, por ejemplo, la evaporación desde un cierto tipo de suelo o la sublimación del manto nival).

### 3.2.1 Forzantes Meteorológicas y fuentes de información complementarias

La delimitación de áreas de las cuencas en estudio ya se encuentra previamente definida en la selección de la sección anterior. Sin embargo, para efectos de modelación, cada una de ellas se separa en bandas de elevación de igual intervalo de elevación, utilizando como base para esto el modelo de elevación digital SRTM (Shuttle Radar Topography Mission [14]).

Para generar las forzantes meteorológicas en el periodo histórico, se utilizará la base de datos CR2MET. Este producto consiste en una base de datos de precipitación y temperaturas (medias, máximas y mínimas), a una escala temporal **diaria** y en una grilla de resolución aproximada de **5x5 km**. Esta base de datos fue desarrollada originalmente por la Dirección General de Aguas (DGA), en el estudio referido en [15] y en colaboración con el Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR2). Este producto entrega información para todo el periodo comprendido entre los años 1979 y 2018.

El desarrollo de este producto se basa en una regionalización de variables proporcionada por un reanálisis, así como el análisis de registros locales y de información de percepción remota. Un reanálisis corresponde a un producto meteorológico que transforma grandes cantidades de observaciones de diversos tipos (mediciones en superficie, radiosondeos, información satelital) de múltiples variables (temperatura, presión, viento, humedad, etc.) en estimaciones continuas globales, para un periodo histórico. esto se logra utilizando técnicas de modelación atmosféricas y oceánicas en conjunto con sistemas de asimilación de datos. Dentro de estos productos de reanálisis, destaca el denominado ERA5, cuya sigla hace referencia a *European Center for Medium-Range Weather Forecasts, (ECMWF) ReAnalysis*, en su quinta versión. Adicionalmente, se integra información topográfica en el desarrollo de los productos, para representar de mejor forma la compleja orografía del país, desde modelos de elevación digital satelital SRTM.

Debido a que las forzantes meteorológicas se encuentran en una escala espacial más fina (25 km<sup>2</sup>) que las bandas de elevación (habitualmente en los cientos de km<sup>2</sup>), esta información es agregada espacial y consecuentemente a las bandas de elevación definidas anteriormente. El tipo y uso de suelo de cada cuenca quedará determinado para cada una de las bandas por medio de procesos geoespaciales aplicadas a las capas de *MODIS Land cover* [16].

### 3.2.2 Modelo VIC

La modelación hidrológica se realiza mediante el modelo hidrológico Variable Infiltration Capacity (VIC), desarrollado originalmente en [6], y cuyo esquema conceptual se presenta en

la Figura 3.2 Este modelo es de tipo distribuido y de base física. En su planteamiento, representa procesos de evapotranspiración, acumulación y derretimiento de nieve, interceptación, lagos, entre múltiples otros. A nivel de suelo, este se encuentra representado por tres distintos estratos y permite la representación de distintos tipos y usos de suelo. En este modelo, se busca representar todos los flujos al interior de la cuenca. Por ejemplo, la evapotranspiración corresponde a la suma de la evaporación desde suelo desnudo, evapotranspiración desde la vegetación y la evaporación del agua acumulada en el follaje. La acumulación puede ser superficial (nieve o glaciares, por ejemplo) o subterránea, la que se representa mediante las humedades del suelo en las distintas capas. La precipitación corresponde a la única entrada de agua al elemento de modelación. La correcta representación de estos procesos resulta crítica si es que se pretende utilizar este modelo para estudios de sensibilidad a variaciones climáticas, ya que distintos procesos representan distintas sensibilidades a diferentes variables.

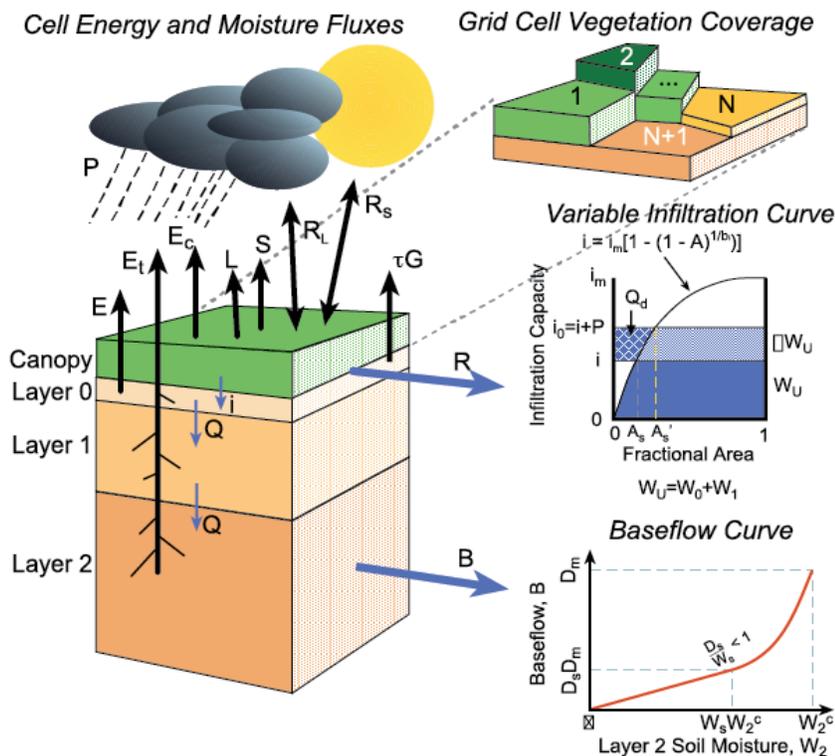


Figura 3.2. Esquema conceptual del planteamiento físico del modelo VIC. En ella se representan los principales flujos de cada celda de modelación: P (precipitación sobre la celda de modelación), R (escorrentía directa), B (flujo base), E (evaporación desde el suelo),  $E_t$  (evapotranspiración),  $E_c$  (evaporación desde el follaje de vegetación),  $i$  (infiltración al suelo),  $Q$  (flujos entre distintos estratos de suelo),  $L$ ,  $S$  (flujos de calor latente y sensible respectivamente),  $R_L$  y  $R_S$  (flujos de onda larga y corta, respectivamente) y  $\tau G$  (flujo de calor desde el suelo). Además, los esquemas central e inferior del costado izquierdo presentan esquemas de los planteamientos físicos de descarga de  $R$  y  $B$ , que dan cuenta del planteamiento físico del modelo, el cual puede ser revisado en detalle en Liang, 1994. El panel superior del costado izquierdo da cuenta de la versatilidad del modelo que permite la inclusión de diferentes coberturas de suelo para una misma unidad de modelación. Fuente: VIC model Overview

Este modelo no presenta un esquema de ruteo de caudales, por lo que la agregación temporal de los caudales obtenidos desde cada unidad debe ser realizada de forma externa. En este caso, el ruteo de caudales desde cada unidad de modelación se hace por medio del tiempo de concentración de cada banda con respecto al punto de definición de la cuenca, suponiendo valores de flujo constante en el río.

La ecuación principal de este modelo se basa en un balance de masa simple, donde el único ingreso de agua posible es a través de la precipitación. En función de esto, el modelo opera básicamente con la ecuación:

$$P = R + B + E + E_T + E_C + \Delta S$$

Donde:

$P$  = precipitación

$R$  = escorrentía superficial, asociada al estrato superficial

$B$  = flujo base, asociado al estrato inferior

$E$  = evaporación desde suelo

$E_T$  = evapotranspiración desde vegetación

$E_C$  = evaporación del agua acumulada en el follaje

$\Delta S$  = variación de almacenamiento en los estratos, asociado a flujos verticales que ocurren, así como a los términos de  $R$  y  $B$ .

Debido a que este modelo presenta una base física y que cada uno de estos términos representa un proceso, cada uno de ellos está parametrizado por complejas ecuaciones cuya descripción escapa los alcances de este informe. Para mayor detalle de estos términos se refiere al lector a [6], donde cada término se describe en minucioso detalle.

Para este ejercicio de modelación en específico, se propone implementar un modelo para cada cuenca, bajo las siguientes condiciones:

1. Distribución espacial: cuenca dividida según bandas de elevación. Debido a los procesos asociados al manto nival, se propone separar espacialmente distintas bandas de elevación al interior de las cuencas, de manera que su meteorología y procesos queden bien representados. Las bandas de elevación son definidas en intervalos de 250 metros, regulares. Estos intervalos son predefinidos entre 0-250 metros, 250-500 metros y así sucesivamente.
2. Escala temporal diaria: se considera que este es un paso de tiempo suficiente para representar adecuadamente los procesos y flujos que ocurren al interior de la cuenca (principalmente asociados al manto nival). Esto implica que los caudales serán calculados a escala diaria, pero serán agregados temporalmente a escala semanal para efectos de comparación con datos de la estadística.

3. Agregación temporal de caudales: se realiza el ruteo de los caudales provenientes desde las distintas unidades utilizando un hidrograma<sup>2</sup> unitario, donde los parámetros que lo definen se considerarán dentro del proceso de calibración.

### 3.2.3 Proceso de Calibración

Para que un modelo hidrológico logre representar de manera adecuada la hidrología de una cuenca, es necesario realizar un proceso de calibración de los parámetros que este utiliza. Este proceso consiste en determinar los valores de los parámetros del modelo, de forma tal que los caudales simulados sean lo más similares posibles a los caudales observados, según algún índice de desempeño. En este paso resulta crítico contar con información de caudales idealmente en condiciones de régimen natural o, en su defecto, naturalizados a través de algún balance de masa (esta condición se cumple para todas las cuencas seleccionadas en este estudio).

Se propone la utilización de cinco indicadores de desempeño distintos, los cuales se presentan en la Tabla 3.1. La utilización de distintos indicadores de desempeño se basa en que, debido a sus distintas formulaciones, algunas secciones del hidrograma quedan mejor representadas que otras según cual índice se utilice. Esto permite abordar el denominado problema de la equifinalidad, el cual consiste en que existe una gran cantidad de combinaciones de parámetros que entregan una solución razonable para un modelo hidrológico. Así, al obtener múltiples sets de parámetros que representan una solución aceptable, es posible seleccionar finalmente el conjunto de parámetros que mejor represente los procesos más relevantes del estudio que se está desarrollando.

De estos indicadores de desempeño, el error cuadrático medio y el error porcentual medio mensual absoluto varían entre valores teóricos desde cero a infinito, donde cero corresponde al valor óptimo, y sería una representación exacta de la serie observada. Por otro lado, todos los índices de eficiencia presentados tienen un rango de valores que varía entre menos infinito y 1, siendo 1 el valor óptimo.

El proceso de calibración se realizará de forma automática, por medio del uso de una librería computacional implementada en Python llamada SPOTPY [17]. Dentro de dicho paquete de herramientas, se encuentran implementados tanto sistemas de optimización como métodos de cálculo de indicadores de desempeño, incluido el KGE, pero que también permite la implementación de índices personalizados, como por ejemplo en este caso el MAPE. Utilizar esta librería conlleva que la estructura del modelo VIC debe ser incorporada dentro de

---

<sup>2</sup> Un hidrograma es un gráfico que muestra la variación en el tiempo de caudal. En particular, un hidrograma unitario es la curva básica de respuesta distribuida en el tiempo que una cuenca devuelve ante el ingreso de una unidad de precipitación.

algunas subrutinas que esta librería utiliza. Estas subrutinas son las que posteriormente son utilizadas por uno de los algoritmos de optimización, para estimar los parámetros del modelo que mejor se ajustan a las observaciones.

Tabla 3.1. Indicadores de desempeño utilizados en el proceso de calibración automática. Fuente: elaboración propia.

Nombre	Sigla	Fórmula de cálculo
Error cuadrático medio	RMSE	$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Q_{sim}(i) - Q_{obs}(i))^2}{n}}$
Error porcentual medio mensual absoluto	MAPE	$MAPE = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^T \left  \frac{Q_{obs}(i) - Q_{(i)}}{Q_{obs,t}} \right $
Eficiencia de Nash-Sutcliffe	NSE	$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_{sim,t} - Q_{obs,t})^2}{\sum (Q_{obs,t} - \mu_{obs})^2}$
Eficiencia logarítmica de Nash-Sutcliffe	log NSE	$\log \log NSE = 1 - \frac{\sum (\log(Q_{sim,t}) - \log(Q_{obs,t}))^2}{\sum (\log(Q_{obs,t}) - \log(\mu_{obs}))^2}$
Eficiencia de Kling-Gupta	KGE	$\beta = \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}}$ $\alpha_{KG} = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}}$ $r_p = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) - \mu_{obs})(Q_{sim}(i) - \mu_{sim})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) - \mu_{obs})^2\right) \left(\sum_{i=1}^n (Q_{sim}(i) - \mu_{sim})^2\right)}}$ $R_{KG} = 1 - \sqrt{(\beta - 1)^2 + (\alpha_{KG} - 1)^2 + (r_p - 1)^2}$

Se propone utilizar como algoritmo de calibración el denominado *Latin Hypercube Sampling*. Esta técnica genera una matriz de combinaciones, considerando las funciones de parámetros por calibrar, utilizando un algoritmo semi-aleatorio que permite una representación uniforme del espacio de soluciones de parámetros. Fue originalmente planteada en [18] y ha sido aplicado en contextos de problemas de hidrología en varios estudios ([19]; [20]).

Los pasos que realiza este algoritmo son los siguientes:

1. Obtiene valores de rango para cada parámetro, desde la información provista del espacio factible de cada parámetro.
2. Crea una matriz de hipercubo según el procedimiento de [18].
3. Corre una simulación con cada celda de la matriz del hipercubo, que representa una combinación de parámetros.
4. Guarda cada simulación corrida
5. Evalúa el mejor set de parámetros.

La ventaja que presenta este algoritmo es que permite recorrer todo el espacio de las combinaciones posibles de parámetros a través de la selección de una muestra representativa del mismo, sin tener que abarcarlo todo de forma completa.

Como buena práctica, y facilitado por la gran cantidad de información fluviométrica disponible, la serie de observaciones se separa en un periodo de calibración (1990 a 2018) y un periodo de validación (1980 a 1989). Esta práctica consiste en que se define un subconjunto de los datos que es utilizado para realizar el proceso de calibración del modelo hidrológico (el periodo de calibración) del cual se obtienen conjuntos de parámetros. Estos conjuntos de parámetros son posteriormente utilizados para simular los caudales del periodo de validación. Los caudales simulados en el periodo de validación representan una muestra completamente independiente de las observaciones, ya que las observaciones del periodo de validación no fueron consideradas en el proceso de generación de los parámetros. Esto permite que la comparación entre los caudales simulados y observados en el periodo de validación sea una evaluación efectiva de la capacidad predictiva efectiva del modelo.

#### 3.2.4 Selección final de parámetros

Como resultado del proceso de calibración, se obtienen múltiples conjuntos de parámetros en función de los distintos indicadores de desempeño planteados (5 en total). Sin embargo, un buen desempeño de un indicador de desempeño no asegura necesariamente que se tenga un buen valor en otro indicador de desempeño distinto. Por ejemplo, un buen desempeño según el error cuadrático medio no necesariamente asegura un buen valor del índice de eficiencia KGE, ya que el primero se enfoca principalmente en las diferencias entre valores observados y simulados, mientras que el segundo considera dentro de su formulación una componente de consecuencia temporal que no necesariamente queda bien representada. Se hace necesario entonces plantear un esquema universal de evaluación que permita elegir un conjunto de parámetros en base a todos los resultados de los distintos procesos de calibración asociados a cada indicador en cada cuenca.

El esquema universal de evaluación propuesto se basa en calcular distintas métricas evaluativas, que aborden distintos aspectos del hidrograma, para cada una de las diez

mejores simulaciones obtenidas con cada uno de los indicadores de desempeño. Esto quiere decir que se tendrá un conjunto de las 50 mejores simulaciones, para las cuales se calcularán distintos indicadores que reflejen la representatividad específica de algunas características de los hidrogramas. Por ejemplo, el coeficiente de determinación  $r^2$  describe la correlación temporal que tiene la serie simulada con la observada. El error cuadrático medio entrega información de cómo son estimados los caudales medios. Adicionalmente a estos índices que son comúnmente conocidos, es posible añadir otros indicadores adicionales, conocidos como *índices hidrológicos* ([21], [21b]). Estos índices hidrológicos tienen que ver con distintas secciones del hidrograma, como por ejemplo los caudales de menor probabilidad de excedencia (los más altos), o los de mayor probabilidad de excedencia (caudales más bajos). De particular interés resultan los siguientes indicadores:

- a. *biasFHV*, que entrega información sobre la diferencia entre los caudales que exceden un 10% de la serie observada y simulada.
- b. *biasFMS*, el cual estima el valor del sesgo de la pendiente en la sección media de la curva de duración de los caudales, considerando todos aquellos comprendidos en el intervalo entre un 20% y un 70% de probabilidad de excedencia.
- c. *biasFLV*, que entrega información sobre el sesgo que existe entre los caudales que presentan probabilidades de excedencia mayores a un 70%.

Valores positivos de estos índices indican que el modelo sobrestima los caudales a los que hacen referencia, mientras que valores negativos indican una subestimación.

En función de lo expuesto por CNE, se plantea el esquema universal de evaluación de la siguiente ecuación:

$$P.F. = \frac{KGE + \frac{100 - |MAPE_{men}|}{100}}{2}$$

Donde se tiene que:

- a) *KGE* representa el índice de eficiencia de Kling-Gupta entre la serie simulada y la serie observada completa.
- b) *mape<sub>men</sub>* es el error porcentual mensual medio de los periodos de calibración y validación en conjunto

Sin embargo, la selección final requiere de un último filtro de criterio experto en el que en casos excepcionales fueron modificados, en forma particular para algunas de las cuencas. Un detalle del resultado del proceso de calibración se muestra en la Tabla 3.2. Se detalla adicionalmente el set de parámetros seleccionado, por medio del indicador de desempeño

que lo generó y su posición en el ranking local de las simulaciones generadas bajo ese conjunto.

El índice de eficiencia KGE es comúnmente utilizado en la literatura para evaluar modelos hidrológicos y se muestra como referencia para cada una de las calibraciones. Este índice de eficiencia, como se mostró en la Tabla 3.1, considera dentro de su definición los valores medios observados y simulados, el coeficiente de determinación entre las series observada y simulada, y las desviaciones estándar de cada serie, abarcando múltiples aspectos como que se represente bien la media, la correlación temporal y la variabilidad. Se recuerda que el valor óptimo de este índice es 1, y se hace notar que en la literatura usualmente es posible encontrar que un modelo hidrológico se considera con buen desempeño si es que presenta valores superiores a 0,7.

El valor promedio de este índice considerando todas las cuencas es 0,87 en el periodo de calibración y 0,85 en el periodo de validación. El valor promedio obtenido para el periodo de calibración es esperable debido al eficiente proceso de calibración automática realizada, pero el valor promedio obtenido en el periodo de validación permite confirmar que los modelos tienen capacidad predictiva de los caudales y que los buenos resultados en el periodo de calibración no corresponden a un sobreajuste de la serie que se busca representar.

**Tabla 3.2. Resultados del proceso de calibración de los 13 puntos de control en que se calibraron modelos hidrológicos.**  
Fuente: elaboración propia.

Punto de control	KGE		NSE		Indicador	Ranking Local
	Cal	Val	Cal	Val		
Rapel	0,84	0,81	0,81	0,66	rmse	4
Embalse Melado	0,89	0,88	0,81	0,77	rmse	5
Laguna Invernada	0,91	0,83	0,82	0,66	kge	32
Laguna Maule	0,74	0,72	0,47	0,40	mape	14
Hoya intermedia Pehuenche	0,88	0,80	0,75	0,67	rmse	9
Hoya intermedia Colbún	0,87	0,84	0,76	0,68	kge	10
Laguna Laja	0,87	0,90	0,84	0,80	kge	1
Antuco	0,83	0,86	0,83	0,78	rsme	1
Ralco	0,92	0,92	0,89	0,86	kge	6
Huequecura	0,87	0,84	0,85	0,81	rmse	173
Angostura	0,89	0,86	0,78	0,78	rmse	2
Pullinque	0,92	0,92	0,84	0,85	rmse	72
Canutillar	0,91	0,92	0,84	0,87	mape	0

Adicionalmente, se muestran los valores del índice de eficiencia NSE, también definido en la Tabla 3.1. Este índice está más relacionado, debido a su definición, con el error medio entre

las series de caudales observados y simulados, y al igual que el KGE, se tiene que valores sobre 0,7 son considerados aceptables en la literatura. El valor promedio de este índice es de 0,79 para el periodo de calibración y de 0,74 para el periodo de validación, teniendo todos los valores por sobre 0,7 en el periodo de calibración, con excepción de Laguna Maule, y con cinco valores bajo 0,7 en el periodo de validación (Rapel, Laguna Invernada, Laguna Maule, Hoya intermedia Pehuenche y Hoya Intermedia Colbún) aunque con valores relativamente aceptables ( $>0,6$ ) con excepción de Laguna Maule. Esto sugiere que debiese haber espacio para mejoras en la calibración de estas cuencas, aunque de todas formas se considera que sus respectivos modelos presentan una calibración aceptable.

A modo de ejemplo, en la Figura 3.3 se presenta una figura ilustrativa del resultado del proceso de calibración para la cuenca definida por el punto de control Ralco. En esta figura de 5 paneles, se muestra lo siguiente:

- a) Panel izquierdo superior: comparación de la serie de caudales observados (en negro), simulados para el periodo de calibración (en azul), y simulados para el periodo de validación (en naranja), a una escala de tiempo semanal
- b) Panel izquierdo central: equivalente a la figura anterior, pero los caudales se encuentran agregados a escala temporal mensual.
- c) Panel izquierdo inferior: equivalente a la figura anterior, pero los caudales se encuentran agregados a escala temporal anual.
- d) Panel derecho superior: comparación de las curvas de variación estacional entre los caudales observados (líneas en negro) y los caudales simulados para los periodos de calibración (en azul) y validación (en naranja). En el caso de las curvas de caudales observados, se observa una línea continua, cuyos valores fueron calculados consecuentemente con el periodo de calibración y una línea punteada, cuyos valores fueron calculados consecuentemente con el periodo de validación.
- e) Panel derecho central: comparación entre las curvas de duración de los caudales observados y simulados, diferenciados por periodos de calibración y validación. La escala de colores es consecuente con el panel descrito en el punto d).
- f) Sección derecha inferior: se muestran una serie de indicadores de desempeño de los caudales de calibración y simulación obtenidos. Se muestran los valores de los índices KGE y NSE, descritos en la Tabla 3.1 para todas las cuencas. Adicionalmente, se incluyen los valores de: el coeficiente de determinación  $r^2$ , el cual entrega información sobre la consecuencia temporal entre las series simuladas y observadas; el valor de *biasFHV*, asociado a los flujos de caudales altos, *biasFMS*, asociado a los

sesgos asociados a los caudales medios y bias FLS, asociado al sesgo de los caudales bajos.

En la Figura 3.3 es posible observar en las comparaciones de las series de tiempo de los caudales que existe una gran consecuencia temporal, como se puede ver en el panel inferior en la comparación de series anuales. La variabilidad interanual de los caudales queda debidamente representada, destacándose la capacidad del modelo para representar años hidrológicos húmedos y secos alternadamente, como se destaca en el cuadro verde de la figura. A nivel de variación estacional, tanto el periodo de calibración como validación muestran gran coherencia temporal en el comportamiento de los caudales. Finalmente, la comparación de las CD de cada periodo (calibración y validación) resultan casi indistinguibles, lo que se ve reforzando por los índices de FHV, FMS y FLV, que dan cuenta de los sesgos en las partes altas, medias y bajas de estas curvas, en unidades de %. Los valores de sesgo son menores a 10% en el caso de las secciones asociadas a los caudales altos y medios, y del orden de 10% en la sección de los caudales menores en el periodo de calibración, aunque cercanas a 30% en el periodo de validación. Sin embargo, es importante notar que este valor que parece elevado hace alusión a diferencias porcentuales en valores bajos, los cuales resultan altamente sensibles a pequeñas variaciones.

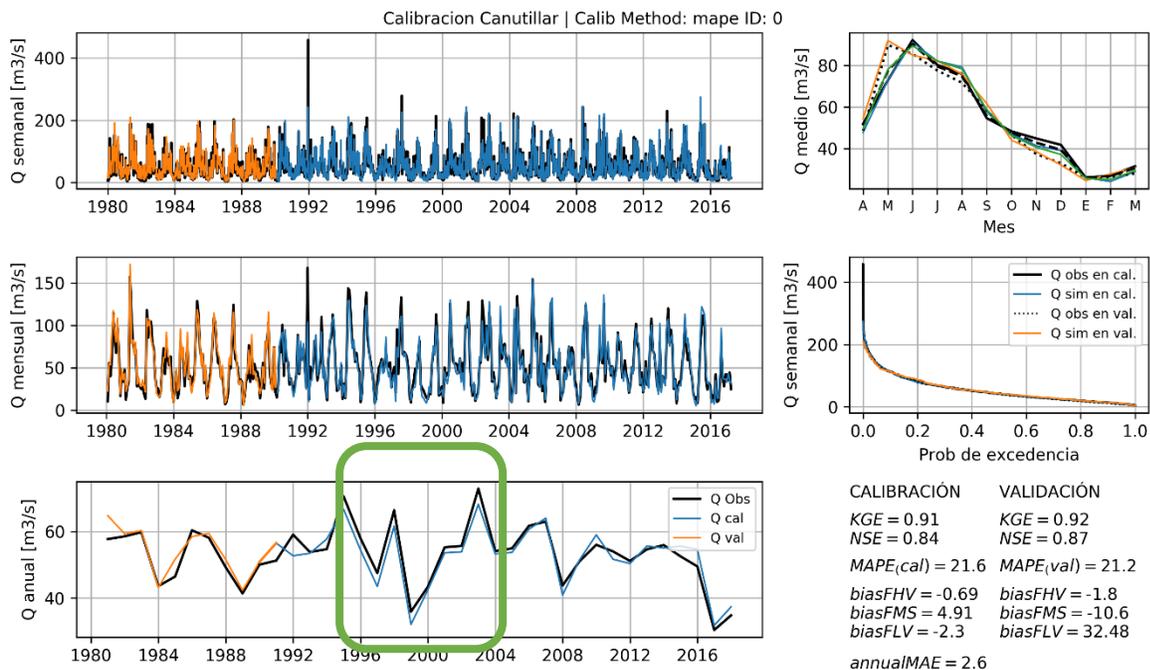


Figura 3.3. Ejemplo de resultado de calibración. Se muestran los resultados de la cuenca asociada al punto de control Canutillar. Fuente: elaboración propia.

Resulta importante destacar que el periodo de validación correspondiente a la década de 1980-1990 es una muestra independiente que no fue utilizada en el proceso de calibración. Considerando esto, las simulaciones obtenidas para ese periodo representan una muestra

totalmente independiente de la estadística y representan por tanto la capacidad predictiva de los modelos.

### 3.3 Proyecciones Meteorológicas

#### 3.3.1 Escenarios de Cambio Climático

El calentamiento global es un fenómeno global, que consiste en la alteración del sistema climático a través del aumento de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Estas alteraciones en general se perciben como un aumento de la temperatura, pero que no está limitado a esto. Existen grandes diferencias a nivel regional sobre las consecuencias del calentamiento global, y mientras que en algunas regiones del planeta se esperan aumentos de precipitaciones, en la región centro-sur de Chile se proyecta lo contrario. Esto es particularmente crítico para varias regiones de Chile, las cuales son zonas vulnerables a un déficit de precipitaciones. Esta vulnerabilidad se evidencia en el conjunto de impactos socio-económicos y ecológicos provocados por la sequía prolongada que afecta varias regiones de Chile desde 2010 [22], y que sigue actualmente.

Varios estudios basados en observaciones han descrito cambios en el régimen de precipitación de Chile y su impacto en la hidrología regional, coherentes con las tendencias esperadas en respuesta al forzamiento antrópico ([3], [23]). En particular, en [23] se analizó un periodo reciente con una tendencia negativa de precipitación muy marcada en Chile central (1979-2014). Se identificó que las causas de la tendencia observada tienen un origen tanto natural como antrópico, este último contribuyendo en aproximadamente un tercio de la señal total de cambio.

Considerando estos antecedentes, en el presente estudio se buscará evaluar el impacto de este fenómeno, utilizando series meteorológicas que den cuenta de la situación de cambio climático, en conjunto a los modelos calibrados para cada una de las cuencas. La información de las series meteorológicas bajo escenarios de cambio climáticos se obtendrá desde los llamados Modelo General de Circulación (conocidos comúnmente como GCM, por sus siglas en inglés), desarrollados en el marco del proyecto asociado de Intercomparación de modelos Acoplados (*Coupled Model Intercomparison Project*, CMIP).

Estos modelos, a diferencia de los reanálisis, no buscan reproducir exactamente el periodo histórico, sino que representar adecuadamente el sistema planetario compuesto por la atmósfera, los océanos y las masas de tierra. De esta forma, se obtienen múltiples series que representan estados posibles del sistema climático, en un mismo periodo de tiempo, bajo un mismo escenario de forzamiento atmosférico, considerando tanto las forzantes radiativas como la composición química atmosférica. Además, con este planteamiento, estos modelos buscan extrapolar las condiciones que regirán la atmósfera en periodos futuros, utilizando para esto escenarios proyectados de las variaciones de condiciones atmosféricas. En este

estudio se utilizarán las proyecciones obtenidas considerando un escenario de desarrollo RCP8.5, según lo definido en CMIP5. Este escenario es el que más se asimila a las condiciones actuales de proyección. Sin embargo, las cuatro alternativas de escenario RCP que existen (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5) presentan un desarrollo similar durante el periodo 2020-2040 en lo referente a composición química atmosférica (que, a efectos prácticos, es la forzante principal de los modelos GCM) y comienzan a divergir notoriamente posteriormente a 2040. La definición de cada escenario RCP hace referencia al nivel de radiación adicional que permanece en la atmósfera a finales de siglo con respecto a un contexto preindustrial.

Estos modelos, al ser simulaciones numéricas comprehensivas de la atmósfera, permiten obtener series de valores para todas las forzantes meteorológicas relevantes, requeridas para utilizar los modelos hidrológicos. Se utilizan las proyecciones estimadas por aproximadamente 26 modelos distintos, desarrollados por 14 instituciones, equipos o centros de investigación que se describen en la Tabla 3.3. Adicionalmente, en algunos casos se cuenta con más de un *ensemble*, es decir, con más de una ejecución de un mismo modelo. En la misma tabla, se muestra cuantos ensembles<sup>3</sup> presenta cada modelo.

**Tabla 3.3. Listado de modelos de circulación global a utilizar, de los cuales se obtendrán proyecciones de cambio climático. Fuente: elaboración propia**

Modelo	Centro de Investigación / Institución a cargo	Resolución		Ensembles
		Latitud [°]	Longitud [°]	
ACCESS1-0	Centre for Australian Weather and Climate Research	1,25	1,88	1
ACCESS1-3		1,25	1,88	1
BNU-ESM	Beijing Normal University	2,79	2,81	1
CCSM4	National Center of Atmospheric Research	0,94	1,25	2
CESM1-BGC		0,94	1,25	1
CESM1-CAM5		0,94	1,25	1
CMCC-CESM	Euro-Mediterranean Center on Climate Change	3,44	3,75	1
CMCC-CMS		3,71	3,75	1
CMCC-CM		0,75	0,75	1
CNRM-CM5	National Centre for Meteorological Research - France	1,40	1,41	1

<sup>3</sup> Un ensemble corresponde a una ejecución del modelo, para todo el periodo de estudio. Es posible que exista más de un ensemble por modelo debido a que es posible inicializar cada modelo con condiciones ligeramente distintas, lo que se traduce en otra simulación completamente diferente, pero que obedece al mismo tipo de forzamiento atmosférico. La cantidad de ensembles por modelo está definida por la disponibilidad de datos, lo que se asocia a lo desarrollado por la institución a cargo de cada GCM.

CSIRO-Mk3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	1,86	1,88	3
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis.	2,79	2,81	3
FGOALS-s2	LASG/IAP.	1,66	2,81	1
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	2,00	2,50	1
GFDL-ESM2G		2,02	2,00	1
GFDL-ESM2M		2,02	2,50	1
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre Simon Laplace	1,89	3,75	2
IPSL-CM5A-MR		1,27	2,50	1
IPSL-CM5B-LR		1,89	3,75	1
MIROC-ESM-CHEM	MIROC team	2,76	2,81	1
MIROC-ESM		2,76	2,81	1
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute	1,87	1,88	3
MPI-ESM-MR		1,87	1,88	1
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute (Japan)	1,12	1,13	1
MRI-ESM1		1,12	1,13	1
NorESM1-M	Norwegian Climate Center'	1,89	2,50	1

### 3.3.2 Escalamiento estadístico

Tanto los reanálisis climáticos como los GCM descritos anteriormente se basan en simulaciones numéricas, que abarcan todo el globo terrestre, utilizando grillas relativamente gruesas, mayores a 1,5° de resolución generalmente. Sin embargo, la escala actual de trabajo corresponde a un análisis hidrológico regional, que se está desarrollando a una resolución espacial de 0,05°x0,05°. Esta diferencia de resoluciones genera un problema de compatibilidad de la información, ya que la información de estas grillas globales no representa adecuadamente efectos locales, como por ejemplo los asociados a topografía y relieve, por lo que es imposible utilizarla directamente en estudios de carácter regional.

Para poder aplicar regionalmente la información provista por los modelos globales a una escala espacial regional, es necesario realizar un escalamiento de las variables relevantes para el estudio (en este caso, precipitación y temperaturas extremas diarias). Este proceso de escalamiento se puede realizar de múltiples formas: por un lado, existen los escalamientos de tipo físico, que corresponden a ejecutar a una mayor resolución espacial y en un área acotada algún tipo de modelo de circulación global, usando como condiciones de borde las proyecciones realizadas por los mismos GCM. Este tipo de escalamiento entrega campos consecuentes y representa adecuadamente la física de toda el área que se defina como región de modelación. Sin embargo, presentan la desventaja que son altamente

complejos de implementar y que requieren de muchos recursos computacionales para ser realizados.

Como alternativa a los métodos de escalamiento físicos, surgen entonces los métodos de regionalización estadísticos. Estos métodos se basan en el supuesto de establecer relaciones estadísticas, establecidas en el periodo de línea base, entre la información de los GCM o reanálisis, y los datos observados, los cuales son eventualmente proyectados sobre los datos a futuro bajo alguna configuración. Estos métodos presentan la ventaja de que resultan computacionalmente rápidos de calcular.

Dentro del desarrollo del estudio, se aplicarán métodos de escalamiento estadístico a la información provista tanto por los reanálisis históricos como por los GCM, con respecto a la información utilizada como base en el periodo de calibración (CR2MET), de modo de homologar las series meteorológicas en el periodo histórico. De esta forma, se podrá asegurar la validez de eventuales comparaciones. El método propuesto de escalamiento estadístico para las temperaturas diarias extremas sigue lo propuesto en [24]. Este método preserva los cambios absolutos (utilizados típicamente para temperatura) en los cuantiles de las distribuciones de probabilidad de cada variable, corrigiendo al mismo tiempo los sesgos en la distribución de frecuencia de la variable simulada, respecto de la referencia. En el caso de la precipitación, esta variable es escalada según lo presentado por [25]. Esta metodología aborda explícitamente tanto los cambios en la variación de la frecuencia como de los montos de las precipitaciones. Adicionalmente, en el caso de las precipitaciones, se aplica una corrección final empírica para asegurar que la variabilidad de los modelos se ajusta adecuadamente a las observaciones.

En la Figura 3.4 se muestra un esquema gráfico del procedimiento que se realiza en un escalamiento estadístico, aplicado sobre un GCM. Las figuras del lado izquierdo representan la información del GCM, para los periodos de referencia (equivalente al periodo donde se tienen observaciones) y el periodo futuro a escalar. En ellas se ve como la información se encuentra en una grilla más gruesa. Además, el panel inferior de la columna izquierda muestra la información de las observaciones, en la resolución espacial sobre la que se desea trabajar. De estos campos, se obtienen dos nuevas fuentes de información: las diferencias proyectadas por el GCM para cada uno de sus puntos de grillas y, por medio de la aplicación de una técnica de escalamiento estadístico, la información del GCM en el periodo de referencia escalada a la resolución espacial de las observaciones.

Comparando el periodo futuro para el cual se quieren obtener estimaciones con las observaciones en algún periodo de referencia, se obtiene un campo de diferencias en la grilla nativa del GCM. Estas diferencias son interpoladas y aplicadas según alguna metodología de escalamiento estadístico sobre la información del GCM en el periodo de referencia ya escalado. Como resultado de esto, se obtiene una serie escalada del GCM para periodos futuros.

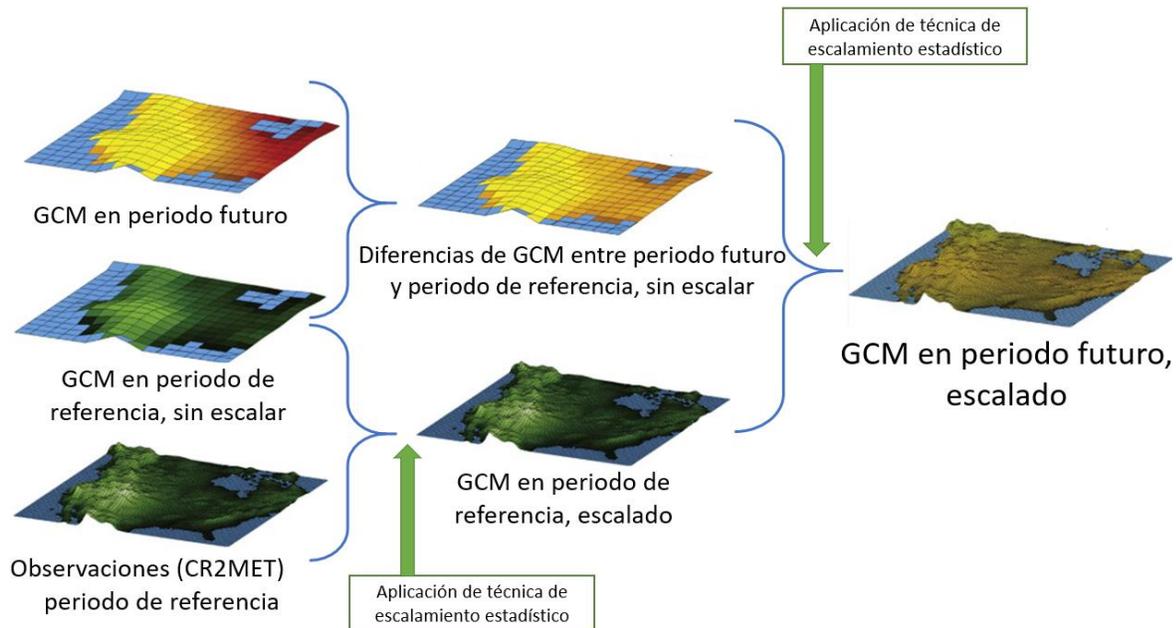


Figura 3.4. Esquema del proceso de escalamiento estadístico realizado sobre la base de datos de forzantes meteorológicas observadas para obtener proyecciones escaladas en una resolución espacial adecuada. Fuente: modificado de NASA.

La Figura 3.5 muestra una comparación entre tres series de temperaturas máximas, para el punto de grilla más cercano a la ciudad de Santiago. En negro se muestra la serie de temperaturas máximas observadas, obtenidas directamente desde el producto CR2MET. En azul se muestra la serie sin corrección obtenida desde el modelo MIROC-ESM y finalmente en naranja se muestra la serie escalada del mismo GCM (se utilizará este GCM como base para los ejemplos de la Figura 3.5 y Figura 3.6).

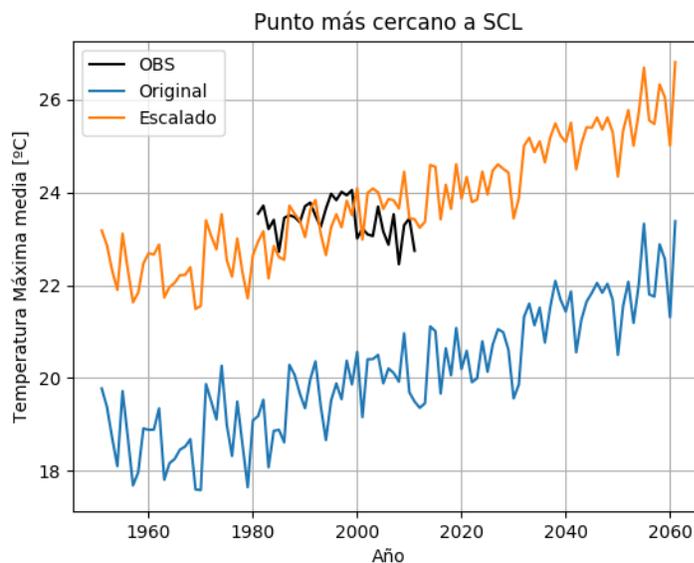


Figura 3.5. Comparación de las series de temperaturas máximas medias anuales obtenidas desde el GCM MIROC-ESM, específicamente para el punto de grilla más cercano a Santiago. Fuente: elaboración propia.

En dicha figura se observa que el periodo de las observaciones (1980-2010) que fue el utilizado como periodo de referencia para el escalamiento se tiene un valor medio equivalente al que se obtiene de la media de la serie escalada. Se observa que el método de escalamiento corrige el sesgo de la temperatura pero que además corrige características de segundo orden como la variabilidad. Esto se debe a que la corrección del método se ejecuta específicamente para percentil. Esto permite que la señal de cambio medio proyectada por el modelo se conserve, pero que se obtenga una serie que está corregida tanto en sus valores medios como en su variabilidad.

La Figura 3.6 entrega un panorama general de ejemplo de los resultados del escalamiento. En el primer panel de la izquierda se muestran los valores medios de temperatura máxima estimados por el GCM. Se observa en este panel la necesidad de realizar un escalamiento ya que el modelo no representa adecuadamente los efectos locales de la topografía. En el segundo panel, se observan los resultados del escalamiento, aplicados sobre la misma ventana temporal. En este panel se observan claramente los gradientes topográficos inducidos por la altura, productos de las altas elevaciones de la Cordillera de Los Andes.

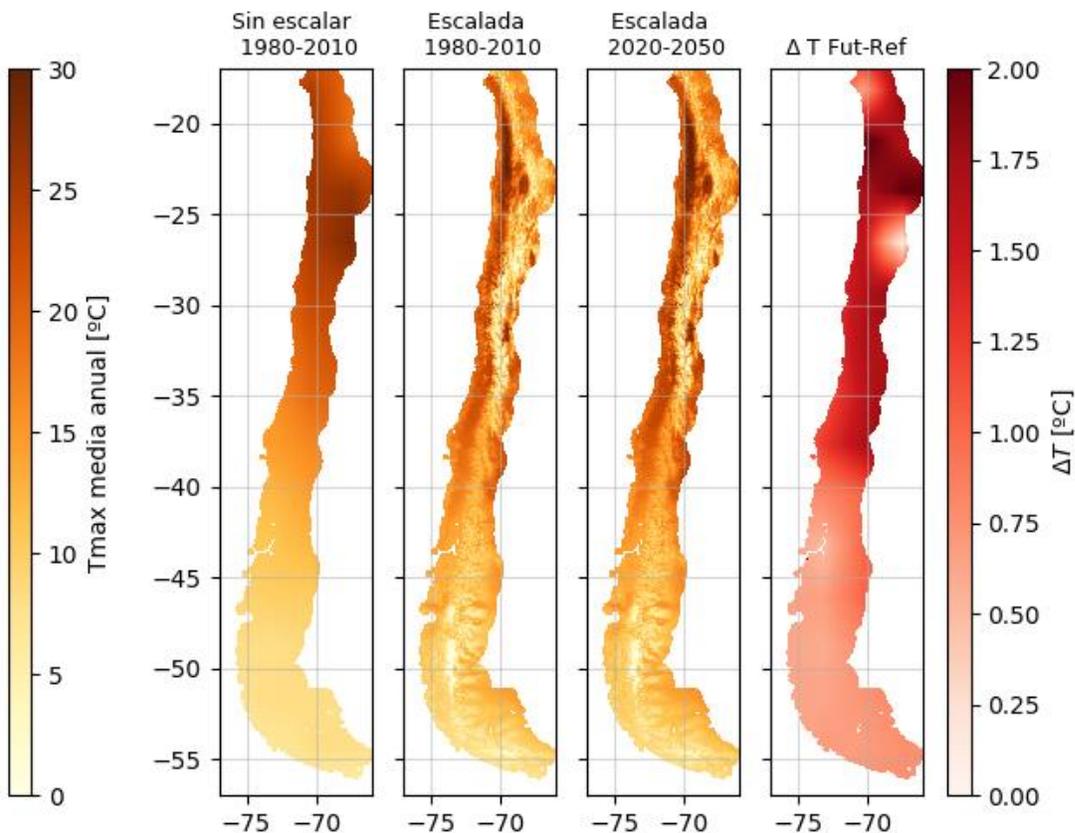


Figura 3.6. Ejemplo de los resultados obtenidos del proceso de escalamiento. En esta figura se ejemplifican los resultados obtenidos para la variable temperatura máxima media anual, del modelo MIROC-ESM-r1i1p1

El tercer panel de la Figura 3.6 muestra los resultados del escalamiento realizado para las proyecciones del periodo 2020-2050. Debido a que los cambios son sutiles en magnitud en comparación con el rango de valores de temperaturas que se grafican, se muestra en el cuarto panel, con una escala de colores distintos, las diferencias entre los valores medios escalados entre el periodo futuro (2020-2050) y de referencia (1980-2010). Se observa que los cambios proyectados son continuos en su distribución espacial, respetando los cambios medios proyectados originalmente por el GCM.

Finalmente, como contextualización general de lo esperado como señal de cambio climático predicho por los GCM utilizados en este estudio, se muestra en la Figura 3.7 el promedio de los cambios esperados en temperatura media y precipitación para cada una de las cuencas del estudio. Este gráfico se presenta en función de la latitud, ya que se identificó un gradiente espacial en la distribución de los cambios. Se proyectan mayores aumentos de temperatura mientras más al norte se encuentre el punto de control, con aumentos esperados que varían entre 0,8°C y 1,1°C. Según el mismo patrón de distribución espacial, se esperan disminuciones de los valores medios de precipitación que varían entre el 10% en las cuencas más septentrionales y cercanos al 7% en los puntos más australes.

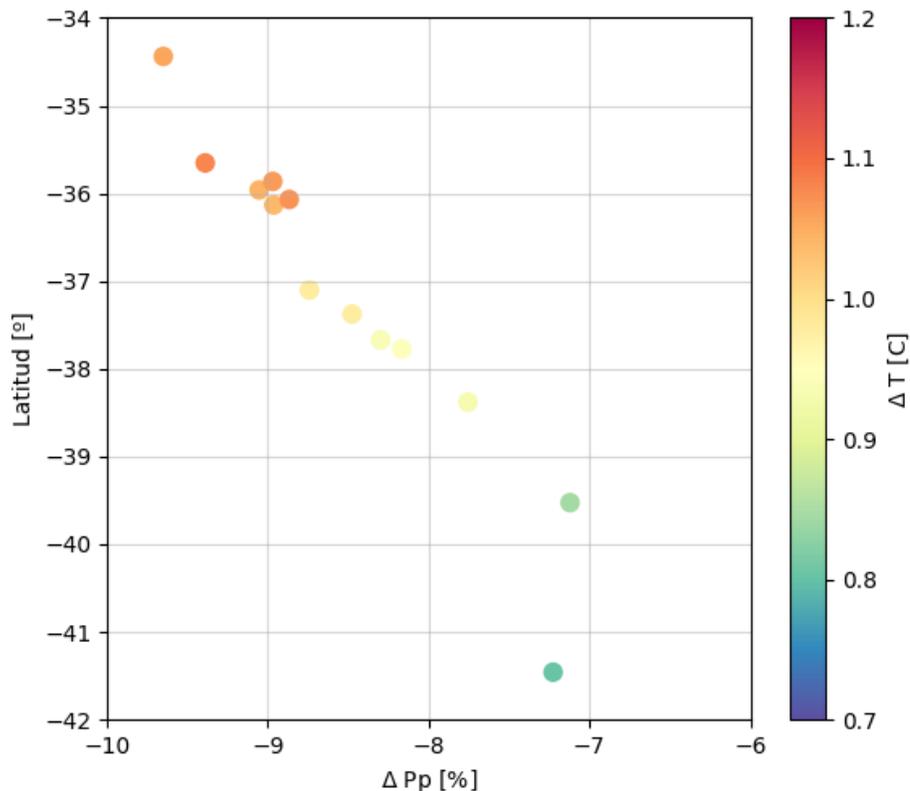


Figura 3.7. Distribución de los cambios medios proyectados de precipitación y temperatura media en función de su latitud, para cada una de las cuencas definidas por los puntos de control del estudio. Fuente: elaboración propia.

### 3.4 Proyecciones Hidrológicas

Una vez que se cuenta con los modelos hidrológicos de cada punto de control calibrado para representar los procesos físicos de cada cuenca, es posible utilizarlos en conjunto con las proyecciones de cambio climático para extrapolar condiciones hidrológicas consecuentes temporalmente con el periodo de las forzantes meteorológicas provistas como información de entrada. En el caso de los GCM, se tiene información meteorológica para el periodo 1950-2060, mientras que para los reanálisis históricos se tiene para el periodo 1901-2010.

Es importante notar que mientras los reanálisis por su planteamiento buscan recrear el comportamiento histórico de las series de caudales (ya que las forzantes meteorológicas buscan recrear las condiciones atmosféricas del siglo XX), esto no ocurre necesariamente en el caso de los GCM. Este último tipo de modelo busca recrear las leyes que rigen el sistema climático, pero no sus condiciones históricas. Es más, considerando la naturaleza caótica de este sistema, donde pequeñas alteraciones pueden provocar condiciones sumamente diferentes, se busca que los GCM repliquen las condiciones estadísticas medias de la atmósfera, de forma que se asegure un nivel de similitud adecuado. Como consecuencia de esto, se tendrán múltiples conjuntos de condiciones atmosféricas que son factibles, y que son consecuentes estadísticamente entre ellas, pero con coherencia espacial y temporal individual.

En función de estos dos tipos de productos atmosféricos que proveen de forzantes meteorológicas para los modelos, son dos los focos que se pueden desarrollar: en primer lugar, extender las series hidrológicas de las cuencas hacia el pasado, lo que permite tener una mayor cantidad de información para analizar el comportamiento natural de la cuenca, en un contexto donde el efecto del cambio climático no se consideraba una variable; en segundo lugar, simular series bajo escenarios de condiciones climáticas alteradas, para evaluar los potenciales impactos del calentamiento global.

En el caso de los reanálisis, se cuenta con tres productos distintos, que proveen información desde 1901 hasta 2010. En el caso de las simulaciones climáticas, estas consisten en 27 GCM, que entregan 34 series de forzantes meteorológicas, de las cuales es posible obtener consecuentemente 34 series de tiempo de caudal semanal para cada punto de control considerado, para el periodo 1960 a 2050 (considerando años hidrológicos).

La información es procesada de forma tal que sea consecuente con la convención temporal utilizada por el Coordinador Eléctrico Nacional, que divide el año en 48 “semanas” (4 por mes) de duración de 7 o 8 días.

En la Figura 3.8 se presenta un gráfico de las series generadas por solo 5 de las simulaciones disponibles, para la Laguna de Laja. Como referencia, se presenta también la estadística observada entre 1960 y 2017. La Figura 3.9 muestra un periodo específico (2011 a 2019) de la figura anterior, con el fin de apreciar mejor el nivel de detalle en las series semanales. Es importante recordar que las series simuladas no tienen ninguna capacidad de reproducir la

variabilidad real observada durante el periodo 1960 a 2017, debido a que los GCM solo plantean el sistema climático y lo reproducen aleatoriamente, consecuente con las forzantes atmosféricas y no buscan representar lo ocurrido (a diferencia de los productos de reanálisis descritos en la sección 3.3). Sin embargo, es un requisito fundamental comprobar que las simulaciones basadas en los GCM logran reproducir las características estadísticas representativas de la serie observada, tales como los valores medios, ciclos característicos, variabilidad interanual, entre otras.

Por ejemplo, en la Figura 3.9 es posible ver como algunas de las series proyectadas por uno de los GCM muestra series de caudales de valores muy pequeños, mientras que otros proyectan años hidrológicos más húmedos. Incluso, la Figura 3.8 muestra como las series simuladas por los GCM logran reproducir valores máximos observados.

Estas series son el principal producto de este proyecto, ya que su generación es el fruto de un complejo proceso de calibración de las cuencas de los puntos de control (de forma tal que se logren representar adecuadamente los procesos físicos que ocurren al interior de las cuencas), en conjunto con sofisticadas técnicas de escalamiento aplicadas a información obtenida desde modelos de circulación global desarrollados por instituciones científicas de investigación de primera línea.

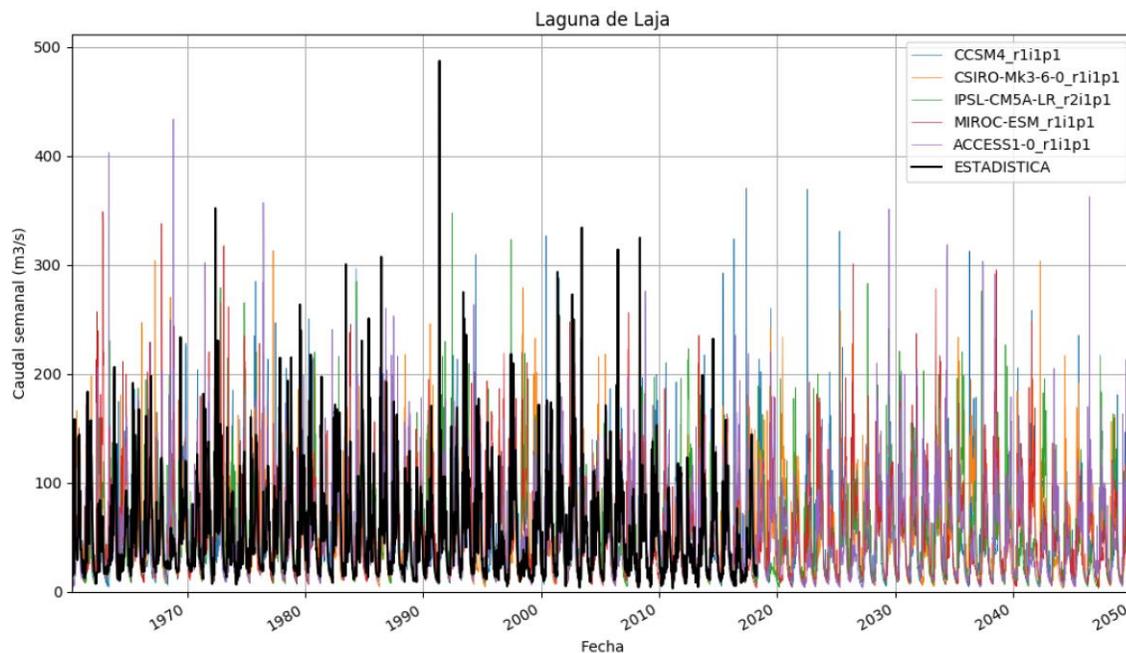


Figura 3.8. Ejemplo de la base de datos completa para el punto de Control de Laguna de Laja. Fuente: elaboración propia.

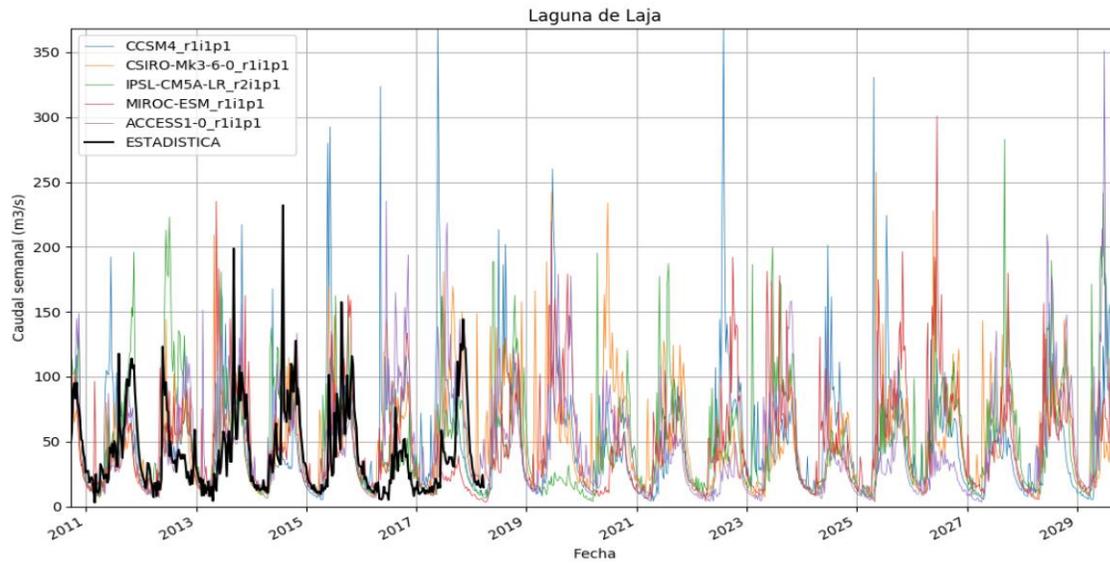


Figura 3.9. Muestra de la serie histórica de caudales y de las simulaciones proyectadas para el periodo comprendido entre 2011 y 2029, en el punto de control de Laguna de Laja. Fuente: elaboración propia.

Estas series pueden utilizarse para hacer otras caracterizaciones que resulten relevantes para la gestión de la red eléctrica, como por ejemplo el ciclo anual de caudal. En Chile central la mayoría de las cuencas importantes se caracterizan por tener un máximo de caudal durante la primavera o verano debido al proceso de deshielo. En el clima futuro, con mayores temperaturas, se esperan una aceleración de los procesos de deshielo, lo que podría cambiar significativamente la evolución típica de caudal durante el año.

A modo de ejemplo, la Figura 3.10 muestra la curva de variación estacional de la misma cuenca anterior del caudal simulado y observado para el periodo histórico, junto con el caudal proyectado para 2020 a 2050. Las simulaciones forzadas por los GCM se ven capaces de reproducir bien el ciclo típico del caudal medio, aunque se aprecia una leve subestimación durante los meses de diciembre y enero y leve sobre estimación entre mayo y septiembre. A pesar de esto, resulta interesante notar que las proyecciones futuras muestran un cambio importante en el caudal durante la época de deshielo (noviembre a marzo), con una disminución que alcanza casi un 50% del valor histórico, con respecto a lo que muestran en su caso base.

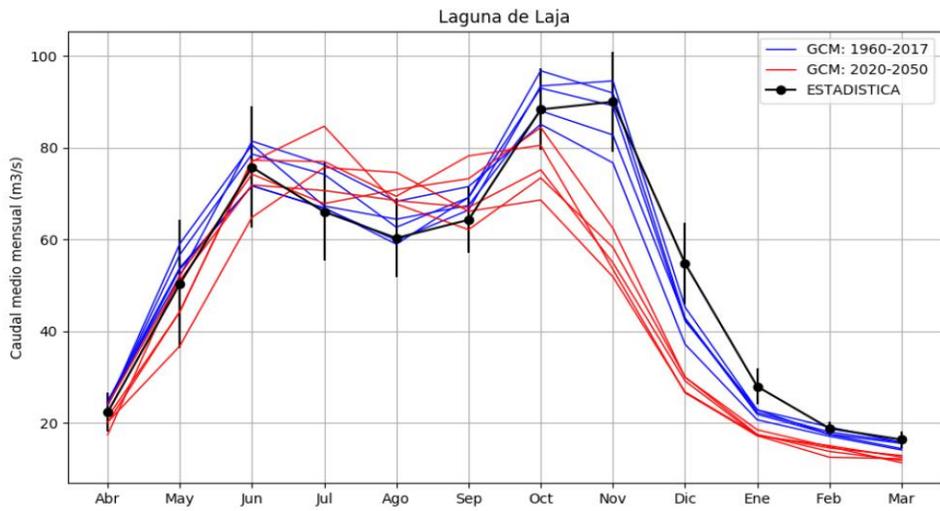


Figura 3.10 Ciclo anual del caudal medio mensual en la Laguna de Laja. La línea negra indica el caudal medio mensual observado entre 1980-2017, las barras verticales indicando el error estándar del valor. Las líneas azules representan los resultados de 5 GCM's para el mismo periodo, mientras las líneas rojas muestran el ciclo anual proyectado para el periodo 2020 a 2050. Los GCM's incluidos en el gráfico son: CCSM4, CSIRO-Mk3-6-0, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM, ACCESS1-0. Fuente: Elaboración propia.

## 4 Análisis de Hidrología presente/pasada (1960-2017)

En este capítulo se describe y analiza toda la información referente a periodos de tiempo que incluyen la estadística hidrológica. Esta información se aborda desde distintos enfoques, de manera de obtener una revisión integral de los fenómenos que ocurren. En particular, en este capítulo, se aborda desde las siguientes perspectivas:

1. Revisión bibliográfica
2. Efectos del cambio climático y variabilidad natural en estadística histórica
3. Simulaciones hidrológicas del siglo XX.

### 4.1 Revisión bibliográfica de variabilidad natural interdecadal

La cuenca del océano Pacífico tiene asociada una importante variabilidad climática. A nivel interanual (de algunos años), el clima es modulado por la señal de El Niño Oscilación del Sur (ENSO), que consiste en un calentamiento (enfriamiento) progresivo de las aguas superficiales de la parte central del océano Pacífico, lo que conlleva a la generación de eventos de El Niño (La Niña). Al ENSO se debe agregar la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), que describe los cambios en el clima de esta cuenca que se producen en una escala de varios años. Finalmente, el clima de la zona también varía de acuerdo a la Oscilación Interdecadal del Pacífico, que describe las fluctuaciones de los patrones climáticos en escala de varias décadas.

Además de afectar el transporte de calor en el océano, los modos indicados anteriormente producen modificaciones en patrones climáticos como la Oscilación Antártica (AO o SAM), lo que se termina traduciendo en cambios de las zonas por las cuales se trasladan las tormentas, afectando así las precipitaciones en el hemisferio Sur.

Chile, al encontrarse inmerso en la zona suroriental del Pacífico Sur, es sensible a la influencia de estos modos. Una fracción de las precipitaciones que se originan en la zona central y centro-sur del país es explicada por las fases del ENSO, existiendo una mayor probabilidad de condiciones de precipitación por sobre lo normal cuando la fase del ENSO es positiva [26]. Por otro lado, el progresivo déficit de precipitaciones que experimenta el país entre los años 1970 y 2000 se enmarca en un periodo de cambio de fase de la PDO [3]. Junto a la PDO, la fase negativa de la IPO también implicaría una reducción de las precipitaciones.

Además de las variabilidades descritas, existen otros factores que no obedecen a cambios netamente naturales. Por ejemplo, la recuperación progresiva del ozono estratosférica puede ocasionar cambios en la SAM, lo que se podría traducir en modificaciones del patrón de precipitaciones en Chile central y otras partes del mundo. Este cambio, a priori, tiene un

origen antropogénico y puede abarcar décadas [3]. Por otro lado, la actual mega sequía también tiene asociado un efecto antrópico, el que es ajeno a la variabilidad natural.

Dado el contexto anterior, es necesario aplicar técnicas de auto regresión en las simulaciones del clima, para verificar que estas contengan las señales conocidas de variabilidad decadal-interdecadal y los rasgos característicos que se aprecian en las últimas décadas, especialmente en lo que concierne a una disminución progresiva de las precipitaciones en la zona central y sur del país.

## 4.2 Efectos del cambio climático y variabilidad natural en estadística histórica

Como una primera aproximación, es posible analizar la información histórica de caudales disponibles de la estadística hidrológica, así como también de las forzantes meteorológicas en el periodo donde se cuenta con información. La Tabla 5.1. Estadísticos relevantes de la información hidrometeorológica comprendida en el periodo histórico. Tabla 5.1 presenta un resumen de los principales estadísticos hidrometeorológicas promediados sobre las cuencas definidas por los puntos de control, en el periodo histórico (1960-2018 para los caudales, 1980-2018 para temperatura y precipitación).

Tabla 4.1. Estadísticos relevantes de la información hidrometeorológica comprendida en el periodo histórico. Fuente: elaboración propia.

Punto de Control	Precipitación		Temperatura		Caudal						
	$P_{prom}$	$\Delta P$	$T_{prom}$	$\Delta T$	$Q_{prom}$	$Q_{min}$	$Q_{max}$	$Q_{std}$	$\Delta Q$	$Q_{dec}$	R
	(mm)	(%)	(°)	(°)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(%)	(%)	(%)
Rapel	950,4	-43,4	11,5	0,1	166,9	27,0	436,0	94,0	-27,0	67,0	-5,0
Embalse Melado	1754,4	-33,7	7,9	0,3	106,8	28,0	209,0	40,0	-32,0	45,0	-7,0
Laguna Invernada	1608,4	-36,4	6,3	0,4	36,4	16,0	59,0	10,0	-13,0	40,0	<b>25,0</b>
Laguna Maule	1437,0	-35,6	5,6	0,4	12,5	4,0	20,0	3,0	-23,0	44,0	<b>39,0</b>
HI Pehuenche	1449,1	-34,7	7,7	0,3	63,5	18,0	112,0	23,0	-24,0	43,0	-9,0
HI Colbún	1772,3	-33,6	8,3	0,3	218,4	68,0	410,0	79,0	-30,0	44,0	-5,0

Punto de Control	Precipitación		Temperatura		Caudal						
	$P_{prom}$ (mm)	$\Delta P$ (%)	$T_{prom}$ (°)	$\Delta T$ (°)	$Q_{prom}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{min}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{max}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{std}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q$ (%)	$Q_{dec}$ (%)	R (%)
Laguna Laja	2074,5	-28,0	7,2	0,3	53,7	21,0	85,0	15,0	-16,0	28,0	-6,0
Polcura en BT Antuco	2002,7	-29,3	8,4	0,3	38,0	12,0	78,0	12,0	-22,0	30,0	-6,0
Ralco	2195,8	-19,6	7,6	0,3	250,5	86,0	419,0	69,0	-23,0	25,0	0,0
Huequecura	2193,2	-23,7	9,5	0,2	23,3	10,0	39,0	7,0	-4,0	28,0	-7,0
Angostura	2134,9	-24,3	8,6	0,3	132,5	44,0	212,0	40,0	-54,0	28,0	-2,0
Pullinque	2883,2	-7,2	9,3	0,1	26,3	14,0	34,0	5,0	-23,0	15,0	8,0
Canutillar	3088,6	-4,4	7,1	0,1	55,7	35,0	73,0	8,0	-12,0	14,0	-11,0

La Tabla 5.2 provee una descripción de cada uno de los indicadores presentados en la Tabla 5.1, además del periodo específico de información disponible que fue utilizado para realizar su cálculo (resulta importante notar que los estadísticos asociados a caudales fueron calculados definiendo un año hidrológico comprendido entre abril de un año y marzo del año subsiguiente).

Tabla 4.2. Descripción detallada de cada uno de los indicadores climáticos presentados en la tabla anterior. Fuente: elaboración propia.

Indicador Climático	Descripción	Periodo
$P_{prom}$	Precipitación media anual en la cuenca. Basado en los datos del producto CR2MET.	1980-2018
$\Delta P$	Cambio de precipitación en el periodo de datos. Calculado a través de un ajuste lineal a la serie de precipitaciones anuales. Se expresa como un porcentaje de la precipitación media.	
$T_{prom}$	Temperatura media de la cuenca. Se trata de un promedio de la temperatura sobre toda la superficie de la cuenca. Basado en el producto CR2MET.	1980-2018
$\Delta T$	Cambio de temperatura desde el año 1980. Se calcula a través de un ajuste lineal a serie de tiempo de la temperatura media anual	
$Q_{prom}$	Caudal medio anual en $m^3/s$ . Calculado utilizando la estadística de caudal del Coordinador Eléctrico Nacional	Abril 1960 a marzo 2018
$Q_{min}$	Caudal mínimo anual en $m^3/s$ . Es el caudal medio del año hidrológico más seco de los registros disponibles.	
$Q_{max}$	Caudal máximo anual en $m^3/s$ . Es el caudal medio del año hidrológico más húmedo de los registros disponibles.	
$Q_{std}$	Desviación estándar del caudal medio anual en $m^3/s$ . Sirve para representar la variabilidad interanual.	
$\Delta Q$	Cambio de caudal medio durante el periodo de registro, expresando como porcentaje (%) del caudal medio durante el mismo periodo.	
$Q_{dec}$	Variabilidad interdecadal del caudal, expresado como porcentaje (%) del caudal medio. Se calcula como el rango (máximo-mínimo) del caudal medio en una ventana móvil de 10 años. La tendencia de largo plazo ( $\Delta Q$ ) es eliminada de la serie antes de realizar el cálculo.	
$R$	Coeficiente de autocorrelación de la serie anual de caudales, expresado como un porcentaje (%). Representa la relación entre el caudal anual con el caudal medio del año siguiente.	

De la Tabla 5.1 es posible desarrollar varios análisis relevantes, ya sea en función de las distintas variables presentadas, o de lo que ocurre a nivel de cuenca y de su distribución espacial geográfica. En el caso de un análisis por variable, es necesario separar en las categorías de variable meteorológica y fluviométrica.

En el caso de las variables meteorológicas resulta muy relevante lo que ocurre con los valores medios de la precipitación, los cuales presentan una tendencia a la disminución consecuente en todas las cuencas, pero con una gran variabilidad de valores, los que fluctúan entre un 4% y un 45% aproximadamente. Resulta interesante destacar que la disminución porcentual parece ser más drástica mientras más septentrional sea la cuenca en estudio. Por ejemplo, en el caso de Rapel, la cuenca ubicada más al norte de las seleccionadas, la disminución estimada de los valores de precipitación alcanza un valor de 43.6%, mientras que en el caso de la cuenca de Canutillar, la disminución es de solo un 4%. Esta tendencia se replica de manera general en todos los puntos de estudio: mientras más al sur, menor la disminución. En otras palabras, pareciera ser que las cuencas con mayor precipitación, han tenido una disminución porcentual de sus precipitaciones menor a las que tienen menos precipitación media. Sin embargo, este resultado debe ser interpretado con cierta cautela, ya que, al estar basados en un análisis de tendencia simple, pueden estar muy influenciados por lo ocurrido en la última década, donde la zona central ha experimentado un periodo de sequía de longitud considerable del orden de 10 años.

En el caso de las temperaturas medias registradas en cada una de las cuencas definidas por los puntos de control, se observan una ligera tendencia consecuente al aumento en todas las cuencas, pero que no llega a ser significativo en magnitud. Estos resultados se contraponen a lo que se ha mostrado en la literatura, como por ejemplo en [26], donde se demuestran aumentos del orden 0,25°C por década, basado en estaciones, es decir, cuatro veces los valores aquí calculados. Esta aparente incongruencia puede tener su base en la base de datos de temperatura utilizada, la cual podría no estar replicando las tendencias de baja frecuencia observada en los registros de temperatura.

En el caso de los caudales, el análisis se basa en la información de la estadística hidrológica provista por la CNE. Se observa que las variaciones porcentuales de caudal medio en las cuencas en estudio son del orden de un 23%, y donde la mayoría de las variaciones presenta valores entre un 10% y un 30%. Solo dos cuencas presentan valores que se alejan de este rango: Huequecura, que disminuye solo un 4% y Angostura, que disminuye un 54%. Resulta muy interesante que estas cuencas se encuentran contiguas geográficamente, aunque también es importante destacar que presentan regímenes hidrológicos completamente distintos.

Si bien es cierto que se presenta un comportamiento consecuente a la disminución de los caudales, al comparar los valores medios de la disminución con los rangos que se observan para la variabilidad interdecadal, se observa que la gran mayoría de los puntos de control presentan disminuciones que se encuentran dentro de este rango. Es importante notar que esta variabilidad interdecadal fue calculado habiendo removido la tendencia lineal simple, por lo que su valor no está afectado por posibles tendencias de disminución asociadas al cambio climático. Estos antecedentes hacen que sea difícil identificar cual y cuanto es la

posible contribución efectiva del fenómeno de cambio climático a la disminución de los caudales medios en las cuencas.

Finalmente, la última columna de la Tabla 5.1 muestra el coeficiente de autocorrelación de orden 1 de las series de caudales anual, es decir, cuanta influencia tiene en el caudal de un año lo que ocurrió en el año anterior. En general, los valores de autocorrelación son menores a un 10%, ya sea en términos de correlación positiva o negativa, y puede ser considerada estadísticamente no significativa. Sin embargo, se identificaron dos cuencas (Laguna Invernada y Laguna Maule) donde se tiene una correlación efectiva de un 35% de un año con respecto a otro. Esto marca a estas dos cuencas como las únicas donde lo ocurrido en un año puede tener un cierto nivel de influencia sobre lo que ocurra en el año posterior. Se plantea como hipótesis que esto podría estar relacionado con la acumulación de agua en el subsuelo, lo que permitiría extender el tiempo de residencia del agua caída al interior de ellas a periodos superiores al comprendido en un año hidrológico.

### 4.3 Simulaciones hidrológicas para el siglo XX

Estudiar la influencia de diferentes modos de variabilidad climática en eventos hidrometeorológicos como sequías y flujos bajos requiere series de datos numerosas, largas y confiables, si es que se busca obtener relaciones sólidas con capacidad predictiva. Para abordar este problema, la comunidad científica internacional ha vertido sus esfuerzos en el desarrollo de productos de reanálisis climáticos - productos que buscan simular las condiciones atmosféricas a nivel global por medio de modelos numéricos y la incorporación de observaciones - con la mayor capacidad de extensión temporal posible.

En esta línea, destacan en particular tres productos:

- a. Reanálisis ERA-20C: desarrollado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (CEPMPM, o *ECMWF* por sus siglas en inglés European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Su documentación se puede ver más en detalle en [27]. Cubre un rango de información desde 1900 a 2010. Tiene una resolución atmosférica definida por una grilla de  $1.125 \times 1.125^\circ$ .
- b. Reanálisis CERA-20C: otro reanálisis también desarrollado por el ECMWF, que utiliza las mismas parametrizaciones atmosféricas que el reanálisis anterior, pero que incorpora un modelo oceánico acoplado. Su documentación se puede ver más en detalle en [28]. Tiene una resolución atmosférica definida por una grilla de  $1.125 \times 1.125^\circ$ . Presenta información para el periodo 1901-2010.
- c. Reanálisis 20C: desarrollado originalmente por [29], actualmente se encuentra disponible en su versión 3. Es distribuido por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (*NOAA*, por sus siglas en inglés). En su versión más reciente, cubre un

rango de información desde 1836 a 2015. Tiene una resolución atmosférica definida por una grilla de 1.0x1.0°.

En todos estos productos se entregan estimaciones de las variables relevantes para este estudio, como la precipitación, la temperatura media, máxima y mínima. Cada uno se diferencia del otro en sus parametrizaciones y formas de modelar la atmósfera, así como también en su resolución. Esto hace que, a pesar de intentar replicar el mismo proceso, entreguen resultados con algunas diferencias.

La utilización de estos productos como fuentes de información meteorológica sirve para extender el registro histórico hidrológico. Además, al contarse con más de una estimación, es posible tener una estimación de la incertidumbre asociada a las mediciones. Sin embargo, la decisión final de si utilizar un producto o no queda sujeta a un proceso de evaluación del reanálisis, en el que se verifique que se cumplan ciertos estándares mínimos de consecuencia con la climatología regional.

La Figura 4.1 muestra el resultado de las simulaciones para el siglo XX en cuatro puntos de control representativos de las cuencas de Maule, Laja, Biobío y lago Chapo. En las figuras se muestra el promedio del caudal medio anual de las simulaciones forzadas con los Reanálisis ERA20C y 20CV, que fueron los finalmente seleccionados. Se descartaron las simulaciones que basadas en CERA-20C debido a que la calidad de los datos meteorológicos de este producto resultó bastante inferior a los otros y por ende no se pudo lograr un ajuste aceptable en el proceso de validación. Junto con el resultado de las simulaciones, se muestra el caudal observado desde el año 1960 en adelante. En general, el ajuste del modelo a los datos observados es peor que los resultados logrados con las simulaciones calibradas con los datos de CR2MET en el periodo de validación (ver sección 3.2). Sin embargo, esto es esperable ya que los reanálisis para el siglo XX se basan en información meteorológica muy reducida y que además es menor en volumen, mientras más hacia atrás se vaya. A pesar de su reducido desempeño, las simulaciones logran capturar gran parte de la variabilidad interanual y permiten extrapolar esta variabilidad hacia atrás, para poner el periodo 1960-2017 en el contexto del siglo XX entero.

La perspectiva entregada con los resultados del modelo desde 1901 demuestra claramente que existe una importante variabilidad en distintas escalas de tiempo relevantes. En primer lugar, es posible notar una tendencia negativa (disminución de caudal) a lo largo del último siglo. La magnitud de la tendencia es más fuerte en las cuencas de Laja y Canutillar, y de menor intensidad en Colbún y Ralco. La disminución, aunque leve, sostenida, de caudal durante el siglo XX es una consecuencia esperable del cambio climático antropogénico. En el periodo de la estadística (1960-2017) la tendencia negativa es más marcada, lo cual se podría interpretar como una aceleración del impacto de cambio climático en los últimos años. Sin embargo, es posible que esta tendencia se vea más notoriamente debido a que el comienzo de este periodo justo coincide con una época relativamente húmeda y el término coincide

con una época particularmente seca (la sequía actual). De hecho, según los resultados de las simulaciones con los GCM de CMIP-5 a mostrar en propio capítulo X, sólo una parte la tendencia que se observa desde 1960 en adelante es atribuible a cambio climático antropogénico.

Más allá que las tendencias, tal vez el aspecto más llamativo del gráfico es el sorprendente nivel de variabilidad interdecadal que se aprecia en las series. Dicha variabilidad se caracteriza por fluctuaciones cuasi cíclicas entre periodos secos y húmedos que duran entre 10 a 30 años. En los gráficos, la línea gris representa el promedio móvil de 10 años, lo cual facilita la visualización de la variabilidad en esta escala temporal. Se puede ver que la variabilidad interdecadal es similar en los cuatro puntos de control mostrados. Todos muestran condiciones relativamente húmedas al comienzo del siglo XX, seguido por una leve oscilación con mínima en 1920 y máxima en 1930 (que se ve con más claridad en las cuencas de hoya Intermedia Colbún y Laguna de Laja). Luego, hay una rápida disminución en todas las cuencas hasta el año 1945 aproximadamente, seguido por un largo periodo (> 30 años) de *aumento* de caudal que persiste hasta llegar un máximo en los principios de los años 80 (en Canutillar la máxima ocurrió antes, en los años 70). A partir de los 80 se observa una tendencia de disminución, culminando en la denominada “Mega sequía” actual que es claramente uno de los periodos más secos desde 1900 (más aún si consideramos que los años 2018 y 2019 también eran relativamente secos). Es importante señalar que gran parte de esta variabilidad es de origen *natural* (es decir, que no tiene relación con el cambio climático antropogénico), siendo asociado a interacciones de gran escala entre el océano y la atmosfera, como por ejemplo la Oscilación Interdecadal del Pacífico (PDO, [30]). Nota que hoy en día la capacidad de hacer pronósticos confiables de variabilidad inter-decadal es muy limitada ([31], [32]).

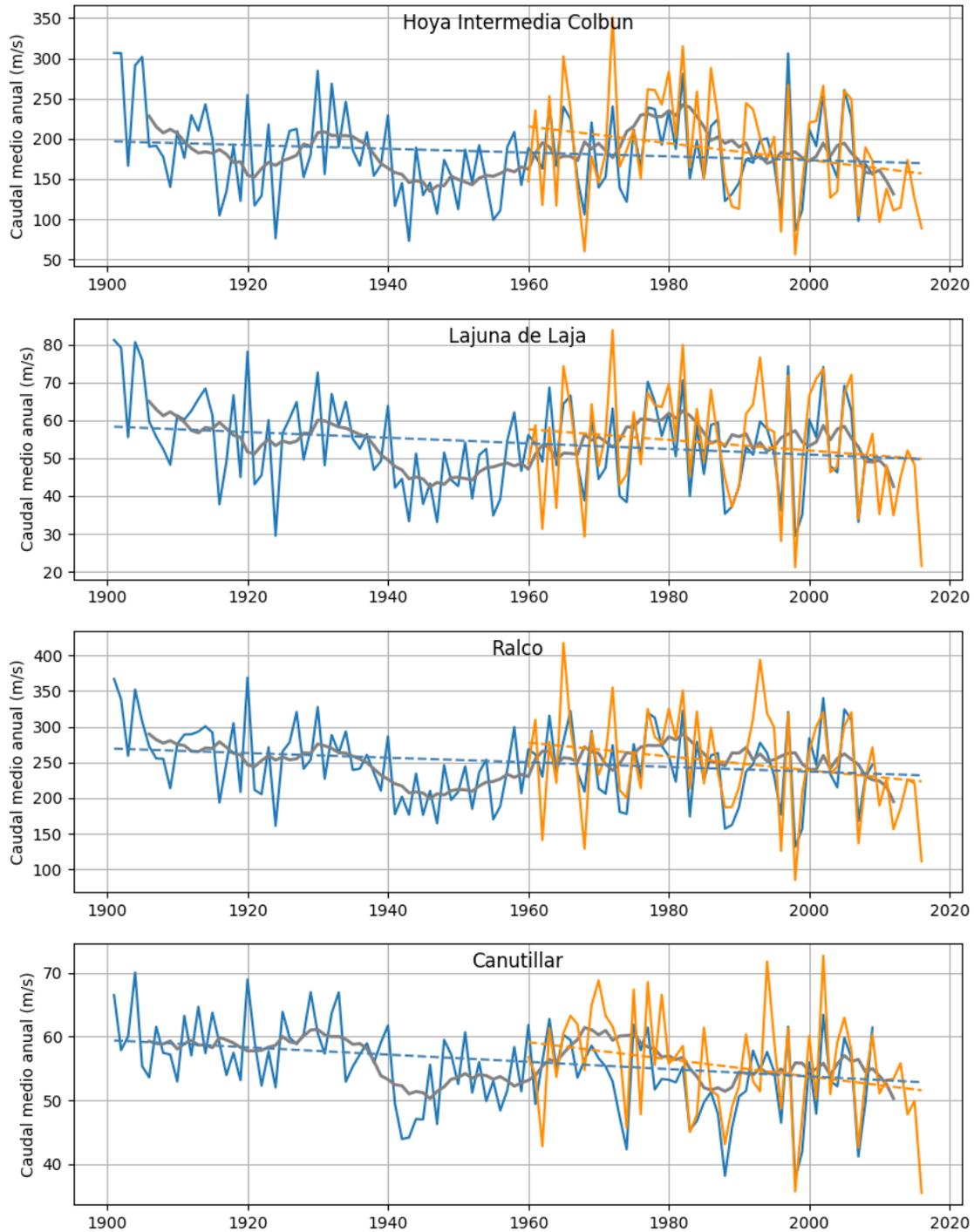


Figura 4.1 Caudal medio anual simulado desde el año 1900 hasta 2009 (línea azul) junto con el caudal de la estadística (naranja) desde 1960 en adelante. El caudal simulado es el promedio de las simulaciones forzadas con los Reanálisis ERA20C y 20CV3 (se descartaron las simulaciones con modelo CERA20CM debido a problemas con la calibración del modelo). Las líneas segmentadas representan las tendencias lineales para los dos periodos, calculados con la simulación y la estadística, respectivamente. La línea gris muestra el promedio móvil de 10 años (simulado entre 1900-1959, estadística 1960-2017).

## 5 Análisis de proyecciones hidrológicas

En esta sección se busca describir los datos generados usando GCM por la metodología de simulación de caudal y presentar una breve discusión de los resultados obtenidos hasta la fecha. Como se ha explicado anteriormente, la metodología que se desarrolla en el presente estudio tiene la finalidad de generar múltiples simulaciones de caudal semanal para el periodo 1960-2050, en un periodo total de 90 años, lo que abarca todo el periodo histórico de la estadística observada, además de proyecciones para los próximos 30 años.

Al considerar esta base de datos, será posible responder dos interrogantes fundamentales, para responder a los objetivos del estudio:

- a) ¿Cuál es el desempeño de las simulaciones para reproducir las características estadísticas de la variabilidad del caudal observado durante el periodo 1960 a 2017? ¿Logran reproducir adecuadamente la información del periodo histórico?
- b) ¿Cambiará significativamente la variabilidad del caudal en los próximos 30 años debido al impacto del fenómeno del cambio climático con respecto al periodo histórico?

Cabe señalar que la base de datos de simulaciones contiene caudales semanales de múltiples GCM y múltiples puntos de control en un periodo de tiempo que abarca casi un siglo. Entonces, cualquier evaluación y caracterización de los datos debe considerar diversos aspectos de la variabilidad. En particular, se considera importante abordar al menos los siguientes aspectos:

- i. Variabilidad interdecadal
- ii. Variabilidad y tendencias del caudal a nivel interanual
- iii. Variación mensual
- iv. Comportamiento de caudales extremos (crecidas)

En el presente capítulo se presentan resultados a modo general y comparativo en todas las cuencas en una primera sección. En una segunda sección, se describen más en detalle los efectos particulares de cada una de las cuencas en estudio. Se describe en particular la caracterización de variabilidad interanual y las simulaciones del ciclo anual medio. Adicionalmente, se presenta un ejemplo de un potencial formato de entrega de los resultados de las simulaciones a la Comisión Nacional de Energía para cada punto de control.

### 5.1 Validación de los resultados de las simulaciones para periodo histórico

Para tener confianza en las proyecciones futuras del caudal es importante comprobar que el modelo hidrológico VIC, forzado con los datos meteorológicos derivados de los GCM sea capaz de reproducir las características del caudal observado en el periodo histórico. La Tabla 5.1 presenta un resumen de algunas características básicas de las simulaciones de caudal utilizando las mismas métricas que fueron presentados en la discusión de la sección de los caudales históricos (ver Tabla 4.2).

Se puede apreciar que las simulaciones GCM generalmente tienen una buena capacidad de reproducir el caudal medio ( $Q_{prom}$ ), el valor simulado típicamente encontrándose a menos de 5% del valor observado (salvo en la hoya intermedia Colbún), pero siempre tiene el valor medio observado siempre comprendido en el rango definido por las simulaciones. Además, las simulaciones también muestran una buena habilidad para reproducir los años más secos ( $Q_{min}$ ) y más húmedos ( $Q_{max}$ ). La magnitud de la variabilidad interanual ( $Q_{std}$ ) también es generalmente bien reproducida por las simulaciones. En cuanto a las tendencias del caudal anual durante el periodo 1960 a 2017 ( $\Delta Q$ ) se aprecia que las simulaciones tienden a mostrar tendencias menores a las observadas en general, con algunas excepciones donde se reproduce de forma correcta. La tendencia observada es generalmente alrededor a -23%, mientras las simulada tiene valores generalmente menores a -17%. Es probable que la diferencia se asocia a la forma en que esta tendencia está calculada. En el caso de la serie observada, la fuerte tendencia se debe al menos parcialmente a factores naturales que son adicionales a la tendencia de largo plazo debido a cambio climático (mega sequía de los últimos 10 años). Los modelos, en conjunto, no logran reproducir esta variabilidad natural y, por ende, la tendencia común que muestran es sólo la tendencia que se debe específicamente al cambio global.

Finalmente, respecto a la variabilidad decadal ( $Q_{dec}$ ) se aprecia que las simulaciones tienen una variabilidad decadal significativa, pero tienden a subestimar la variabilidad observada en en las cuencas ubicadas más hacia el Norte (Maule, Rapel), lo cual también puede estar relacionado en particular al fenómeno de la mega sequía. Tal como se observa, la auto correlación de las series ( $R$ ) es despreciable, con excepción de las cuencas de la Laguna de Maule y Laguna Invernada.

Tabla 5.1. Comparación de métricas básicas del caudal observado (Obs) y simulado (Sim) para el periodo 1960-2017. Los resultados de las simulaciones son el resultado promedio de las 34 simulaciones individuales de modelos globales. Las definiciones de las métricas se presentan en la Tabla 5.2. Fuente: elaboración propia.

Punto de Control	Q <sub>prom</sub>		Q <sub>min</sub>		Q <sub>max</sub>		Q <sub>std</sub>		ΔQ		Q <sub>dec</sub>		R	
	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs
Rapel	170	166.9	27	27	523	436	101	94	-26	-27	64	67	9	-5
HI Colbún	180	218.4	66	68	347	410	58	79	-16	-30	32	44	2	-5
HI Pehuenche	62	63.5	19	18	116	112	21	23	-17	-24	35	43	5	-9
Embalse Melado	105	106.8	28	28	216	209	41	40	-21	-32	41	45	9	-7
Laguna Invernada	37	36.4	19	16	65	59	10	10	-18	-13	34	40	29	25
Laguna Maule	13	12.5	6	4	21	20	3	3	-12	-23	29	44	20	39
Polcura en BT Antuco	37	38.0	16	12	65	78	10	12	-15	-22	28	30	1	-6
Laguna Laja	53	53.7	22	21	86	85	13	15	-16	-16	26	28	0	-6
Ralco	246	250.5	108	86	388	419	62	69	-15	-23	26	25	2	0.0
Huequecura	23	23.3	9	10	37	39	6	7	-15	-4	27	28	0	-7
Angostura	95	132.5	38	44	158	212	26	40	-18	-54	29	28	4	-2
Pullinque	26	26.3	16	14	35	34	4	5	-13	-23	17	15	9	8
Canutillar	55	55.7	34	35	74	73	8	8	-14	-12	16	14	0	-11

## 5.2 Descripción generalizada de resultados

La Tabla 5.2 muestra el cambio del caudal medio proyectado para el periodo 2020 a 2050 para cada punto de control. La primera columna muestra el caudal medio simulado para los años hidrológicos entre 1960-2017 (el valor es casi idéntico al caudal medio de la estadística). La segunda columna muestra el caudal medio para el periodo futuro 2020-2050, ocupando el promedio del valor simulado con cada uno de los 34 GCM. El valor en paréntesis indica el cambio de caudal como porcentaje del valor para el periodo 1960-2017. Las siguientes dos columnas muestran el caudal proyectado por la simulación más seca (de menor caudal) y más húmeda (de mayor caudal medio), respectivamente. En general, las simulaciones muestran una disminución del caudal medio entre -12% y -22%. La disminución es menor en el sur y aumenta hacia el norte, lo que es consistente con los patrones espaciales del cambio de precipitación y temperatura proyectados por los GCM presentados en el capítulo 3. También se aprecia que hay diferencias importantes entre el caudal medio proyectado por cada GCM. En los casos más pesimista, el GCM más severo de cada cuenca proyecta

disminuciones del caudal medio que varían entre -25% (Lagua de Laja) hasta -47% (Rapel). Por otra parte, las simulaciones más optimistas proyectan disminuciones ínfimas de tan solo un -2%, incluso en algunos un aumento de caudal medio de +9% (en Rapel). Es llamativo que los cambios más extremos se presentan para la cuenca de Rapel. Este comportamiento se debe al menos en parte a que es la cuenca más norte de los puntos de control seleccionadas, donde los impactos de cambio climático en la temperatura y precipitación son más fuertes. Sin embargo, es importante recordar que los datos de caudal de la cuenca de Rapel no son de régimen natural y por ende los resultados del modelo hidrológico son menos confiables para esta cuenca.

Tabla 5.2. Cambio proyectado en el caudal medio de cada punto de control. Ver texto para explicación.

	Caudal medio 1960 – 2017 (m3/s)	Caudal medio 2020-2050	Caudal medio de la proyección más seca 2020-2050	Caudal medio de la proyección más húmeda 2020-2050
Rapel	178	139 (-22%)	95 (-47%)	194 (+9%)
HI Colbún	185	160 (-14%)	135 (-27%)	191 (+3%)
HI Pehuenche	63	54 (-15%)	44 (-30%)	65 (+3%)
Embalse Melado	109	88 (-19%)	71 (-35%)	111 (+2%)
Laguna Invernada	38	32 (-16%)	26 (-31%)	39 (+2%)
Laguna Maule	13	12 (-12%)	10 (-25%)	14 (+5%)
Polcura en BT Antuco	38	33 (-14%)	28 (-26%)	38 (+1%)
Laguna Laja	54	47 (-13%)	40 (-25%)	54 (-1%)
Ralco	253	220 (-13%)	184 (-27%)	254 (+1%)
Huequecura	24	20 (-15%)	17 (-30%)	23 (-1%)
Angostura	91	76 (-16%)	63 (-31%)	89 (-2%)
Pullinque	26	23 (-12%)	19 (-27%)	25 (-2%)
Canutillar	55	49 (-12%)	40 (-28%)	54 (-2%)

### 5.3 Análisis por cuenca

Se presentan a continuación caracterizaciones particulares de cada uno de los puntos de control considerados en este informe. Para cada una de las cuencas se muestra los resultados de las simulaciones obtenidas de aplicar las proyecciones de los GCM sobre cada uno de los modelos hidrológicos, comparando los valores de las simulaciones en el periodo base con el periodo futuro, para que exista coherencia entre los datos analizados de ambos periodos.

El análisis de cada cuenca se basa en cuatro figuras que caracterizan distintos ámbitos de las series de caudales. Estas figuras corresponden a:

- Serie de caudales anuales:** en esta figura, se presentan las series de los valores medios anuales, simulados por los modelos en el periodo 1960 a 2050. Los contornos sombreados representan el rango intercuantil entre el cuantil 25 y 75 (sombreado más oscuro), y el rango intercuantil 5 a 95 (sombreado más claro). El objetivo de estas bandas es cuantificar la incertidumbre de los valores anuales, así como la variabilidad natural esperable.

- b. **Diagrama de cajas:** esta figura muestra una comparación estadística entre tres conjuntos de datos. La primera caja, en blanco, representa la serie de caudales observados en la estadística. La segunda caja, en azul, representa la serie de caudales simulados en un periodo consecutivo al de la estadística. La tercera caja, en naranja, representa el conjunto de caudales simulados para el periodo futuro 2020-2050. En cada caja, la línea naranja representa la mediana de cada conjunto, los extremos verticales de la caja representan los cuantiles 25 y 75, y los valores extremos de las líneas son los valores extremos de máximo y mínimo. Aquellos puntos que representan *outliers*, (que representan valores fuera de rango de la muestra). Esta figura tiene un doble objetivo: como primer objetivo, la comparación de los valores observados en la estadística con los valores simulados en un periodo consecutivo; como segundo objetivo, identificar si es que existen diferencias estadísticamente significativas entre los caudales proyectados con los del periodo histórico. Los números que acompañan a cada una de las cajas representan el valor p obtenido del test estadístico Kolmogorov-Smirnov, en unidad de porcentaje, con un rango de 0 a 100. Este valor interpreta de formal tal que mientras mayor sea, existe mayor probabilidad de que ambos conjuntos de valores sean de la misma muestra. Por el contrario, valores pequeños, inferiores a un 10%, dan cuenta que las muestras son diferentes y distinguible estadísticamente (provenientes de poblaciones distintas), con un alto nivel de probabilidad.
- c. **Histograma de frecuencia de caudales:** esta figura entrega información más detallada de la distribución de los rangos y la frecuencia con que se observan distintos valores de caudales en cada punto de control. Además, se incluye el valor del caudal de percentil 99, como un referente del comportamiento esperado para valores extremos.
- d. **Curva de variación estacional:** esta figura muestra una comparación de los valores medios mensuales promedios de cada uno de los periodos de interés. En particular, esta figura entrega información no solo respecto a los valores medios, sino que también permite identificar en una primera instancia posibles cambios en el régimen hidrológico que rige a cada cuenca, así como también cambios en la variabilidad esperada en cada mes, a través de contornos que representan intervalos equivalentes a los de la figura descrita en el punto a.

### 5.3.1 Rapel

La cuenca definida por el punto de control asociado a la central Rapel representa uno de los más difíciles de modelar. La razón principal de esto es que la serie de caudales que se tiene como información base para la modelación no se encuentran en régimen natural. En particular, en la cuenca que se define por este punto de control, se tienen múltiples puntos de extracción de agua, con fines agrícolas, urbanos, industriales, entre otros, los cuales en su gran mayoría son de naturaleza consuntiva. Esto, a efectos prácticos, representa una extracción artificial de caudales del sistema, que distorsiona el balance de masa al interior de la cuenca. Así mismo, también existen múltiples puntos de almacenamiento, que alteran la temporalidad de los flujos, lo cual también genera efectos de distorsión en el modelo.

Debido a la versatilidad del modelo, en teoría y según lo que se muestra en la sección 3, a pesar de lo anterior se logran algunos indicadores de desempeño que resultan aceptables desde un punto de vista numérico. Sin embargo, en el panel inferior de la Figura 5.1, donde se muestra la curva de variación estacional, se observa en el periodo estival un aumento de los caudales que el modelo no logra representar adecuadamente. Una hipótesis de porque ocurre esto es que corresponde a una transferencia de caudales debido a almacenamientos transitorios en la cuenca, por embalses o tranques utilizados con fines de regadío, y a infiltraciones asociadas a esto (del agua que no es efectivamente evapotranspirada por las plantas).

Todo lo descrito anteriormente afecta la búsqueda de los parámetros del modelo hidrológico que logren representar los procesos físicos que ocurren al interior de la cuenca. Los parámetros que resulten de este proceso calibración intentan incorporar sesgos de efectos que no son naturales y, por tanto, no representaran adecuadamente los procesos físicos que ocurren al interior de la cuenca. Considerando todo esto, los resultados obtenidos para la cuenca del río Rapel deben ser interpretados con cautela, ya que no se encuentran debidamente respaldados por procesos físicos, a pesar de que logren replicar en cierta nivel las señales del cambio climático proyectadas para esta cuenta.

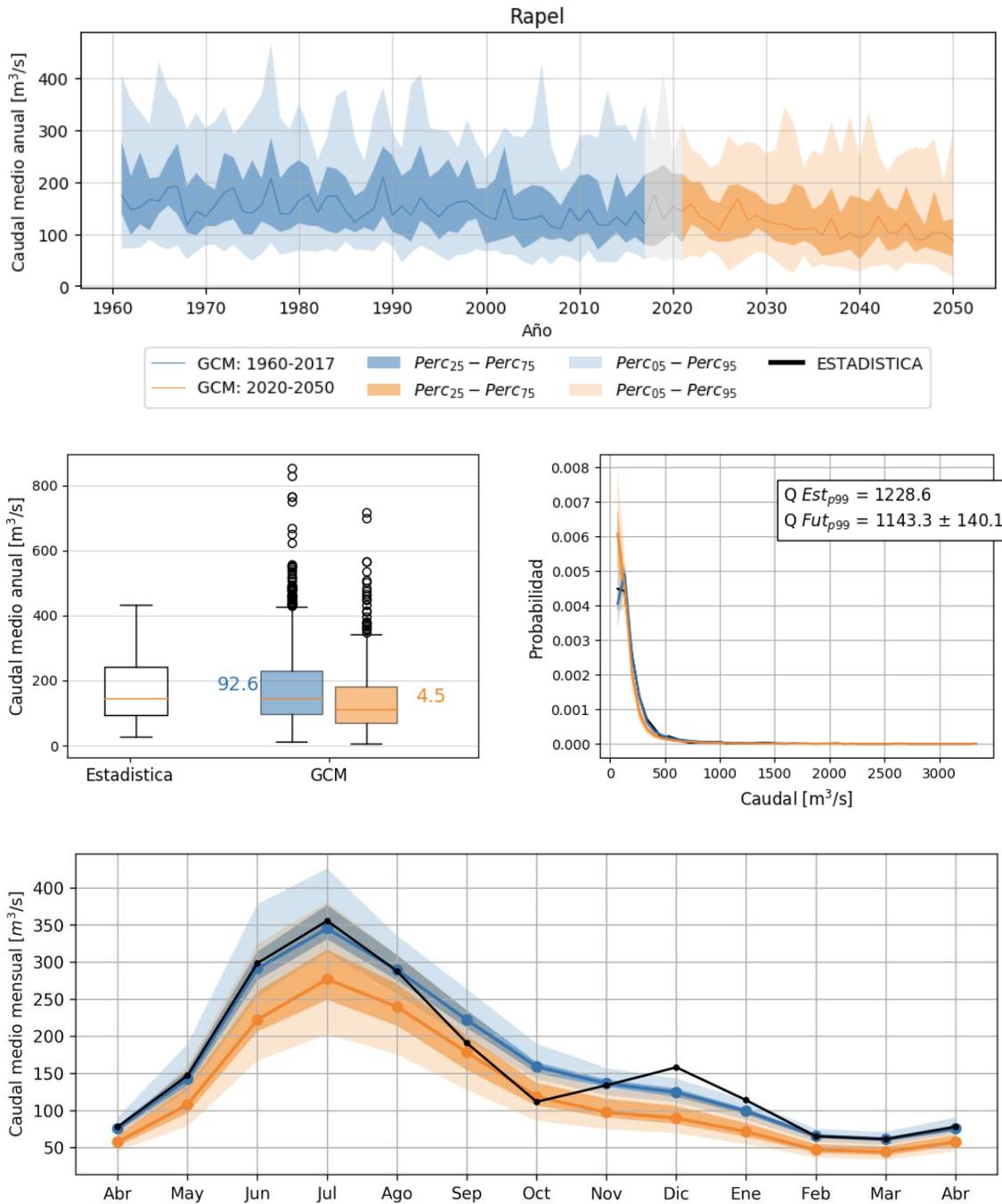


Figura 5.1. Caracterización de caudales simulados para el periodo histórico y futuro del punto de control Rapel.

### 5.3.2 Hoya intermedia Colbún

La Figura 5.2 presenta los resultados de las proyecciones hidrológicas de la cuenca definida por el punto de control hoya intermedia Colbún. Se observa que la serie de caudales tiene una tendencia a la disminución, aunque el rango de variabilidad esperado se mantiene con valores relativamente similares al periodo histórico. El diagrama de cajas muestra que las estadísticas de los caudales simulados y los observados son estadísticamente indistinguibles, pero con un bajo nivel de certeza, pero que, sin embargo, los caudales proyectados a futuro siguen una distribución distinta con alta seguridad.

El bajo nivel de certeza de la similitud entre ambas muestras guarda relación con los resultados del proceso de calibración, en el cual no se logran reproducir adecuadamente los caudales de deshielo, en particular en los meses de octubre, diciembre y enero. Se especula que estos problemas de calibración guardan relación con deficiencias en la calidad de los datos utilizados en el proceso de calibración. Al ser una cuenca intermedia, cuyos caudales son el fruto de una reconstrucción en función de múltiples variables, la suma de los errores asociados a cada uno de los términos puede generar distorsiones en la información. Sin embargo, a pesar de esto, se obtiene una calibración aceptable, que permite la estimación de resultados válidos para las proyecciones, considerando un breve margen de error. Los caudales extremos, representados por el percentil 99 de los caudales, no presenta diferencias significativas entre los dos periodos. La variabilidad estacional parece aumentar particularmente en los meses de invierno.

### 5.3.3 Hoya intermedia Pehuenche

La Figura 5.3 presenta los resultados de las proyecciones hidrológicas de la cuenca definida por el punto de control hoya intermedia Pehuenche. Los resultados en general son consecuentes con los de la hoya intermedia Colbún, lo cual es esperable dado el traslape espacial que existe entre ambas cuencas, aunque en estos casos los resultados resultan un poco más robustos. La serie de caudales anuales presenta también una tendencia a la disminución, aunque el rango de variabilidad parece aumentar relativo al periodo histórico. El diagrama de cajas muestra que las estadísticas de los caudales simulados y los observados son estadísticamente indistinguibles, aunque al igual que en el caso anterior con un bajo nivel de certeza. Sin embargo, los caudales proyectados a futuro siguen una distribución distinta con alta seguridad. El bajo nivel de certeza de la similitud entre ambas muestras guarda relación con problemas de calibración similares a los descritos en el punto anterior.

La distribución de los caudales según lo que se muestra en el histograma tiende a favorecer la ocurrencia de los caudales bajos (referentes al caso de línea base), y la variabilidad estacional en este caso aumenta tanto los meses de invierno como los de verano.

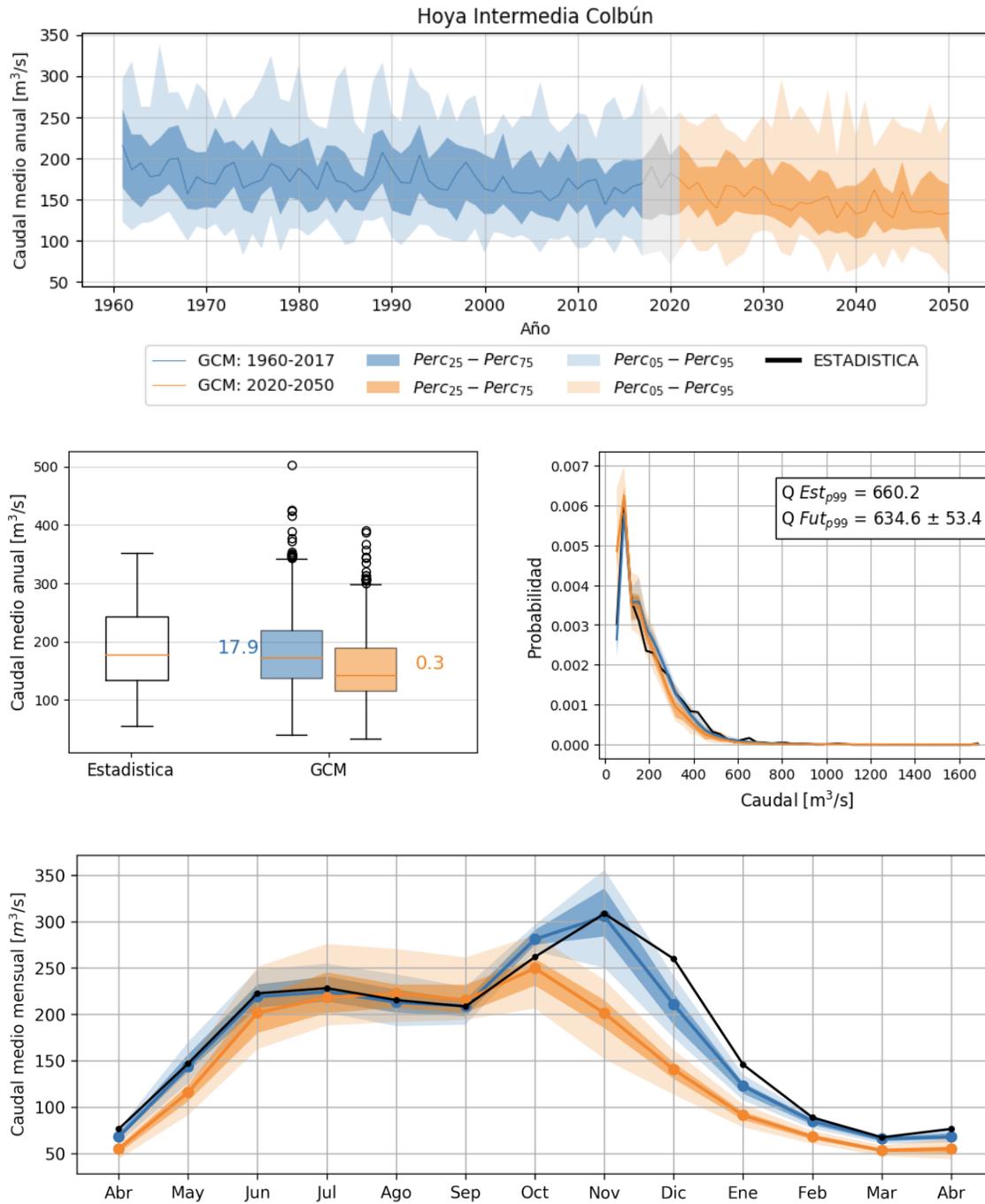


Figura 5.2. Caracterización de caudales simulados para el periodo histórico y futuro del punto de control Hoya intermedia Colbún.

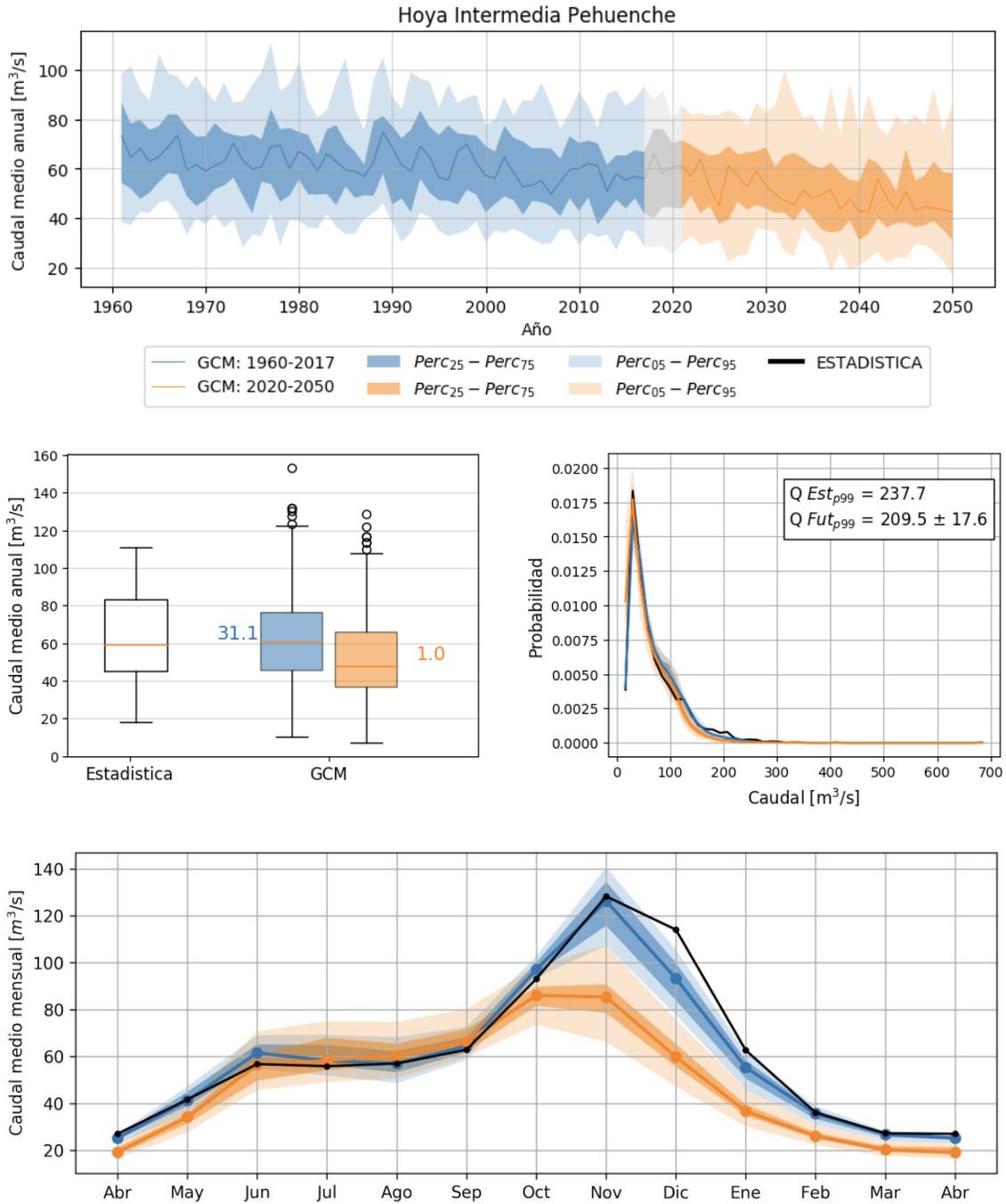


Figura 5.3. Caracterización de caudales simulados para el periodo histórico y futuro del punto de control hoya intermedia Pehuénche. Fuente: elaboración propia.

### 5.3.4 Embalse Melado

La cuenca definida por el unto de control Embalse Melado es otro de los puntos correspondientes a la cuenca del río Maule, al igual que los casos anteriores. En la Figura 5.4 se observa gráficamente como la serie de caudales anuales disminuye desde un valor cercano a 110 m<sup>3</sup>/s en el periodo histórico a valores alrededor de 90 m<sup>3</sup>/s. En este caso, se cuenta con una mayor seguridad estadística al momento de asegurar que el conjunto de valores de las simulaciones resulta indistinguible de los valores de la estadística. Esto se asocia directamente a un mejor resultado del proceso de calibración, como es posible ver tanto en el anexo de calibración como en la comparación de las curvas de variación estacional observadas y simuladas para periodo histórico (solo el mes de enero queda ligeramente subestimado en las simulaciones).

El comportamiento esperado de los cambios en la distribución de los caudales es similar a los de ambas hoyas intermedias, con una tendencia al aumento de la frecuencia de los caudales bajos y disminución de los caudales medios (usando como referencia valores medios y bajos del periodo histórico). Los caudales extremos no presentan un cambio significativo en su variabilidad.

### 5.3.5 Laguna Invernada

La Figura 5.5 muestra la serie de caudales anuales de Laguna Invernada permite identificar gráficamente una diferencia importante en los valores medios anuales de las proyecciones con respecto al periodo histórico. Este cambio es particularmente significativo, dado que las muestras de los caudales simulados e históricos son indistinguibles estadísticamente. Esta drástica reducción de los caudales puede estar asociado al tipo de régimen que presenta la cuenca de Laguna Invernada, de tipo nival, lo cual la hace particularmente sensible tanto a las disminuciones de precipitaciones como a los aumentos de temperaturas. En el caso de la disminución de precipitaciones, la relación es directa, ya que cuenta con menos agua de entrada. Sin embargo, el aumento de temperaturas genera que se tengan mayores tasas de evaporación y sublimación (procesos físicos que remueven agua del interior de la cuenca, evitando así que escurra en forma de escorrentía). Estas variaciones no solo afectan la disponibilidad de agua si no que también las forma en que se distribuye a lo largo del año: el caudal máximo de deshielo se proyecta para el mes de noviembre mientras que en el periodo histórico se encontraba en el mes de diciembre.

Adicionalmente a estos cambios, se observan también cambios en la distribución de frecuencia. Como es de esperar, existe una gran co-variabilidad espacial con las tres cuencas presentadas anteriormente, la que se demuestra en que el histograma de distribución de caudales varía en forma similar, mostrando un aumento en la frecuencia de caudales considerados bajos en el periodo histórico.

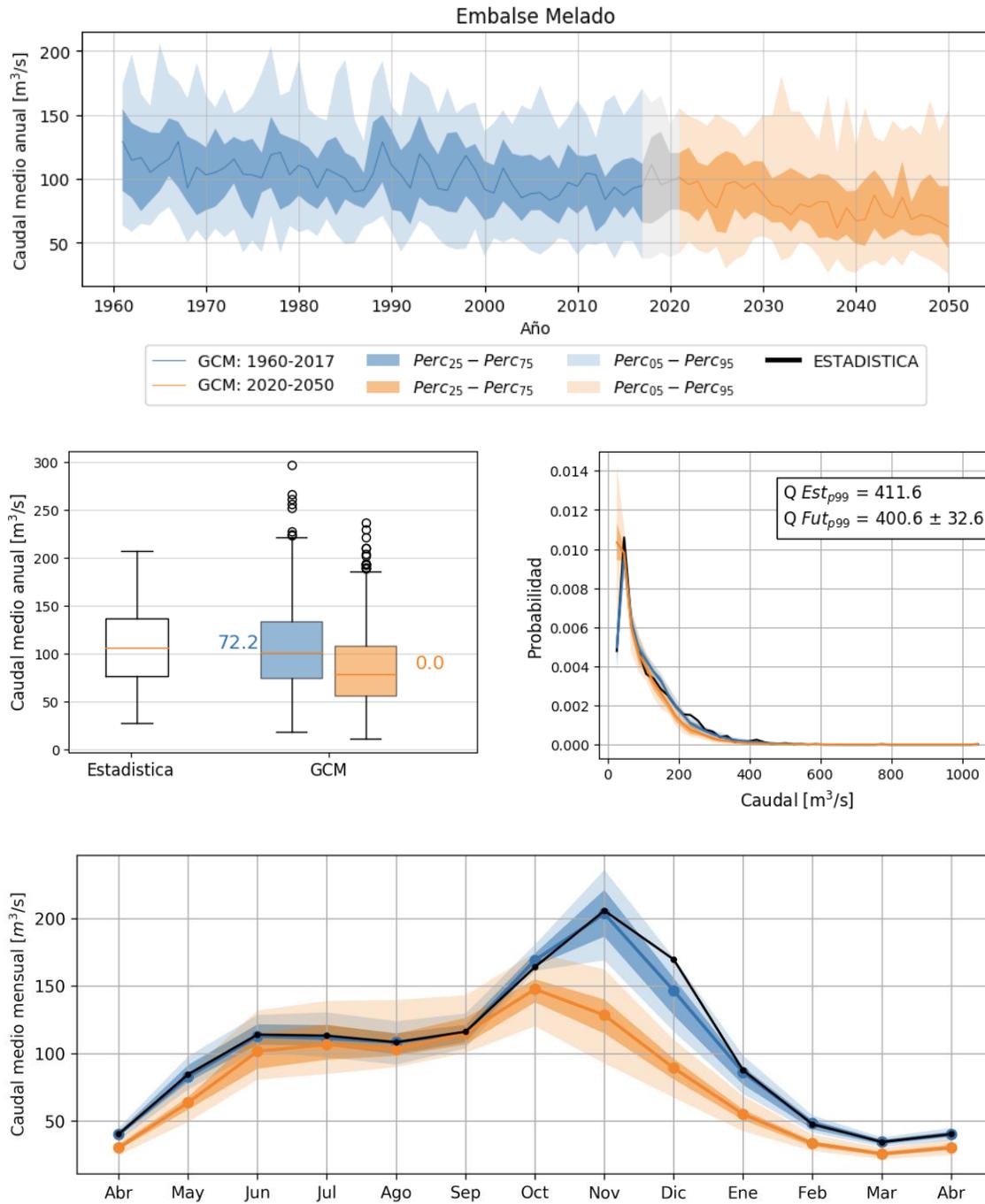


Figura 5.4. Caracterización de caudales simulados para el periodo histórico y futuro del punto de control Embalse Melado.  
Fuente: elaboración propia.

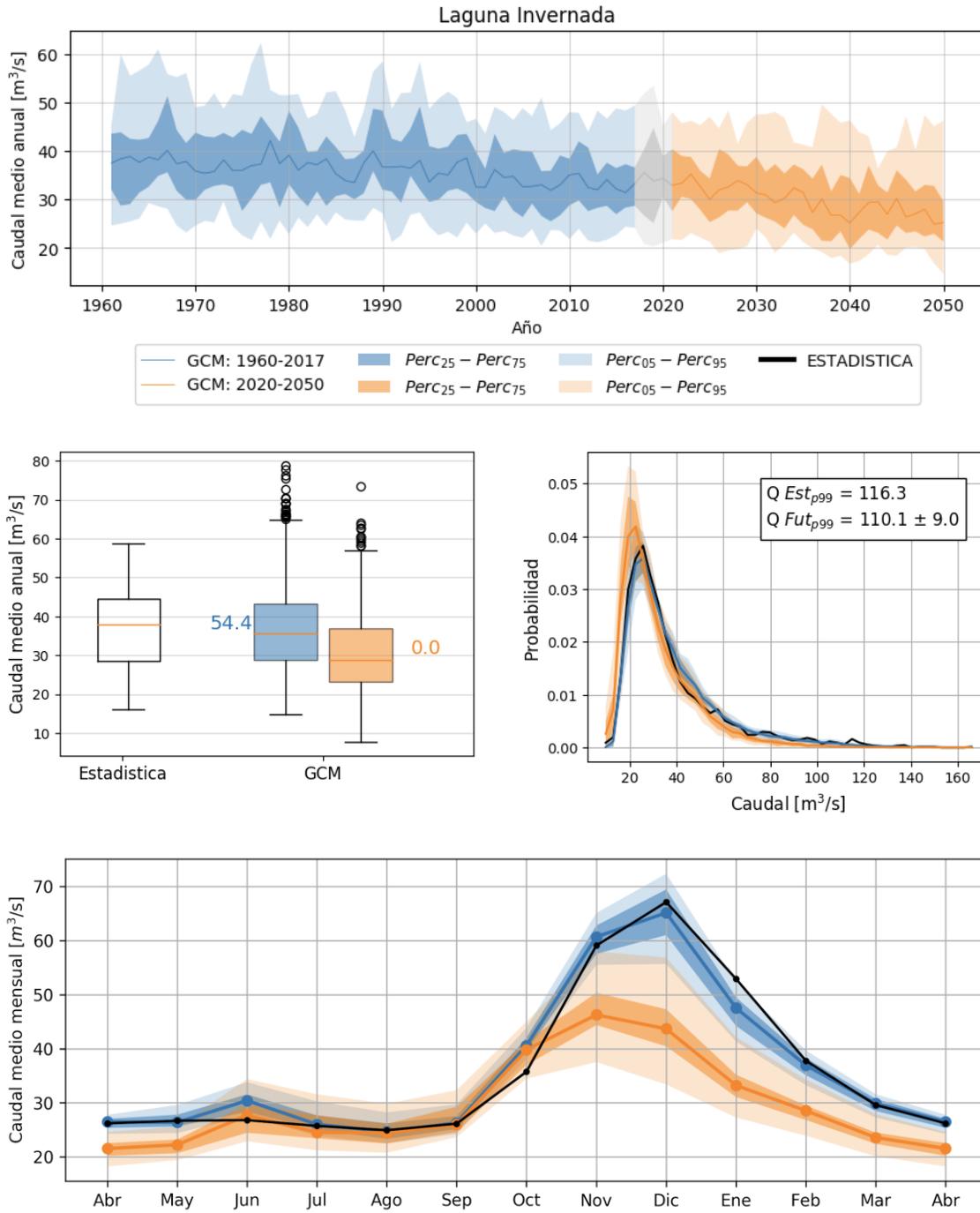


Figura 5.5. Caracterización de caudales simulados para el periodo histórico y futuro del punto de control Laguna Invernada. Fuente: elaboración propia.

### 5.3.6 Laguna Maule

Los efectos proyectados para Laguna Maule (Figura 5.6) siguen un patrón similar a las cuatro cuencas anteriores, y en particular al de Laguna Invernada dada la similitud que existe entre ambas (régimen nival, cuencas de gran altura, alta autocorrelación).

Los valores medios anuales presentan una tendencia a la disminución que es identificable gráficamente pero su variabilidad no sufre cambios significativos. La calibración de esta cuenca se considera exitosa a pesar de que existen problemas menores en la simulación del comienzo del proceso de deshielo.

En esta cuenca, los caudales de otoño, asociados a flujos base se ven notoriamente disminuidos, así como también los valores medios de invierno. Sin embargo, estos últimos presentan un aumento en su variabilidad, lo que incorpora una mayor incertidumbre en la predicción. El proceso de deshielo se ve severamente afectado, ya que los caudales máximos esperables disminuyen considerablemente, además de que se adelanta la fecha de máximo caudal. El aumento de la variabilidad de los caudales de meses de invierno, así como la disminución de los caudales de deshielo guardan relación con el aumento proyectado de temperaturas, lo cual se puede asociar a un favorecimiento de eventos pluviales líquidos por sobre eventos pluviales sólidos que favorecen el almacenamiento de nieve.

### 5.3.7 Antuco

La Figura 5.7 muestra los resultados obtenidos para el punto de control Antuco asociado a la bocatoma Antuco en el río Polcura. Esta cuenca es una de las dos que se encuentran en la zona de la macro cuenca del río Laja y presenta un régimen pluvio-nival. El proceso de calibración entrega resultados satisfactorios en general, aunque presenta leves problemas en el periodo de deshielo, en particular en el mes de enero. A pesar de esto, las series observadas y simuladas son indistinguibles en el periodo histórico, mientras que las series de caudales de futuros resultan significativamente distintas a las del periodo histórico.

En particular, en esta cuenca, se observan cambios que afectan principalmente a la sección asociada a los deshielos del hidrograma. Los caudales de los meses de invierno se mantienen invariantes, mientras que el caudal máximo asociado a los periodos de deshielo no se observa en las simulaciones del clima proyectado a futuro. Sí se observa un aumento de la variabilidad en los caudales de primavera, e incluso los de invierno. Lo que ocurre en este escenario futuro es algo equivalente a lo descrito en el punto anterior de la cuenca de Laguna Maule, donde se favorece la ocurrencia de precipitación líquida por sobre acumulación de nieve. Debido a que este cambio se va acentuando en el tiempo, (mientras más adelante, mayor es el aumento de temperatura) se tiene que la variabilidad es mayor, lo cual se observa en el aumento de los meses de verano.

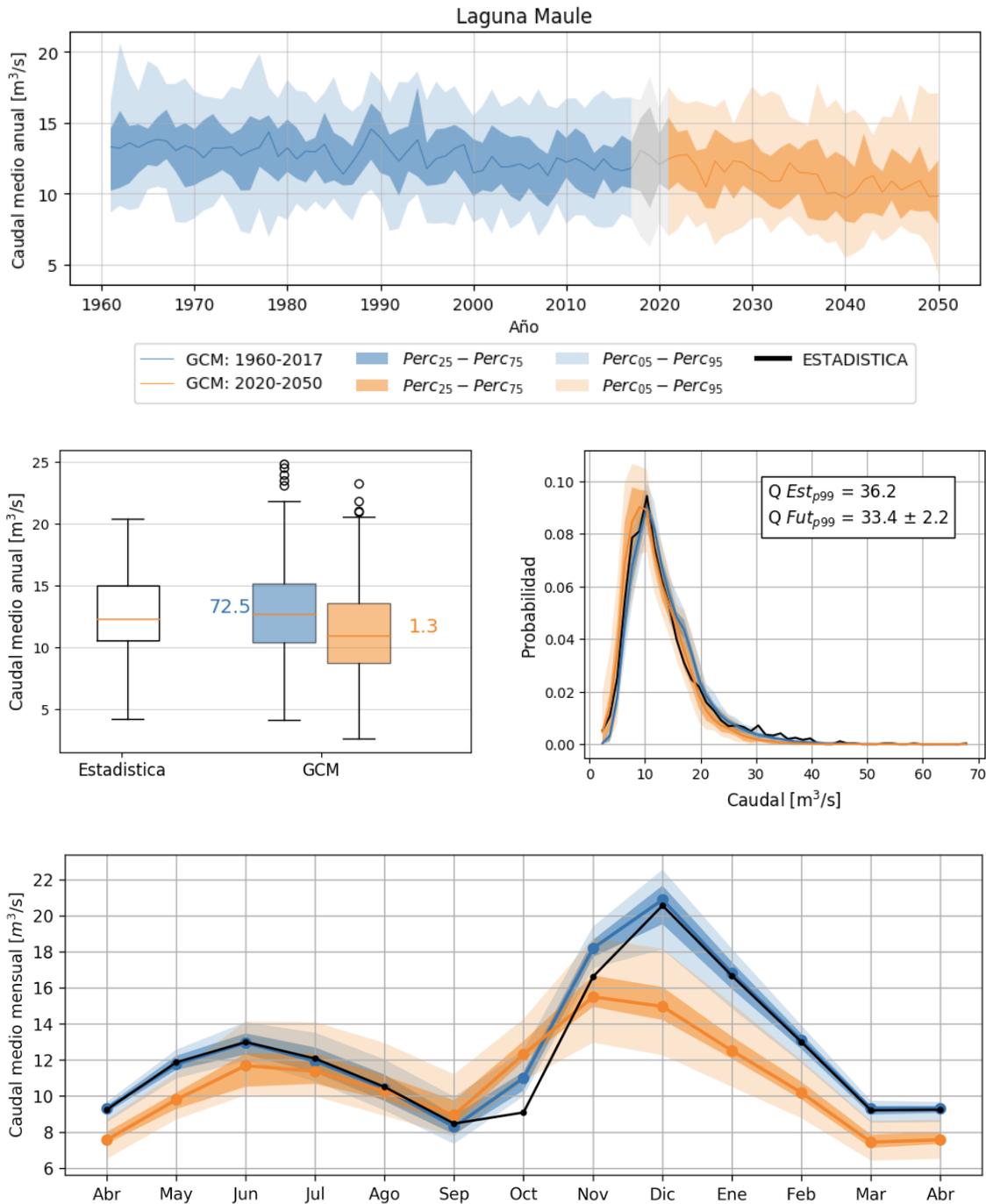


Figura 5.6. Caracterización de caudales simulados para el periodo histórico y futuro del punto de control Laguna Maule.  
Fuente: elaboración propia

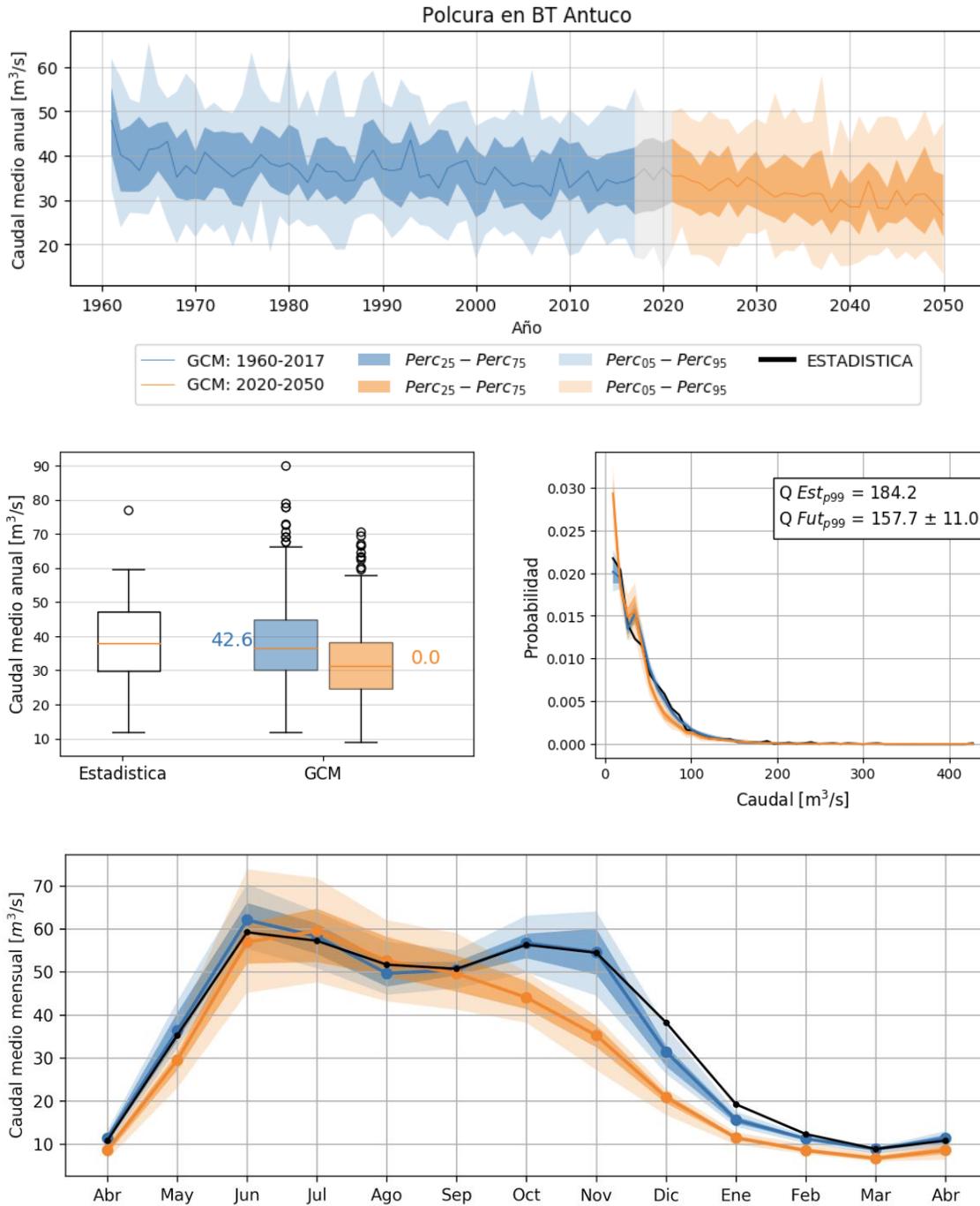


Figura 5.7. Caracterización de caudales simulados para el periodo histórico y futuro del punto de control Antuco. Fuente: elaboración propia

### 5.3.8 Laguna Laja

La Figura 5.8 muestra los resultados de las proyecciones de caudal del punto de control Laguna de Laja. Las proyecciones de caudal medio anual muestran una disminución significativa del periodo futuro con respecto al periodo histórico. En esta cuenca, se logró un excelente resultado del proceso de calibración, como se puede ver en el panel inferior de la figura, al comparar las curvas de variación estacional. Además de la evidente disminución de caudal medio anual que se tiene en la cuenca, resulta de gran interés observar lo que ocurre con los cambios en la distribución de los caudales. Se observa que en general los caudales de invierno mantienen valores similares a los del periodo histórico, aunque presentan un poco más de variabilidad. Sin embargo, en el periodo de deshielo, los cambios resultan dramáticos, disminuyendo hasta un promedio de 40 m<sup>3</sup>/s en el mes de diciembre. Lo que ocurre aquí es un ejemplo amplificado la señal que se estaba viendo en las cuencas anteriores. La disminución de las precipitaciones genera una menor disponibilidad de agua en general, mientras que el aumento de temperatura cambia la temporalidad de su disponibilidad. En el caso de no haber aumento de temperaturas, los cambios se reflejarían solo como una disminución de los valores de un ciclo de variación estacional similar. Sin embargo, al existir aumentos de temperaturas en la cuenca, algunas bandas de elevación que en el periodo histórico almacenaban agua como nieve, en el futuro la escurren directamente y por tanto se mantienen los valores en el periodo invernal. Sin embargo, al escurrir directamente en vez de almacenarse, en los meses de primavera y verano la cuenca cuenta con poco almacenamiento y, por tanto, se genera una disminución de caudales.

### 5.3.9 Ralco

La Figura 5.9 presenta para los resultados para la cuenca del punto de control Ralco. Se observa que los resultados son equivalentes a los del punto de control Laguna de Laja. Sin embargo, se proyectan cambios aun más drásticos que los descritos en el punto anterior, ya que en este caso no es posible ni siquiera identificar un segundo valor máximo en el hidrograma asociado a un peak de origen nival, sino que más bien el carácter de la cuenca pasa a ser exclusivamente pluvial. A pesar de esto, no se observan grandes cambios en los valores extremos esperados de caudal, manteniéndose los valores del percentil 99 proyectados en un rango equivalente al de los caudales de percentil 99 históricos. Los cambios en la distribución de caudales en esta cuenca ocurren focalizados en el rango entre 200 y 600 m<sup>3</sup>/s, presentando un aumento de frecuencia entre 200 m<sup>3</sup>/s y 400 m<sup>3</sup>/s y una disminución en el rango 400 m<sup>3</sup>/s y 600 m<sup>3</sup>/s.

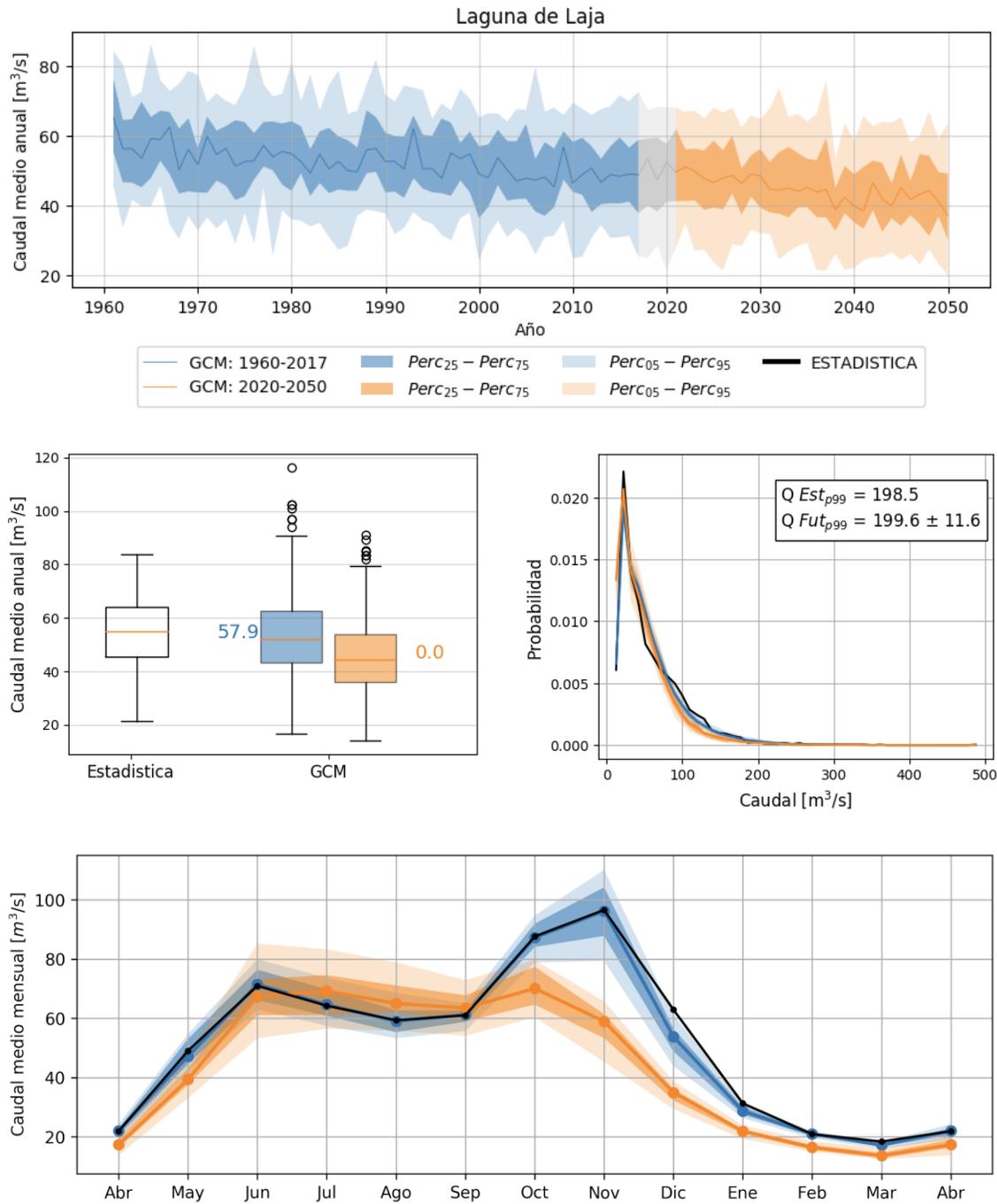


Figura 5.8. Caracterización de caudales simulados para el periodo histórico y futuro del punto de control Laguna Laja.  
Fuente: elaboración propia

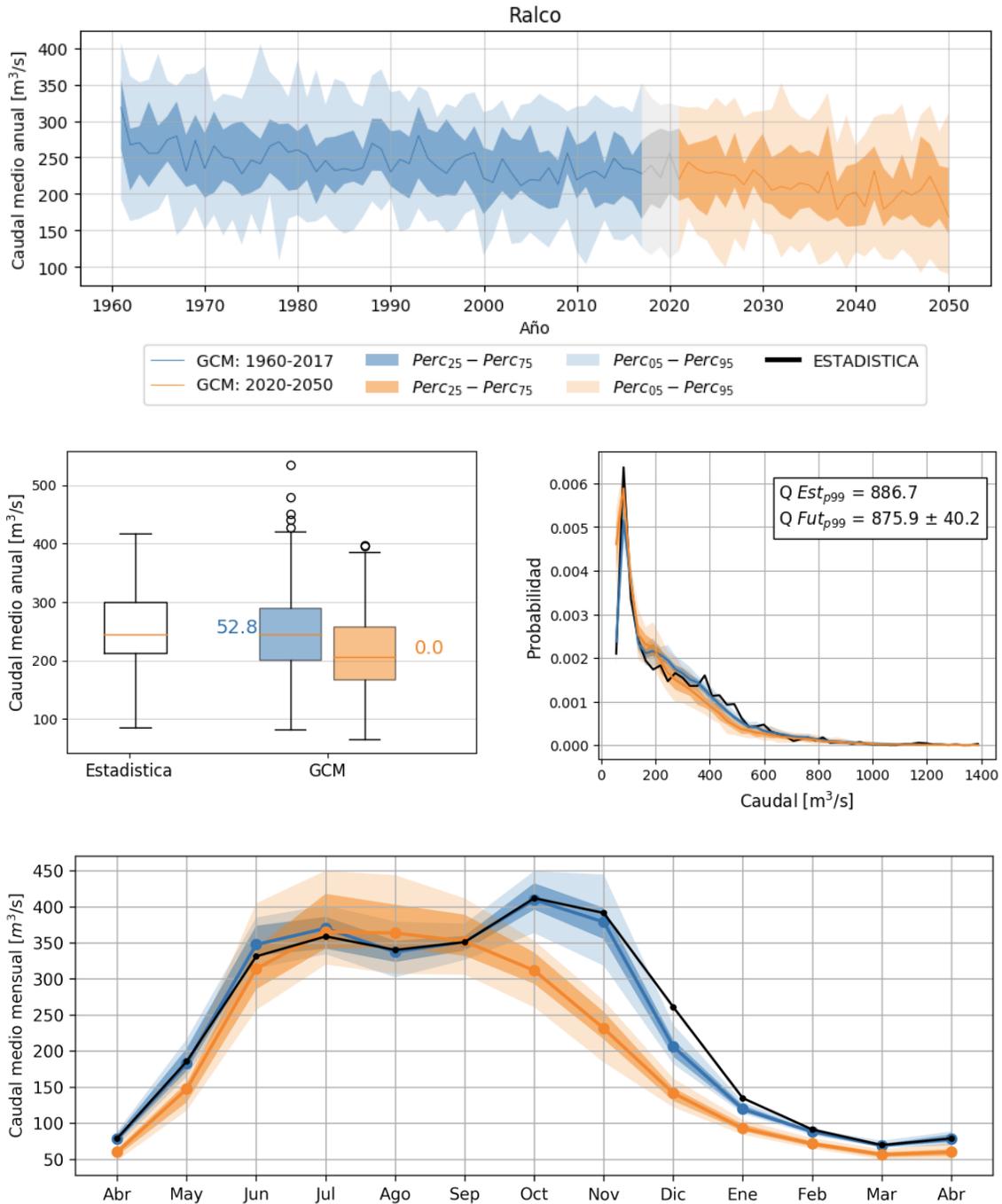


Figura 5.9. Caracterización de caudales simulados para el periodo histórico y futuro del punto de control Ralco.  
Fuente: elaboración propia

### 5.3.10 Huequecura

La Figura 5.10 muestra los resultados de la cuenca del río Huequecura. Se observa que esta cuenca es la primera expuesta que presenta un régimen de tipo completamente pluvial, concentrando sus mayores caudales en los meses de invierno, y que carece de la dinámica de acumulación en manto nival. Debido a esto, estas cuencas resultan menos sensibles a las variaciones de temperatura, pero sí más sensibles a las variaciones en los montos de precipitación. Esto se refleja en que las disminuciones en término de porcentajes de los caudales medios anuales sean similares a los cambios medios porcentuales de las precipitaciones, con pequeñas diferencias asociadas a los cambios de temperaturas. No se presentan cambios en el régimen hidrológico, solo un desplazamiento de la curva asociado a la disminución de precipitaciones. Los valores de eventos extremos de caudal en este caso sí presentan disminuciones significativas, lo cual es esperable dada la naturaleza pluvial de la cuenca.

### 5.3.11 Angostura

La Figura 5.11 muestra los resultados de la cuenca asociada al punto de control Angostura. En esta cuenca se tiene un régimen pluvio-nival, el cual al igual que en el caso de la cuenca de Ralco, se pierde, dando paso a un régimen principalmente pluvial. Las explicaciones físicas son equivalentes: el cambio en las temperaturas genera menor acumulación de nieve, y mayor escorrentía en el periodo de invierno. Los valores extremos no presentan cambios significativos. En este caso, sin embargo, el proceso de calibración resulto ligeramente deficiente, en especial en la curva de recesión del periodo de deshielo y las simulaciones de caudal histórico presentan poca certeza en ser indistinguibles. A pesar de estas dificultades, en base a la similitud de los resultados que se tienen entre esta cuenca y la cuenca de Ralco, que se ubican geográficamente cerca y que presentan regímenes hidrológicos similares, es posible decir que los efectos del cambio climático son concluyentes.

### 5.3.12 Pullinque

La Figura 5.12 presenta los resultados para el punto de control Pullinque. Esta cuenca queda excelentemente representada en el proceso de calibración (a pesar de una serie de valores observados con problemas de calidad como se puede observar en la distribución que siguen en el histograma), siendo de un tipo de régimen pluvial, similar a lo que ocurre en la cuenca de Huequecura, a pesar de encontrarse geográficamente bastante más al sur. Las muestras históricas observadas y simuladas resultan indistinguibles, y el régimen de caudales no se ve alterado en su forma, sino solo en su magnitud. Al igual que en el caso de la cuenca de Huequecura, el aumento de temperaturas no juega un papel fundamental, pero sí la disminución de precipitaciones, lo que se refleja en un desplazamiento hacia abajo de la

curva del hidrograma, dando cuenta de la menor disponibilidad de agua por la disminución de precipitaciones. Al revisar lo que ocurre con los valores de caudales de percentil 99, se puede decir que los eventos extremos en este caso sí aumentan significativamente, aunque solo en un 10%.

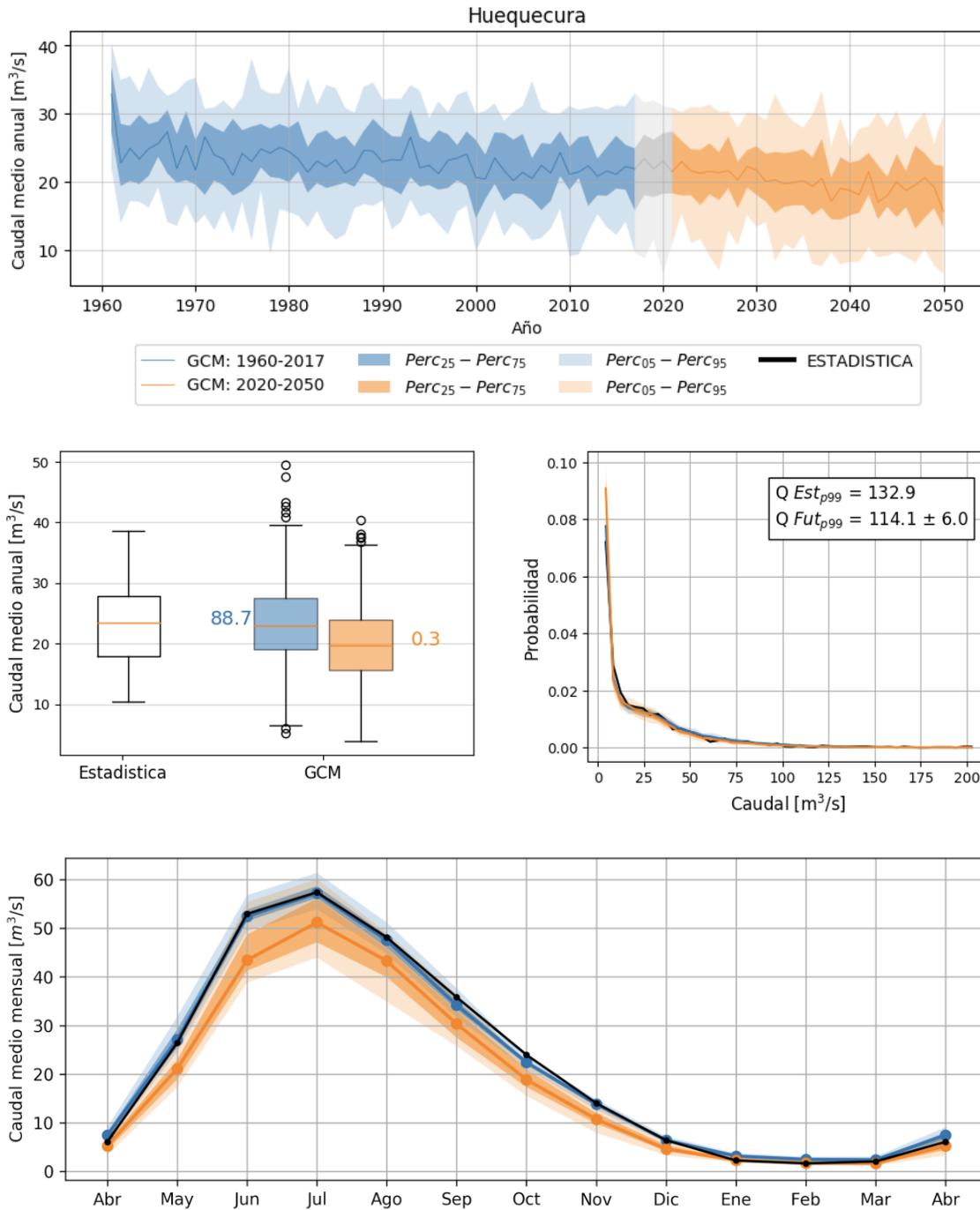


Figura 5.10. Caracterización de caudales simulados para el periodo histórico y futuro del punto de control Huequecura.  
Fuente: elaboración propia

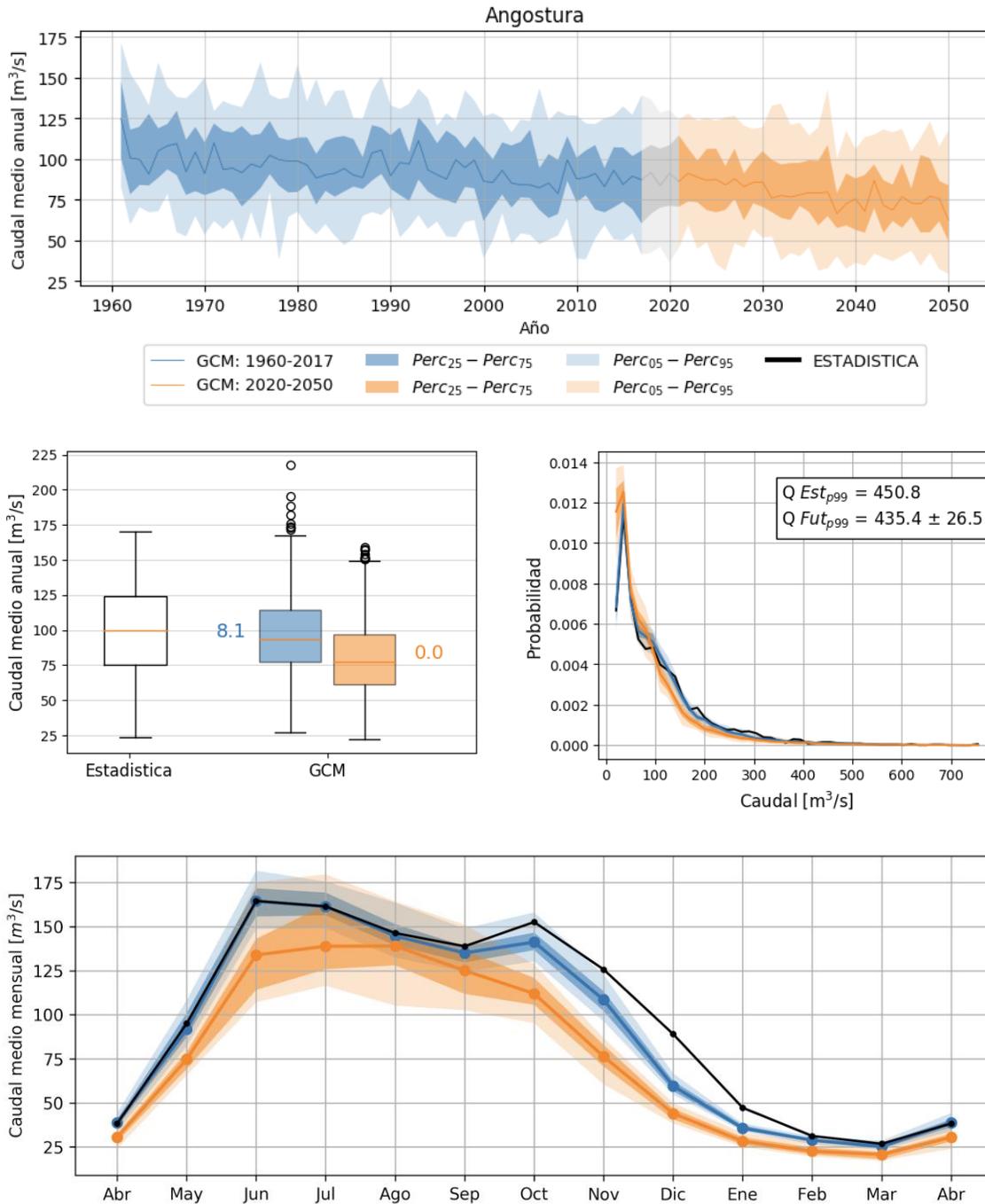


Figura 5.11. Caracterización de caudales simulados para el periodo histórico y futuro del punto de control Angostura.  
Fuente: elaboración propia

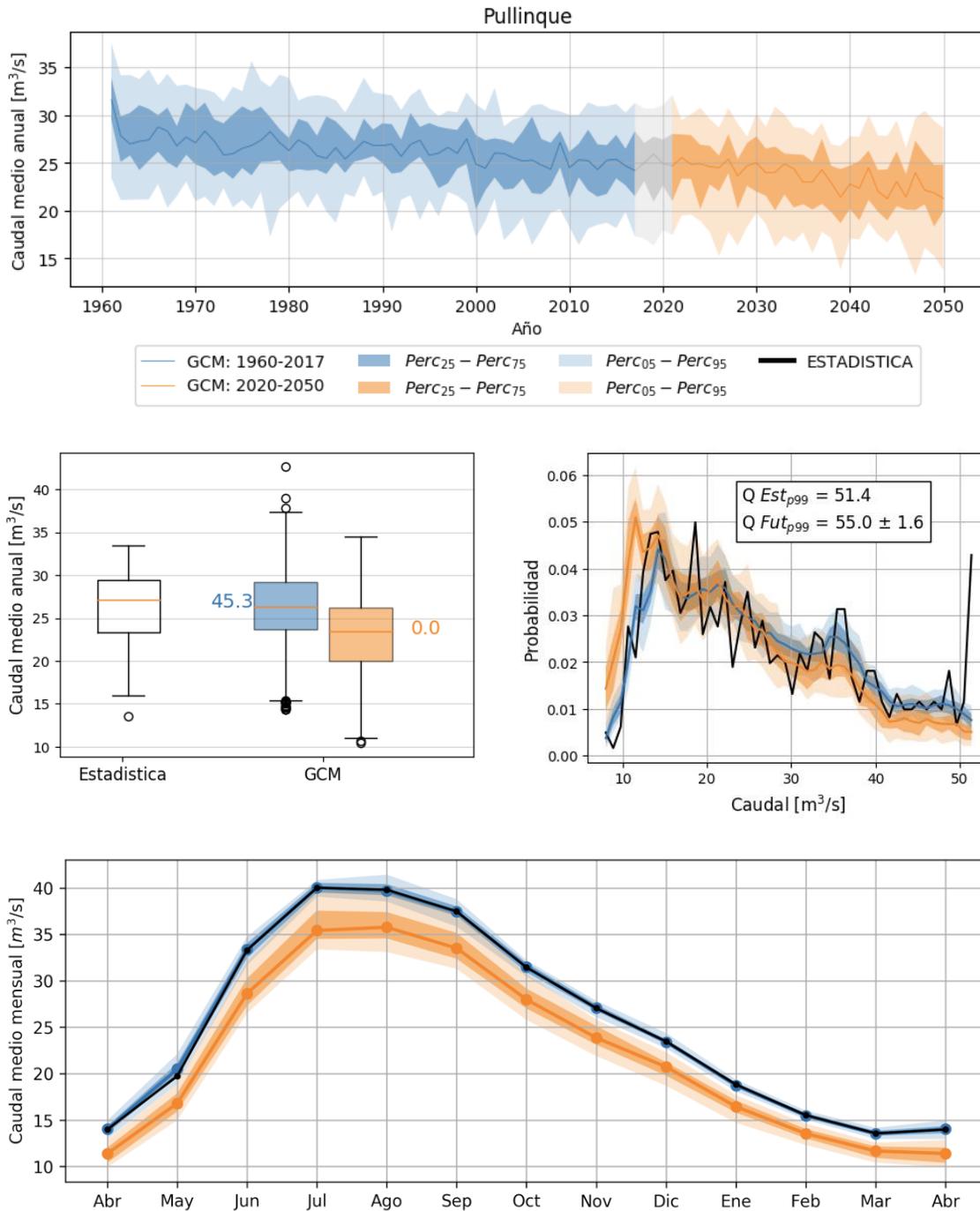


Figura 5.12. Caracterización de caudales simulados para el periodo histórico y futuro del punto de control Pullinque.  
Fuente: elaboración propia.

### 5.3.13 Canutillar

La Figura 5.13 presenta los resultados obtenidos para el punto de control Canutillar. En este punto de control, se logra una excelente calibración y los resultados simulados e históricos son indistinguibles con gran seguridad, lo que asegura que el modelo representa adecuadamente los procesos físicos al interior de la cuenca. Al igual que en los casos de Huequecura y Canutillar, el principal efecto sobre esta cuenca ocurre asociado a la disminución de la precipitación media. Además, cabe recordar que en estas cuencas el aumento de temperatura media proyectado es menor que para las cuencas ubicadas más al norte (esta es la cuenca que más al sur se ubica, estando a una distancia de aproximadamente 1.000 km de distancia). Sin embargo, a pesar de que no existe gran cambio en los valores medios, si se observa un cambio significativo en los variabilidad de estos, tanto a nivel anual como mensual.

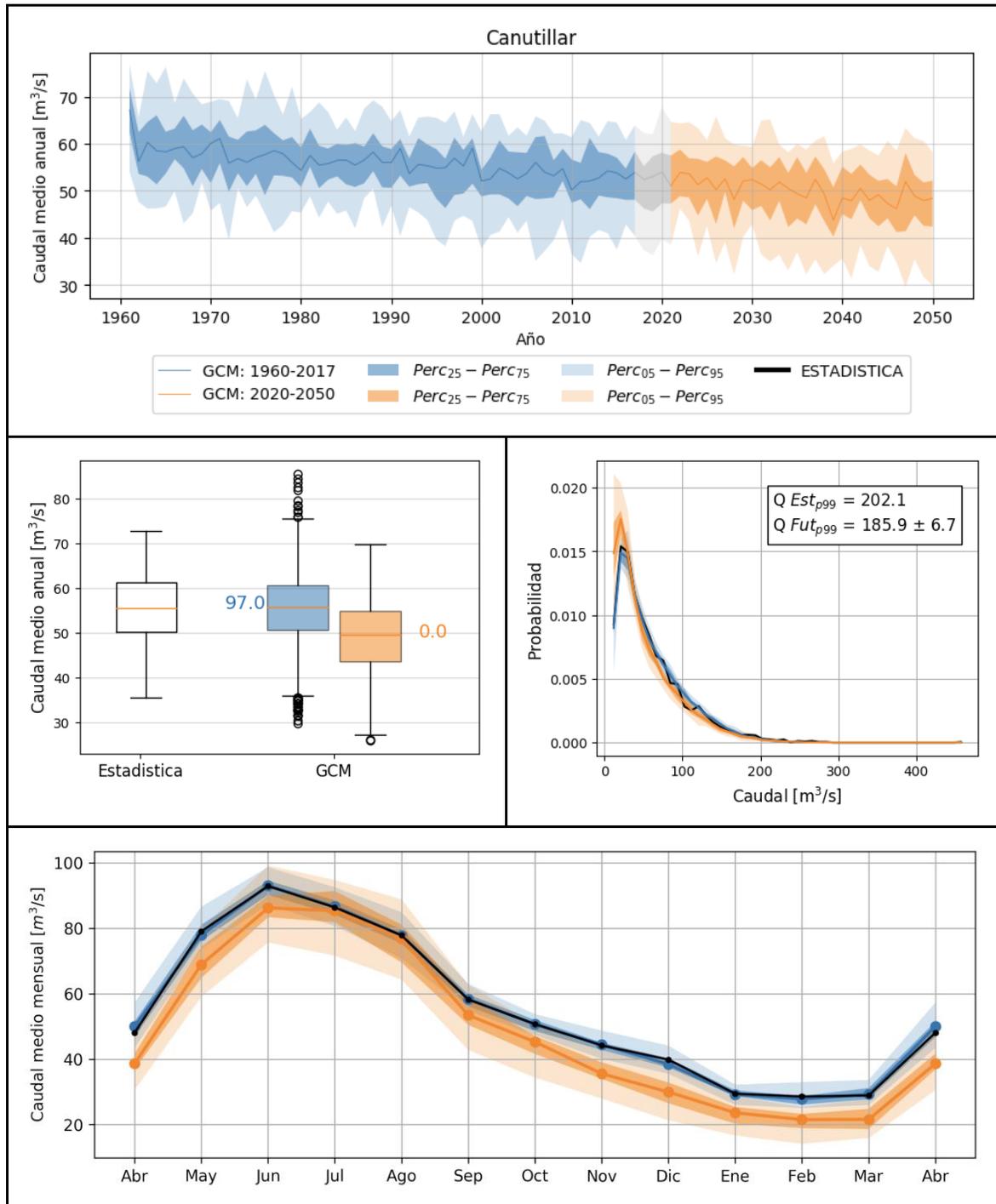


Figura 5.13. Caracterización de caudales simulados para el periodo histórico y futuro del punto de control Canutillar.  
Fuente: elaboración propia

## 5.4 Formato de entrega de la información

Los resultados de las simulaciones de caudales se pueden entregar en diversos formatos, según los requerimientos específicos de la CNE. A modo de propuesta, se ha generado archivos en formato XLSX (Excel) que contienen los datos completos para un punto de Control, cuya estructura se describe en la Tabla 5.3. En la Figura 5.3 se muestra una foto de pantalla del contenido del archivo. Los datos se ordenan en columnas que se definan según lo indicado en la Tabla a continuación. Un ejemplo del archivo de datos se adjunta con el presente informe como anexo digital.

Tabla 5.3. Columnas del archivo de datos propuesto para la entrega final. Habrá un archivo para cada punto de control.

Columna	Título	Descripción
1	-	Código año-semana (YYYYSS)
2	Fecha	Fecha del inicio de la semana
3	Ahydr	Año hidrológico
4	Mes	Mes (1 = Abril)
5	Semana	Semana (1 a 48)
6	ESTADISTICA	Datos de la estadística de los caudales, para los años hidrológicos 1960 a 2017
7 en adelante	§CODIGO_MODELO ejemplo: ACCESS1-0_r1i1p1	Datos de las simulaciones de caudal, para los años hidrológicos 1960 a 2049. Cada columna representa una simulación de caudal basado en los datos del modelo global indicado en el encabezado.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	Fecha	Ahydr	Mes	Semana	ESTADISTICA	CCSM4_r11p1	CSIRO-Mk3-6-0_r11p1	IPSL-CM5A-LR_r21p1	MIROC-ESM_r11p1	ACCESS1-0_r11p1	
1											
2	196001	1960-04-01 00:00:00	1960	1	1	70,75	13,30	13,39	10,68	26,15	13,10
3	196002	1960-04-08 00:00:00	1960	1	2	38,93	14,76	12,88	10,36	27,32	13,24
4	196003	1960-04-16 00:00:00	1960	1	3	31,41	12,45	14,80	11,58	20,05	9,92
5	196004	1960-04-23 00:00:00	1960	1	4	29,30	18,73	20,98	9,78	14,40	9,63
6	196005	1960-05-01 00:00:00	1960	2	5	28,71	13,06	11,13	9,74	48,75	9,35
7	196006	1960-05-08 00:00:00	1960	2	6	26,19	11,52	38,09	9,20	27,60	10,39
8	196007	1960-05-16 00:00:00	1960	2	7	34,00	79,07	85,75	23,17	34,39	11,02
9	196008	1960-05-24 00:00:00	1960	2	8	31,90	68,12	23,93	37,08	41,65	18,13
10	196009	1960-06-01 00:00:00	1960	3	9	31,90	80,99	35,67	33,53	36,50	16,74
11	196010	1960-06-08 00:00:00	1960	3	10	53,53	27,82	36,11	33,97	71,66	14,37
12	196011	1960-06-16 00:00:00	1960	3	11	129,99	34,42	41,41	131,58	67,60	14,79
13	196012	1960-06-23 00:00:00	1960	3	12	80,58	35,83	35,06	274,40	37,80	17,05
14	196013	1960-07-01 00:00:00	1960	4	13	68,82	13,32	49,60	86,93	32,84	30,26
15	196014	1960-07-08 00:00:00	1960	4	14	64,00	57,05	109,89	73,60	36,43	41,44
16	196015	1960-07-16 00:00:00	1960	4	15	92,22	65,08	164,51	128,16	57,65	20,24
17	196016	1960-07-24 00:00:00	1960	4	16	74,96	60,85	213,93	99,20	78,47	26,66
18	196017	1960-08-01 00:00:00	1960	5	17	60,97	54,83	99,41	84,96	96,40	35,76
19	196018	1960-08-08 00:00:00	1960	5	18	67,03	50,37	208,22	132,68	213,77	37,31
20	196019	1960-08-16 00:00:00	1960	5	19	59,47	65,84	387,04	135,35	174,38	63,04
21	196020	1960-08-24 00:00:00	1960	5	20	64,52	68,15	253,05	93,17	153,29	65,74
22	196021	1960-09-01 00:00:00	1960	6	21	68,32	74,94	357,61	89,58	150,03	49,09
4300	204927	2049-10-10 00:00:00	2049	7	27		34,09	40,44	26,34	182,47	36,11
4301	204928	2049-10-24 00:00:00	2049	7	28		24,12	32,90	23,58	77,02	42,92
4302	204929	2049-11-01 00:00:00	2049	8	29		30,17	30,10	21,61	56,01	33,56
4303	204930	2049-11-08 00:00:00	2049	8	30		23,42	27,00	20,22	45,68	28,69
4304	204931	2049-11-16 00:00:00	2049	8	31		21,65	23,92	18,60	32,78	25,31
4305	204932	2049-11-23 00:00:00	2049	8	32		18,80	21,65	16,12	28,68	22,50
4306	204933	2049-12-01 00:00:00	2049	9	33		16,90	20,50	14,87	25,40	20,56
4307	204934	2049-12-08 00:00:00	2049	9	34		18,56	19,26	19,06	22,62	18,77
4308	204935	2049-12-16 00:00:00	2049	9	35		14,92	16,76	14,36	20,78	25,74
4309	204936	2049-12-24 00:00:00	2049	9	36		14,40	15,59	13,35	18,66	19,86
4310	204937	2050-01-01 00:00:00	2049	10	37		13,93	14,83	12,95	18,31	21,41
4311	204938	2050-01-08 00:00:00	2049	10	38		13,52	14,37	12,56	16,59	15,05
4312	204939	2050-01-16 00:00:00	2049	10	39		13,09	13,90	12,15	15,92	14,49
4313	204940	2050-01-24 00:00:00	2049	10	40		13,77	13,48	11,95	14,92	15,81
4314	204941	2050-02-01 00:00:00	2049	11	41		13,89	13,26	11,43	14,67	13,62
4315	204942	2050-02-08 00:00:00	2049	11	42		11,95	12,75	15,16	14,56	14,35
4316	204943	2050-02-15 00:00:00	2049	11	43		11,68	12,39	12,45	13,70	16,77
4317	204944	2050-02-22 00:00:00	2049	11	44		11,96	12,05	10,52	13,18	12,90
4318	204945	2050-03-01 00:00:00	2049	12	45		11,37	11,73	10,24	13,90	12,86
4319	204946	2050-03-08 00:00:00	2049	12	46		10,69	11,38	9,93	14,11	14,35
4320	204947	2050-03-16 00:00:00	2049	12	47		10,55	11,12	9,63	12,65	37,34
4321	204948	2050-03-24 00:00:00	2049	12	48		9,99	10,88	9,36	14,44	24,67
4322											

Figura 5.3. Foto de pantalla del archivo Excel que contiene datos de las simulaciones de caudal. El periodo de datos extiende de 1960-04-01 al 2050-03-31. Fuente: Elaboración propia.

## 6 Generalización de la metodología a todos los puntos de interés

Durante los capítulos anteriores, se ha propuesto y validado un planteamiento metodológico que permite realizar proyecciones de la estadística hidrológica que incorporan el efecto de cambio climático.

En este capítulo se procede a generalizar la metodología para todos los puntos donde la CNE realiza modelación. Para efectos de generalización, existen dos tipos de puntos:

1. Puntos donde es posible aplicar la metodología propuesta, ya que se cuenta con información meteorológica, fluviométrica y topográfica para realizar simulaciones hidrológicas del régimen natural (o cuasi-natural).
2. Puntos donde la calidad de datos es insuficiente para aplicar la metodología, ya que la información fluviométrica no corresponde a régimen natural.

En el caso de los puntos que se encuentran dentro de la primera clasificación, es posible desarrollar el mismo planteamiento que se ha explicado y evaluado anteriormente. Sin embargo, para los puntos donde la calidad de datos no es adecuada para realizar un modelo hidrológico, es necesario plantear una metodología alternativa que permita realizar alguna estimación de forma tal que se cuente con información para este tipo de puntos también. Esto es fundamental, ya que el objetivo final de la nueva estadística bajo escenario de cambio climático requiere que exista información para todos los puntos de la red que incorpora la CNE.

Una primera preselección en base a un análisis de los datos sobre en qué puntos de control se podrá desarrollar un modelo hidrológico se presenta en la subsección 6.1. En la subsección 6.2 se propone una metodología alternativa de estimación de series para el periodo futuro, en aquellos puntos donde no se pueda aplicar la metodología propuesta de este trabajo. La En la sección 6.3 se entrega el listado de puntos para los que fue posible desarrollar modelos hidrológicos, mientras que en la sección 6.4 entrega el listado de puntos sobre los que se debió aplicar la metodología alternativa, detallando la razón para cada una de ellos. La sección 6.5 muestra una síntesis de la aplicación general de la metodología a los puntos.

### 6.1 Preselección de puntos a calibrar

La revisión de caudales consistió en evaluar de forma **cuantitativa** el comportamiento de las estadísticas de caudales proporcionadas por el Coordinador. Las estadísticas mencionadas se reparten en seis archivos, los cuales son:

- AflBiobioEtaSemRal.csv
- AflChapoEtaSem.csv
- AflLajaEtaSem.csv
- AflMauleEtaSem.csv

- AflRapelEtaSem.csv
- EnePasEtaMen\_SIC\_2019.csv

Como primer paso, se hace una revisión de la serie de estadísticas semanales y su distribución de valores. Esta revisión conlleva a la clasificación de cada estadística en uno de los siguientes grupos de diagnóstico:

- **datos constantes:** datos que se repiten de manera consecutiva por un largo periodo de tiempo.
- **datos copiados:** datos que se copian de un año hidrológico a otro.
- **datos no físicos:** valores que no obedecen a ningún tipo de variabilidad esperable. Es decir, no tienen régimen natural, ni tampoco poseen un truncamiento.
- **datos repetidos:** valores que se repiten de forma cíclica.
- **datos ruidosos:** datos cuya variabilidad intersemanal/intermensual es demasiado alta, apartándose de un régimen natural esperable.
- **datos truncados:** datos que poseen un límite superior o inferior, probablemente asociados a la presencia de bocatomas
- **sin problemas:** datos que no tienen asociados ninguno de los diagnósticos indicados anteriormente.

Un segundo punto a considerar es la potencia de las centrales asociadas a las estadísticas. La potencia neta máxima es extraída desde antecedentes del Coordinador, y se utiliza también como criterio de selección, dando prioridad a las centrales de mayor potencia instalada.

En base a los criterios anteriores, se definen dos tipos de revisiones, las cuales sirven para incorporar o descartar estadísticas de caudales a la modelación posterior:

- **Revisión estricta:** como su nombre lo indica, esta revisión solo permite considerar aquellas estadísticas de caudales que tengan un diagnóstico “sin problemas”, además de tener asociada una potencia neta máxima igual o superior a 10 MW. Cualquier otro diagnóstico será descartado.
- **Revisión permisiva:** esta revisión reduce algunas exigencias. No se considera la potencia neta máxima como criterio excluyente. Si bien, la revisión obedece al criterio experto, careciendo de una metodología netamente objetiva, se siguen las siguientes pautas para aceptar y utilizar estadísticas:
  - Se considera que la generalidad de las estadísticas con diagnóstico de “datos truncados” puede ser procesada para luego ser utilizada. Se descartan aquellas que tienen una calidad de datos sea evidentemente mala.

- Pueden ser utilizables aquellas estadísticas con diagnóstico de “datos ruidosos”, las que pueden ser susceptibles de ser corregidas mediante la aplicación de alguna especie de filtro temporal.
- Pueden ser utilizables las estadísticas con diagnóstico de “datos no físicos”, pero estos registros deben ocupar un corto periodo de tiempo dentro del grueso de datos.
- Pueden ser utilizables las estadísticas con diagnóstico de “datos repetidos”, pero cuyo periodo tenga corta duración.

Las estadísticas con diagnósticos de “datos constantes” y “datos copiados” siguen siendo descartadas.

En función de estos criterios, y considerando el criterio permisivo, se obtuvo que del total de 181 puntos para los que se debe desarrollar una estadística, 80 de ellos no son modelables y requieren de una metodología alternativa. Los restantes 101 puntos son potenciales candidatos a ser modelables, si es que cumplen con las características necesarias para ser información base para un modelo hidrológico.

## 6.2 Metodología alternativa propuesta

Los resultados de este estudio demuestran que las series de estadística hidrológica han cambiado desde el comienzo de su registro. Es por esta razón que se planteó realizar modelaciones que consideren los efectos del cambio climático de forma explícita a través del uso de forzantes meteorológicas proyectadas. Existen restricciones a esta metodología, asociadas principalmente a la información de entrada requerida para desarrollar los modelos hidrológicos. En particular, resulta un factor limitante el no contar con series de caudales en régimen natural, lo cual imposibilita desarrollar un modelo hidrológico para un punto.

Sin embargo, para poder utilizar la información obtenida de los modelos hidrológicos en las cuencas donde existe, se requiere de una base de datos que se encuentre completa. Por esta razón, es necesario plantear una metodología alternativa, que permita por lo menos tener una base de formato coherente con los resultados obtenidos de los puntos que sí cuentan con modelos hidrológicos, sobre los que se realizan proyecciones de caudales. Esto requiere tener 34 series de caudales que tengan información para el periodo de los años hidrológicos entre 1960/61 a 2049/50.

Lamentablemente, ante la imposibilidad de desarrollar modelos hidrológicos, resulta necesario hacer el supuesto de que la estadística histórica refleja de manera aproximada el rango de posibilidades que se pueden ejecutar sobre un determinado punto. Dicho esto, el

problema de generar base de datos para estos puntos se separa naturalmente en dos: replicar la situación histórica y proyectar caudales para el periodo 2020/2021 a 2049/50.

Se propone como metodología alternativa lo siguiente:

- a) En el caso del periodo histórico, se utiliza la misma serie estadística que se tiene como registro para las 34 distintas simulaciones.
- b) Para el periodo 2020-2050 donde no se cuenta con modelos hidrológicos, generar series aleatorias, aleatorizando la base de posibles años hidrológicos que se tienen.

Dado que las estadísticas hidrológicas cuentan con más de 60 años de datos, el efecto del cambio climático es efectivamente visible. Esto resulta relevante en el caso del punto b), por lo que utilizar toda la información de la serie no reflejaría apropiadamente las condiciones más recientes del clima. Dicho esto, se propone utilizar los últimos 32 años de la estadística como base para la generación de series aleatorias.

Se muestra un esquema de la generación de las series aleatorias en la Figura 6.1. El procedimiento entonces consiste en:

- 1) Se conforma una base de datos para cada punto, que considera un total de 32 años hidrológicos distintos, basados en los 32 años más recientes. A cada año se les asigna un identificador numérico.
- 2) Se generan 34 series aleatorias con los números desde el 1 al 32, con el fin de representar cada uno de los GCM disponibles.
- 3) Para cada punto, se toma una serie de números aleatorios y se genera una serie de caudales por medio de concatenar los valores del año hidrológico correspondiente a cada índice. Este proceso se repite para cada una de las 34 series que representan los GCM.
- 4) Se repite este proceso para cada uno de los puntos donde no fue posible realizar un modelo hidrológico.

Es importante destacar que las series de números aleatorios utilizadas para cada punto son las mismas, asegurando así coherencia entre las series generadas de esta manera.

Una vez que se cuenta con las 34 series distintas para cada punto, se agregan como continuación de la serie estadística histórica observada de cada punto.

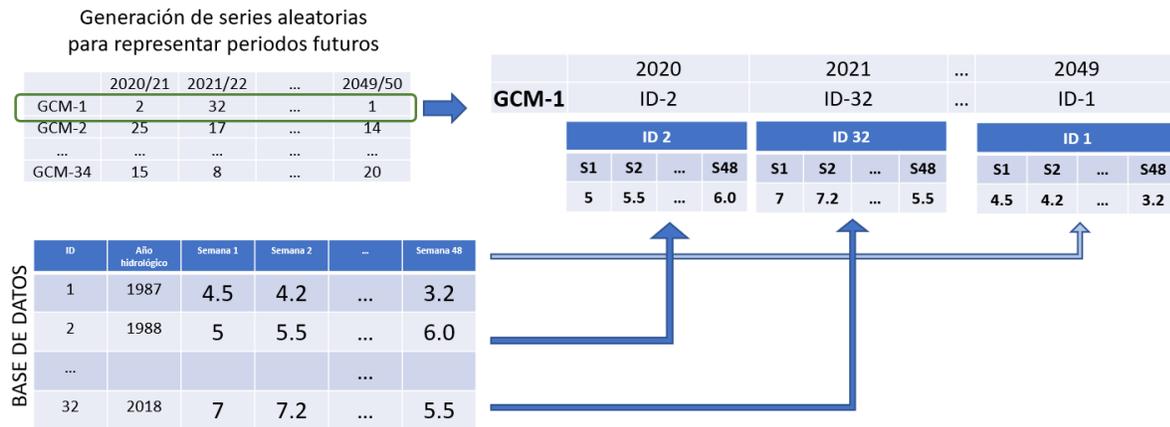


Figura 6.1. Esquema del procedimiento realizado para obtener series aleatorias del periodo 2019-2050, utilizando como base la información de los años más recientes de la estadística observada.

Dado que para todos los puntos existe estadística desde 1960 hasta 2018, solo es necesario generar escenarios futuros para el periodo 2019-2050. Esto corresponde a 31 años hidrológicos. Lo que proponemos para generar escenarios para estos puntos sin información es utilizar la información de los últimos 31 años (el periodo comprendido entre 1987-2018). Esto se basa en una de las conclusiones del estudio, donde se muestra que efectivamente se observan diferencias entre los valores medios del principio de la estadística, con los de los últimos periodos. Con el fin de dar una cierta variabilidad, proponemos generar 34 escenarios distintos, por medio de reordenar aleatoriamente los 31 años descritos para que así tengan cierta variabilidad en los escenarios.

### 6.3 Cuencas modeladas

El detalle de las cuencas para las que fue posible aplicar la metodología basada en modelos hidrológicos se presentan en la

Nombre	Nombre modelo	KGE	Empresa coordinada	Potencia [MW]
Alfalfal	alfalfal	0,732	Aes Gener	178
Angostura	angostura	0,896	Colbún	323,8
Blanco	blanco	0,799	Colbún	57
Balance Riego Laguna Maule	Balance_riego_laguna_maule	0,802	Colbún	
Bocatoma Canal Alto Polcura	bocatoma_canal_alto_polcura	0,862	Enel	450
Bocatoma Lenca	bocatoma_lenca	0,714	Colbún	170,2
Bocatoma Maule Isla	bocatoma_maule_isla	0,887	Enel	69
Bocatoma Polcura	bocatoma_polcura	0,783	Enel	320
Bocatoma Rio Rucue	bocatoma_rio_rucue	0,809	Colbún	178,4
Carilafquén	carilafquen	0,623	Empresa Eléctrica Caren S.A.	19,8

Nombre	Nombre modelo	KGE	Empresa coordinada	Potencia [MW]
Chacayes	chacayes	0,845	Pacific Hydro	111,7
Cumbres	cumbres	0,641	SIED	14,9
Don Walterio	don_walterio	0,743	Sociedad Generadora Eléctrica Rhomaya S.A.	3
Dos Valles	dos_valles	0,855	Hidroeléctrica Dos Valles spA	3
El Canelo	el_canelo	0,698	Hidroeléctrica El Canelo S.A.	6,1
El Manzano	el_manzano	0,703	Hidroeléctrica El Manzano S.A.	4,9
Embalse Colbún	embalse_Colbún	0,769	Colbún	474
Embalse Pangué	embalse_pangué	0,726	Enel	450
Embalse Ralco	embalse_ralco	0,913	Enel	690
Hidromocho	hidromocho	0,635	Hidromocho S.A.	15
Hornitos_ch	hornitos	0,859	Colbún	55
Itata	itata	0,887	Eléctrica Puntilla S.A.	20
Confluencia	la_confluencia	0,864	Pacific Hydro	163,2
La Higuera	la_higuera	0,819	Pacific Hydro	155
Lago Chapo	lago_chapo	0,787	Colbún	170,2
Laguna Invernada	laguna_invernada	0,852	Enel	105
Lago Laja	laguna_laja	0,852	Enel	450
Laguna Del Maule	laguna_maule	0,719		
Licán	lican	0,701	Eléctrica Lican S.A.	17
Los Quilos	los_quilos	0,828	Colbún	39,9
Malalcahuello	malalcahuello	0,823	Caren S.A.	9,2
Mampil	mampil	0,846	Orazul Energy	55
Nuble	nuble	0,893	Eléctrica Puntilla S.A.	136
Palmar + Correntoso	palmar_correntoso	0,596	SIED	16
Peuchén	peuchen	0,837	Energía Llama	85,6
Pilmaiquén	pilmaiquen	0,857	Pilmaiquén S.A.	39
Pulelfú	pulelfu	0,845	Eléctrica La Leonera S.A.	9
Pullinque	pullinque	0,915	Pullinque S.A.	51,4
Balance Riego Armerillo R105	riego_armerillo	0,826		
Riego Melado	riego_melado	0,829		
Riego Tucapel	riego_tucapel	0,836		
Rucatayo	rucatayo	0,851	Grupo Pilmaiquén	55
San Pedro	san_pedro	0,890	Colbún	170
Santa Elena	Santa_elena	0,566	Hidroeléctrica Santa Elena S.A.	2,8
Trupán	trupan	0,781	Asociación Canalistas Canal Zañartu	20

Nombre	Nombre modelo	KGE	Empresa coordinada	Potencia [MW]
--------	---------------	-----	--------------------	---------------

Tabla 6.1. Detalle de cuencas para las que fue posible desarrollar un modelo hidrológico sin observaciones. 5362,8 MW en total

, para las cuencas que no presentaban observaciones, y en la Tabla 6.2, para las cuencas con observaciones menores. La potencia instalada total en los modelos sin observaciones es de 5.362,8 MW. El tipo de dato de estos modelos en general es de información de caudales, con un par de excepciones. Los modelos que presentan leves observaciones representan un total de 633,4 MW. En función de la calidad de los datos, se tuvieron algunas dificultades que limitan un poco el desempeño de los modelos hidrológicos. En algunos casos, representan un problema en el planteamiento de la calibración. En otros casos, son observaciones referentes a los resultados de simulación. La dificultad que se tiene para cada modelo se detalla en la columna observación de la Tabla 6.2.

El detalle de cada uno de las observaciones se presenta a continuación:

- a) **CAMBIO DE MÉTODO DE MEDICIÓN:** en algún año dentro del periodo más reciente se observa un cambio en el sistema de medición, pasando usualmente de caudales estimados en base de energía a caudales al parecer medidos.
- b) **DESEMPEÑO REGULAR PERO ASOCIADO A CAUDALES BAJOS:** estos modelos presentan un desempeño en general menor a lo esperable, pero se mantienen ya que están asociados a centrales de poca potencia instalada. Considerando esto, se optó por dejarlas ya que el error asociado para ejercicios de modelación se estima menor.
- c) **PERIODO RECIENTE DEFICIENTE:** modelo en general calibra bien todo el periodo histórico, pero tiene problemas para representar los últimos años de sequía. Esto ocurre a pesar de haber logrado representar adecuadamente otros periodos secos.
- d) **POCA VARIABILIDAD INTERANUAL:** el modelo no logra reproducir de manera completa el rango de variabilidad interanual.
- e) **PROBLEMAS LEVES DE ESTACIONALIDAD:** el modelo presenta algunos problemas en la estacionalidad de los caudales, pero reproduce bien las medias anuales. En particular, este problema que ocurre en la cuenca del río Rapel puede guardar relación con un aumento local de caudales en la época de verano asociado a las actividades de agricultura.

Nombre	Nombre modelo	KGE	Empresa coordinada	Potencia [MW]	Tipo de dato
Alfalfal	alfalfal	0,732	Aes Gener	178	DatCau
Angostura	angostura	0,896	Colbún	323,8	DatCau
Blanco	blanco	0,799	Colbún	57	DatCau
Balance Riego Laguna Maule	Balance_riego_laguna_maule	0,802	Colbún		DatCau
Bocatoma Canal Alto Polcura	bocatoma_canal_alto_polcura	0,862	Enel	450	DatCau
Bocatoma Lenca	bocatoma_lenca	0,714	Colbún	170,2	DatCau
Bocatoma Maule Isla	bocatoma_maule_isla	0,887	Enel	69	DatCau
Bocatoma Polcura	bocatoma_polcura	0,783	Enel	320	DatCau
Bocatoma Rio Rucue	bocatoma_rio_rucue	0,809	Colbún	178,4	DatCau
Carilafquén	carilafquen	0,623	Empresa Eléctrica Caren S.A.	19,8	DatCau
Chacayes	chacayes	0,845	Pacific Hydro	111,7	DatCau
Cumbres	cumbres	0,641	SIED	14,9	DatEne
Don Walterio	don_walterio	0,743	Sociedad Generadora Eléctrica Rhomaya S.A.	3	DatEne
Dos Valles	dos_valles	0,855	Hidroeléctrica Dos Valles spA	3	DatEne
El Canelo	el_canelo	0,698	Hidroeléctrica El Canelo S.A.	6,1	DatEne
El Manzano	el_manzano	0,703	Hidroeléctrica El Manzano S.A.	4,9	DatEne
Embalse Colbún	embalse_Colbún	0,769	Colbún	474	DatCau
Embalse Pangué	embalse_pangué	0,726	Enel	450	DatCau
Embalse Ralco	embalse_ralco	0,913	Enel	690	DatCau
Hidromocho	hidromocho	0,635	Hidromocho S.A.	15	DatEne
Hornitos_ch	hornitos	0,859	Colbún	55	DatCau
Itata	itata	0,887	Eléctrica Puntilla S.A.	20	DatCau
Confluencia	la_confluencia	0,864	Pacific Hydro	163,2	DatCau
La Higuera	la_higuera	0,819	Pacific Hydro	155	DatCau
Lago Chapo	lago_chapo	0,787	Colbún	170,2	DatCau
Laguna Invernada	laguna_invernada	0,852	Enel	105	DatCau
Lago Laja	laguna_laja	0,852	Enel	450	DatCau

Nombre	Nombre modelo	KGE	Empresa coordinada	Potencia [MW]	Tipo de dato
Laguna Del Maule	laguna_maule	0,719			DatCau
Licán	lican	0,701	Eléctrica Lican S.A.	17	DatEne
Los Quilos	los_quilos	0,828	Colbún	39,9	DatCau
Malalcahuello	malalcahuello	0,823	Caren S.A.	9,2	DatCau
Mampil	mampil	0,846	Orazul Energy	55	DatEne
Nuble	nuble	0,893	Eléctrica Puntilla S.A.	136	DatCau
Palmar + Correntoso	palmar_correntoso	0,596	SIED	16	DatEne
Peuchén	peuchen	0,837	Energía Llaima	85,6	DatEne
Pilmaiquén	pilmaiquen	0,857	Pilmaiquén S.A.	39	DatCau
Pulelfú	pulelfu	0,845	Eléctrica La Leonera S.A.	9	DatEne
Pullinque	pullinque	0,915	Pullinque S.A.	51,4	DatEne
Balance Riego Armerillo R105	riego_armerillo	0,826			DatCau
Riego Melado	riego_melado	0,829			DatCau
Riego Tucapel	riego_tucapel	0,836			DatCau
Rucatayo	rucatayo	0,851	Grupo Pilmaiquén	55	DatCau
San Pedro	san_pedro	0,890	Colbún	170	DatCau
Santa Elena	Santa_elena	0,566	Hidroeléctrica Santa Elena S.A.	2,8	DatEne
Trupán	trupan	0,781	Asociación Canalistas Canal Zañartu	20	DatCau

Tabla 6.1. Detalle de cuencas para las que fue posible desarrollar un modelo hidrológico sin observaciones. 5362,8 MW en total.

Nombre	Nombre modelo	KGE	Empresa coordinada	Potencia [MW]	Tipo de dato	Observación
Dongo	dongo	0,585	Hidroeléctrica Dongo SpA	6	DatEne	CAMBIO DE MÉTODO DE MEDICIÓN
Capullo	capullo	0,705	Empresa Eléctrica Capullo S.A.	12	DatEne	
Picoiquén	picoiquen	0,803	Scotta	19,2	DatEne	
La Arena	la_arena	0,573	Eléctrica La Arena	3	DatCau	DESEMPEÑO REGULAR PERO ASOCIADO A CAUDALES BAJOS
CH Bonito 1	ch_bonito1	0,419	SIED	9	DatEne	
CH Callao	ch_callao	0,734	SIED	3,3	DatEne	
CH Nalcas	ch_nalcas	0,545	Scotta	6,8	DatEne	
Chacabuquito	chacabuquito	0,893	Colbún	25,7	DatCau	
San Andrés	san_andres	0,812	HydroChile	40	DatCau	PERIODO RECIENTE DEFICIENTE
El Pinar	el_pinar	0,581	El Pinar S.A.	11,4	DatEne	
El Paso	el_paso	0,807	HydroChile	60	DatCau	
Los Molles	Los_molles	0,808	Enel	18	DatCau	
Guayacán	guayacan	0,603	Coyanco S.A.	12	DatCau	POCA VARIABILIDAD INTERANUAL
Lago Rapel	lago_rapel	0,630	Enel	375	DatCau	PROBLEMAS LEVES DE ESTACIONALIDAD
Juncal	juncal	0,834	Colbún	32	DatCau	
Juncalito	juncalito	0,798	Colbún		DatCau	

Tabla 6.2. Detalle de cuencas para las que fue posible desarrollar un modelo hidrológico con algún tipo de observación. 633,4 MW en total.

## 6.4 Cuencas con metodología alternativa

Se describen en esta sección todas las cuencas donde se aplica la metodología alternativa propuesta para generar series a futuro, debido a que no fue posible desarrollar un modelo hidrológico.

La Tabla 6.3 representa los puntos donde no es posible realizar un modelo hidrológico, debido a que no se cumple con los criterios mínimos de calidad de datos descritos en el punto 6.1 de este capítulo. La cantidad de puntos que caen en esta categoría son 80 en total, y en conjunto suman una potencia instalada de 360 MW.

La Tabla 6.4 muestra el listado de puntos que se encuentran asociados a canales o embalses. La información de estos puntos está asociada a los caudales medidos en canales de trasvasije desde un cauce a otro lugar, pudiendo ser este una central, un lago u otro cauce. La magnitud de dichos puntos queda determinada exclusivamente por la operación de dicho canal y resulta por tanto imposible de modelar. Los puntos de control que caen en esta categoría son 5 y suman una potencia instalada de 74,8 MW.

La Tabla 6.5 presenta los puntos de control donde las series de caudales, habiendo pasado la preinspección de series de caudales, presentaron problemas al momento del desarrollo de los modelos hidrológicos. Dichos problemas se encuentran asociados principalmente a que los caudales que en principio parecían en régimen natural, correspondían a caudales de operación en bocatomas o estimados en base a series de generación que no representaban adecuadamente las condiciones del cauce, ocurriendo un fenómeno equivalente a lo de los puntos asociados a canales y embalses. En total, son 14 puntos que representan 351 MW de potencia instalada.

La Tabla 6.7 presenta los puntos donde por diversos motivos no fue posible definir la cuenca asociada para modelación. En total, son 7 puntos y suman un total de 20,44 MW. Las razones para este caso son múltiples y varían entre imposibilidad de encontrar un punto representativo de la definición de la cuenca, tamaño muy pequeño asociado, entre otras.

Finalmente, la Tabla 6.7 presenta los puntos en que no se realiza modelación ya que actualmente son proyectos hidroeléctricos por desarrollar y sus estadísticas son aproximaciones en base a otros registros disponibles. En particular, los puntos de Alfalfal 2 y Las Lajas, a pesar de tener una buena serie de caudales sobre las que trabajar, no pudieron ser modelados ya que no se logró identificar los puntos de captación efectivos, por lo que no se pudo definir las cuencas aportantes respectivas.

Punto de control / central	Potencia [MW]	Punto de control / central	Potencia [MW]	Punto de control / central	Potencia [MW]
Allipen	2,7	Hidrorininahue	0,9	Muchi	1
Alto Renaico	1,5	La Bifurcada	0,2	Munilque 1	0,55
Arrayan	0,2	La Higuera_RBC		Munilque 2	0,55
Boquiamargo	1,1	La Montana	3	Palacios_RBC	
Bureo	2,2	La Montana 2	1,9	Panguipulli	0,4
Caliboro	1,4	La Paloma	4,6	Pehui	1,1
Carena	10	La Vina-Alto La Vina	0,6	Pichilonco	1,2
CH Rio Huasco	5,1	Laja I_rbc		Piutel	0,54
Collil	7	Las Flores	1,6	Providencia	14
Confluencia_RBC		Las Vertientes	1,7	Puclaro	5,6
Contra	0,3	Lircay	19	Puntilla	22,2
Coya	12	Los Bajos	5,6	Purísima	0,42
Curileufu	0,2	Los Corrales	0,845	Queltehues	48
Dona Hilda	0,3	Los Corrales 2	1,035	Quillaileo	0,83
Donguil	0,3	Los Hierros	25,06	Reca	1,6
Dos Valles_RBC		Los Hierros 2	6	Renaico Hidro	6,2
El Arrayan	0,2	Los Padres	0,2	Río Trueno	5,8
El Colorado	2	Maisan	0,59	Roblería	4
El Diuto	3,25	Maitenes	31	San Andres_RBC	
El Galpon	1,3	Maitenes_am	31	Santa Isabel	1,4
El Llano	2	Mallarauco	3,4	Sauce Andes	1,4
El Paso_RBC		María Elena	0,305	Sauzalito	12
El Rincon	0,3	Mariposas	6	Trailelfu	2,5
El Tartaro	0,1	MCH Dosal	0,27	Tranquil	2,9
Ensenada	6,6	MCH El Brinco	0,2	Trifultriful	0,9
Eyzaguirre	2,1	Melo	3	Volcan	14
Guayacan_am		Molinera Villarica	0,6		

Tabla 6.3. Listado de centrales que no son modeladas debido a que no cumplen con los criterios de revisión permisiva. 360 MW en total, 80 puntos.

Nombre	Observación	Potencia [MW]
Ancoa	EMBALSE	24,7
Convento Viejo	CANAL	16
Florida	CANAL	28,5
Los Morros	CANAL	2,6
Palacios	CANAL	3

Tabla 6.4. Listado de puntos de control que se encuentran asociados a canales o embalses. Representan 74.8 MW en total, 5 puntos.

Nombre	Potencia [MW]	Nombre	Potencia [MW]
Auxiliar del Maipo	5,1	Mulchen	3
Boc. Maule Melado		Sauzal	76,8
Digua	20	Lleuquereo	
La Mina	37,2	Rio Colorado	16,5
Laja I	34,3	Las Nieves	6,5
Abanico	136	CH Bonito 2	3,2
MCHP Cipresillos	9	Chanleufu	3,4

Tabla 6.5. Listado de puntos para los que no fue posible calibrar un modelo hidrológico debido a que la serie de caudales que se tenía para cada punto no presentaba condiciones de régimen natural y/o calidad suficiente para ser usadas como insumo de modelación. En total, son 14 puntos que representan 351 MW de potencia instalada.

Nombre	Potencia [MW]
Cumpeo	5,8
El Agrio	2,5
El Mirador	3
Los Colonos	0,64
MSA-1	3
San Clemente	5,5
Vina Tarapacá	

Tabla 6.6. Puntos de control para los cuales no fue posible definir una unidad de modelación.

Nombre	Nombre	Nombre
Aillín	Hidroeléctrica VIII Región 02	La compañía 2
Grupo MH X Región 01	Hidroeléctrica VIII Región 03	La Confianza
Hidroeléctrica VII Región 02	Hidroeléctrica VIII Región 05	Alfalfal Almacenamiento
Hidroeléctrica VII Región 03	Hidroeléctrica X Región 02	Alfalfal 02
		Las Lajas

Tabla 6.7. Listado de puntos de control que no requieren modelación, por ser proyectos aún por desarrollar.

## 6.5 Resumen

Según la clasificación del total de puntos descritos en las secciones 6.3 y 6.4, se concluye que aproximadamente el 88% de la potencia total instalada de los puntos queda representada en modelos hidrológicos que dan cuenta de los efectos del cambio climático en las estadísticas desarrolladas. Para el 12% restante, asociado a los puntos donde fue posible realizar un modelo hidrológico, se desarrolló una metodología alternativa que permite abordar la influencia del cambio climático de forma indirecta.

La Figura 6.2 muestra un gráfico circular que muestra la distribución de la potencia según cada una de las categorías previas.

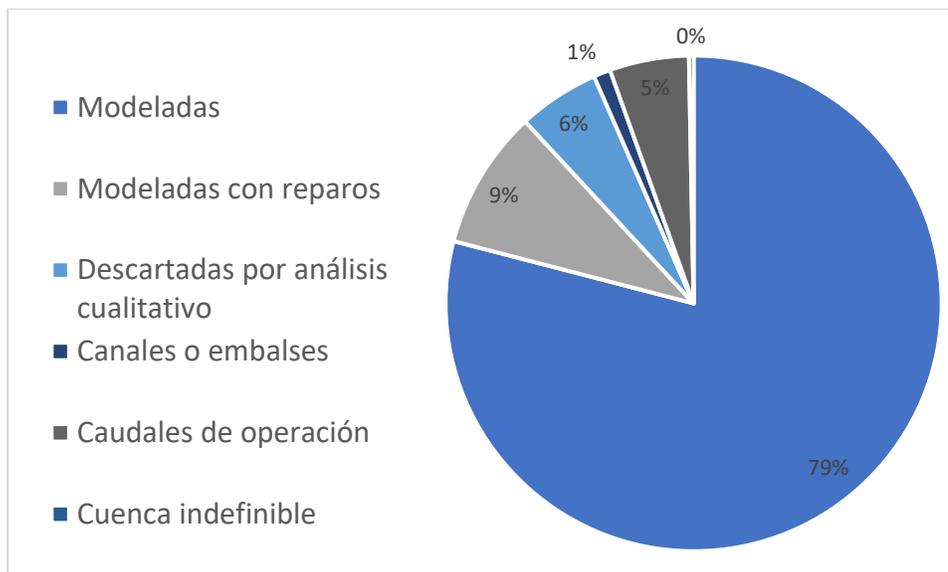


Figura 6.2. Distribución de la potencia instalada total considerada entre todos los puntos de control y la categoría bajo la que fue desarrollada su estadística para los escenarios de cambio climático.

## 7 Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con los términos de referencia del estudio, el objetivo general es analizar la representatividad de las hidrologías utilizadas en los modelos de planificación utilizados por la CNE, considerando el impacto de la variabilidad natural y el impacto proyectado por el cambio climático. Los objetivos específicos, por su parte, son:

- a. Analizar los efectos del cambio climático y la variabilidad natural de los caudales representados en la información estadística hidrológica utilizada en los modelos de planificación.
- b. Analizar la representatividad de la estadística hidrológica disponible, determinando las hidrologías que se recomienda utilizar en los procesos de planificación.
- c. Definir una metodología que permita determinar la información estadística a utilizar en los modelos de planificación a medida que se dispone de un mayor volumen de información.

Las conclusiones y recomendaciones de este estudio se orientarán entonces a responder, comentar y sugerir, basado en el trabajo desarrollado.

Para cumplir con dichos objetivos, se ha diseñado e implementado un esquema de modelación hidrológica que permite generar proyecciones del caudal en los puntos de control que cuentan con información histórica de caudal confiable. Para un punto de control determinado, el proceso de modelación consiste en tres pasos principales:

- 1) La **calibración** de un modelo hidrológico configurado para la cuenca y forzado con datos meteorológicos (temperatura y precipitación) que correspondan a observaciones.
- 2) La aplicación de técnicas de **escalamiento** (*downscaling*) a simulaciones globales climáticas de modelos considerando en el proyecto CMIP-5.
- 3) La combinación de ambos pasos anteriores, donde se corre el modelo hidrológico, debidamente calibrado, utilizando como datos de entrada las proyecciones de precipitación y temperatura obtenidos en el paso anterior. Dado que las proyecciones tienen incorporados el impacto de cambio climático en las variables meteorológicas, los caudales simulados por el modelo dan cuenta del impacto proyectado por el GCM sobre la hidrología de la cuenca que se está modelando.

El producto final del esfuerzo de modelación es una base de datos de un total de 34 simulaciones hidrológicas diferentes para cada cuenca, donde cada una abarca un periodo

que extiende desde el año hidrológico 1960 hasta el año 2050 (31 años hacia el futuro al momento de elaboración de este informe, y 90 años en total). Cada simulación se puede entender como una muestra *plausible* del clima histórico y futuro, y está relacionada con un GCM distinto. Es importante entender que las simulaciones no buscan replicar las condiciones históricas que se observaron desde el año 1960 a la fecha, sino intentan generar series de tiempo que conservan las propiedades climáticas (o estadísticas) del caudal observado, tales como el caudal medio, el ciclo estacional y la distribución de frecuencia caudal semanal.

En general, en 12 de las 13 cuencas que se modelaron para establecer una metodología piloto, se logró obtener una calibración exitosa. En algunos puntos se tuvieron algunas dificultades (hoya intermedia Colbún, hoya intermedia Pehuenche), principalmente asociadas a la calidad de los datos fluviométricos. La información de estas cuencas en general corresponde a series reconstruidas en función de muchos otros términos y arrastran por tanto la acumulación de los errores de cada uno de ellos. A pesar de esto, se considera que se logra reproducir adecuadamente los procesos al interior de las cuencas. La única excepción a esto corresponde a la cuenca del río Rapel. Esta cuenca no logró ser calibrada exitosamente, debido a que dentro del área que contiene existen múltiples usuarios de agua que alteran el régimen natural de la serie. Como los modelos hidrológicos buscan representar procesos naturales, estas distorsiones imposibilitan al modelo de representar adecuadamente los procesos físicos al interior de la cuenca. Los resultados que se muestran para esta cuenca son solo referenciales y no debiesen utilizarse como insumo para la planificación.

**Con respecto a las cuencas que sí lograron calibrarse exitosamente, los resultados del estudio permiten analizar los efectos del cambio climático y la variabilidad natural de los caudales representados en la estadística. Esto abarcaría entonces el punto a de los objetivos.**

Los impactos principales se resumen a continuación:

- Se proyecta una disminución<sup>4</sup> del caudal medio en aproximadamente 15% para el periodo 2020 a 2050, con mayor disminución en el norte y menos en el sur, asociado directamente a la disminución de precipitación media anual como factor de mayor importancia, y del aumento de la temperatura, como segundo factor de importancia.
- La disminución media varía significativamente entre las diferentes proyecciones (GCM). Las proyecciones más pesimistas indican disminuciones entre -25 y -47%, mientras las simulaciones más optimistas muestran incluso leves aumentos en algunos casos. Sin embargo, una de las ventajas de contar con el gran número de

---

<sup>4</sup> El porcentaje de disminución se calcula con referencia al periodo 1960 a 2017.

simulaciones (34 simulaciones, asociadas a distintos modelos) permiten obtener un rango de incertidumbre de las proyecciones.

- En el caso de las cuencas que presentan regímenes hidrológicos nivales o nivopluviales, se observan cambios tanto en el caudal medio anual como en la distribución temporal de los caudales. Las curvas de variación estacional se ven distorsionadas producto de los aumentos de temperatura proyectados. Estos aumentos de temperatura, dependiendo de la intensidad, tienen consecuencias como el adelantamiento del mes donde se encuentra el caudal máximo de deshielo, la disminución de los caudales medios en la curva de recesión del proceso de deshielo e incluso en los casos más extremos un cambio de régimen hidrológico desde nivopluvial a pluvial (casos de Ralco y Angostura). Adicionalmente, en este tipo de cuencas la disminución de los caudales asociados a deshielo ven disminuidos sus magnitudes ya que los procesos de almacenamiento en forma de nieve se ven disminuidos debido al aumento de temperaturas lo cual disminuye el área donde se tienen precipitaciones sólidas.
- En el caso de las cuencas que presentan regímenes pluviales, los impactos asociados al cambio climático se encuentran principalmente relacionados a la disminución de los montos de precipitación, y donde el aumento de temperatura proyectado no genera efectos relevantes. Cuencas como Huequecura, Pullinque y Canutillar tienen proyecciones donde los caudales medios mensuales disminuyen de forma relativamente uniforme, y sin cambios mayores en su distribución temporal. Además, también asociado a los cambios de la precipitación, la variabilidad que se tiene a nivel mensual tiende a aumentar en todas las cuencas.

En la actualidad, la CNE ocupa la estadística del caudal para el periodo 1960 – 2017 como entrada para sus modelos de planificación que abarcan un horizonte de al menos 20 años hacia el futuro. Respondiendo entonces al segundo punto donde se debe *analizar la representatividad de la estadística hidrológica disponible*, se puede concluir que los resultados del presente estudio demuestran que **la estadística histórica no es representativa del periodo futuro que se pretende modelar, ya que los efectos de cambio climático parecen ser suficientemente grandes para tener un impacto significativo en la planificación del sistema interconectado, a pesar de que los resultados de las simulaciones del siglo XX muestran que existe una alta variabilidad natural.**

En función del punto anterior, **se recomienda utilizar como entrada la base de datos entregada con el presente estudio**, en vez de la estadística observada como metodología para abordar esta incertidumbre de información y poder representar el impacto de cambio climático en los modelos de planificación de la CNE. Dado que los modelos de planificación utilizado por la CNE consideran series mensuales de caudal, la nueva base de datos se puede

adaptar sin dificultad a los formatos requeridos por los modelos de la CNE. A pesar de que algunas cuencas presentan leves dificultades en el proceso de modelación, los tests estadísticos que demuestran que las series de caudales provienen de la misma serie dan un respaldo sólido a esta sugerencia.

Para el caso de ejercicios de modelación, se recomienda utilizar los caudales simulados para el mismo periodo abarcado por el modelo de planificación. Por ejemplo, si la CNE pretende realizar una simulación de precio de nudo para el periodo 2020 a 2040, se debe utilizar los datos de caudal para el mismo periodo.

Además, suponiendo que la CNE cuenta con capacidad de computación suficiente, se recomienda realizar modelos para cada uno de los 34 proyecciones entregados en la base de datos, considerando cada proyección como equiprobable, tomando así ventaja de los múltiples escenarios disponibles para cuantificar la incertidumbre asociada a las proyecciones. Eventualmente, dado que las series se encuentran planteadas sobre una base física, es posible incluso utilizarlas para plantear análisis estocásticos condicionales del tipo *“dado que este año fue normal, el anterior seco, y el anterior también, ¿cuáles son las condiciones más probables que ocurran dentro de este próximo año?”* El hacer este tipo de restricciones podría aportar información adicional en el corto plazo.

Dado que la metodología propuesta por el presente estudio consiste en la utilización de una base de datos válido hasta el año 2050, y dado que el horizonte que se considera en los procesos de la CNE es típicamente del orden de 20 años (hasta 2040), en principio la información debe permanecer relevante para al menos los próximos 10 años. En este sentido, no existe ninguna necesidad de actualizar las proyecciones de caudal anualmente como se hace en la actualidad con la estadística histórica. Esto es porque la metodología no utiliza la estadística histórica directamente, sino la estadística es utilizada solo para la calibración del modelo hidrológico. Dado que la adición de año más de información no debería cambiar significativamente la distribución de caudal, tampoco debería tener un impacto muy significativo en la calibración del modelo. Se considera que la recalibración de los modelos podría realizarse con una periodicidad de 3-5 años, aproximadamente.

Con respecto a la periodicidad que debiesen actualizarse esta base de datos, se sugiere que esta sea actualizada solo en el caso de que salgan a la luz nuevos antecedentes relevantes con respecto a los insumos de proyecciones climáticas. Actualmente, se encuentra en desarrollo el denominado CMIP6, que es la fase siguiente y actualizada de los GCM utilizados en este estudio, el cual además con contará con más de 100 modelos y que se espera esté disponible en 2021. Otras circunstancias que podrían gatillar que se requiera una actualización parcial corresponde a:

- Cuando se agrega un nuevo punto de control (es decir, central Hidroeléctrica) al sistema interconectado. Dado que la tendencia actual es hacia un menor desarrollo de centrales Hidroeléctricas, es probable que la
- Cuando se realiza actualización de estadística de algún punto de control que cambia significativamente su distribución de caudales.

En el presente estudio se ha generado una metodología piloto la cual entrego información de proyecciones para sólo 13 de los puntos de control contenidos en la estadística. Si bien este conjunto de cuencas ya contiene casi toda la capacidad de embalsamiento del sistema interconectado. Durante la etapa final del proyecto, esta metodología fue extendida, en la medida de lo posible al total de 181 puntos utilizados por la CNE en sus ejercicios de modelación.

El detalle de los puntos adicionales no considerados en el establecimiento de la metodología se describe en el capítulo 6 de este informe. También se describe una metodología para los puntos de control que no están considerados dentro de los procesos de modelación hidrológica por diversas razones. Como resultado de esto, se entrega una base de datos coherente y completa para los 181 puntos acordados con CNE.

Cabe señalar que la realización de la modelación hidrológica para generar la base de datos que acompañe el presente informe corresponde a una tarea compleja que debe realizarse por empresas o institutos con conocimientos especialistas en meteorología e hidrología. La descripción de la metodología presentada en el capítulo 3 usada para generar la base de datos entrega lineamientos suficientemente detallados para permitir que otra empresa especialista pueda desarrollar una implementación propia de la metodología y, en principio, obtener resultados similares.

## 8 Referencias

[1] C. M. Moy, «Isotopic evidence for hydrologic change related to the westerlies in SW Patagonia, Chile, during the last millennium,» *Quaternary Science Reviews*, vol. 27, pp. 1335-1349, 2008.

[2] M. Souvignet, R. Oyarzún, K. M. J. Verbist, H. Gaese y J. Heinrich, «Hydro-meteorological trends in semi-arid north-central Chile (29–32 S): Water resources implications for a fragile Andean region,» *Hydrological Sciences Journal*, vol. 57, nº 3, pp. 479-495, 2012.

- [3] J. P. Boisier, C. Alvarez-Garretón, A. Damiani, F. Lambert, C. Ramallo y M. Rojas, «Anthropogenic drying in central-southern Chile evidence by long-term observations and climate model simulations,» Elem. Sci. Antropocene. 2018.
- [4] Coordinador, “Informe mensual octubre de 2019”, Coordinador Eléctrico Nacional, Santiago de Chile, Tech. Rep., 2019/10.
- [5] R. B. Grayson, R. M. Argent, R. J. Nathan, T. A. McMahon y R. G. Mein, «Hydrological reciper, estimation techniques in australian Hidrology,» Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, 1996.
- [6] X. Liang, D. P. Lettenmaier, E. F. Wood y S. J. Burges, «A simple hydrological based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models,» Journal of Geophysical Research, vol. 99, p. 14415, 1994.
- [7] J. G. Arnold, D. N. Moriasi, P. W. Gassman, K. C. Abasspour, M. J. White, R. Srinivasan y N. Kannan, «SWAT: Model use, calibration, and validation,» Transactions of the ASABE, vol. 44, nº 4, pp. 1491-1508, 2012.
- [8] M. S. Wigmosta, L. W. Vail y D. P. Lettenmaier, «A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain,» Water resources research, vol. 30, nº 6, pp. 1665-1679, 1994.
- [9] F. Vidal y L. Ayala Riquelme, «Manual de cálculo de crecidas y cadudales mínimos en cuencas sin infomración fluviométrica,» Ministerio de Obras Públicas - Dirección General de Aguas (DGA), Santiago de Chile, 1995.
- [10] S. Bergström, «The HBV Model,» Singh V. P. (Ed.) Computer Models of Watershed Hydrology, pp. 443-476, 1995.
- [11] D. Yates, J. Sieber, D. Purkey y A. Huber-Lee, «WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics,» Water International, vol. 30, nº 4, pp. 487-500, 2005.
- [12] R. J. C. Burnash, R. L. Ferral y R. A. McGuire, «A generalized streamflow simulation system: conceptual modeling for digital computers,» Joint Federal and State River Forecast Center, US National Weather Service and California Department of Water Resources, Sacramento, CA, 1973.
- [13] Niu GY, Yang ZL, Mitchell KE, Chen F, Ek MB, Barlage M, Kumar A, Manning K, Niyogi D, Rosero E, Tewari M. The community Noah land surface model with multiparameterization

options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2011 Jun 27;116(D12).

[14] NASA. [En línea]. Available: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>.

[15] DGA, «Informe final actualización balance hídrico,» Santiago de Chile, 2017.

[16] NASA, «MODIS products,» [En línea]. Available: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod12.php>.

[17] T. Houska, P. Kraft, A. Chamorro-Chavez y L. Breuer, «SPOTing model parameters using a ready-made python package,» PloS one, vol. 10, nº 12, 2015.

[18] M. D. McKay, W. J. Conover y R. J. Beckman, «A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code,» Technometrics, vol. 21, pp. 239-245, 1979.

[19] M. Neilsen, D. Temple y J. Wibowo, «A distributed hydrologic simulation environment with latin hypercube sampling,» de Workshop Proceedings, 2004.

[20] W. Niccoli, F. Marinelli, T. Fairbanks y R. Dancause, 1998.

[21] K. K. Yilmaz, H. V. Gupta y T. Wagener, «A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model,» Water Resources Research, vol. 44, nº 9, 2008.

[21b] M. Shafii y B. A. Tolson, «Optimizing hydrological consistency by incorporating hydrological signatures into model calibration objectives,» Water Resources Research, vol. 51, nº 5, pp. 3796-3814, 2015.

[22] R. D. Garreaud, C. Alvarez-Garretón, J. Barichivich y M. Zambrano-Bigiarini, «The 2010-2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation,» Hydrological Earth System Sciences, vol. 21, pp. 6307-6327, 2017.

[23] J. P. Boisier, R. Rondanelli, R. D. Garreaud y F. Muñoz, «Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile,» Geophysical Research Letters, vol. 43, nº 1, pp. 413-421, 2016.

[24] A. J. Cannon, S. R. Sobie y T. Q. Murdock, «Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes?,» Journal of Climate, vol. 28, nº 17, pp. 6938-6959, 2015.

- [25] M. B. Switanek, P. A. Troch, C. L. Castro, A. Leuprecht, H.-I. Chang, R. Mukherjee y E. Demaria, «Scaled distribution mapping: a bias correction method that preserves raw climate model projected changes,» 2017.
- [26] M. Falvey y R. D. Garreaud, «Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006),» *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 114, nº D, 2009.
- [27] Poli, Paul, Hans Hersbach, Dick P. Dee, Paul Berrisford, Adrian J. Simmons, Frédéric Vitart, Patrick Laloyaux et al. "ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century." *Journal of Climate* 29, no. 11 (2016): 4083-4097.
- [28] P. Laloyaux, E. de Boisseson, M. Balmaceda, J. R. Bidlot, S. Broennimann, R. Buizza y Y. Kosaka, «CERA 20C: A coupled reanalysis of the Twentieth Century,» *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 10, nº 5, pp. 1172-1195, 2018.
- [29] G. P. Compo, J. S. Whitaker, P. D. Sardeshmukh, N. Matsui, R. J. Allan, X. Jin y S. Brönniman, «The twentieth century reanalysis project,» *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 137, nº 654, pp. 1-28, 2011.
- [30] N. J. Mantua y S. R. Hare, «The Pacific decadal oscillation,» *Journal of oceanography*, vol. 58, nº 1, pp. 35-44, 2002.
- [31] G. A. Meehl, L. Goddard, G. Boer, R. Burgman, G. Branstator, C. Cassou, S. Corti, G. Danabasoglu, F. Doblas-Reyes, E. Hawkins y others, «Decadal climate prediction: an update from the trenches,» *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 95, nº 2, pp. 243-267, 2014.
- [32] A. Bellucci, R. Haarsma, N. Bellouin, B. Booth, C. Cagnazzo, B. Van Den Hurk, N. Keenlyside, T. Koenigk, F. Massonnet, S. Materia y M. Weiss, *Advancements in decadal climate predictability: The role of nonoceanic drivers*, vol. 53, Blackwell Publishing Ltd, 2015, pp. 165-202.

## 9 Anexos

### Resultados del proceso de calibración

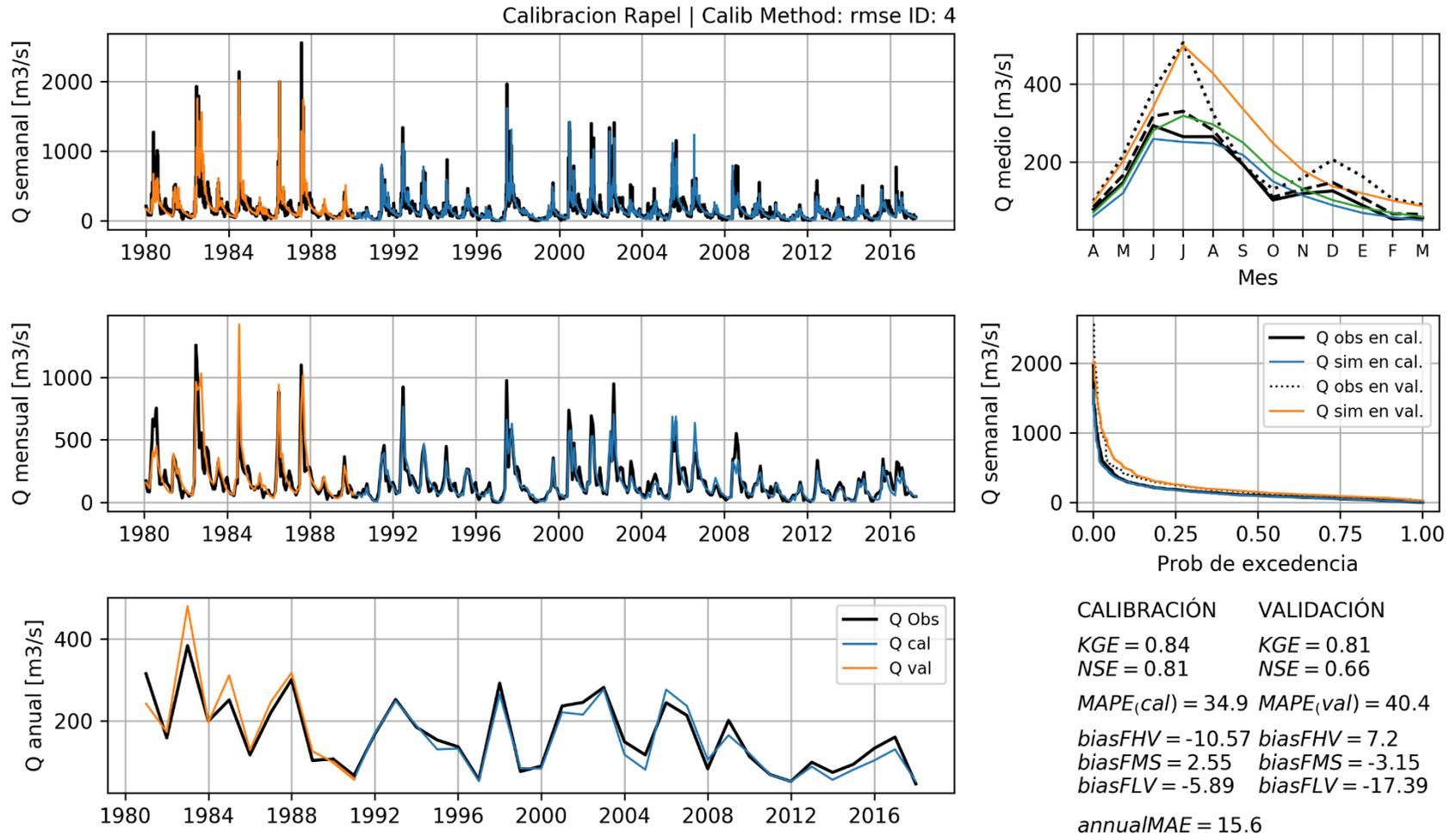


Figura 8.1. Resultados del proceso de calibración desarrollados para la cuenca definida por el punto de control Rapel.  
Fuente: elaboración propia.

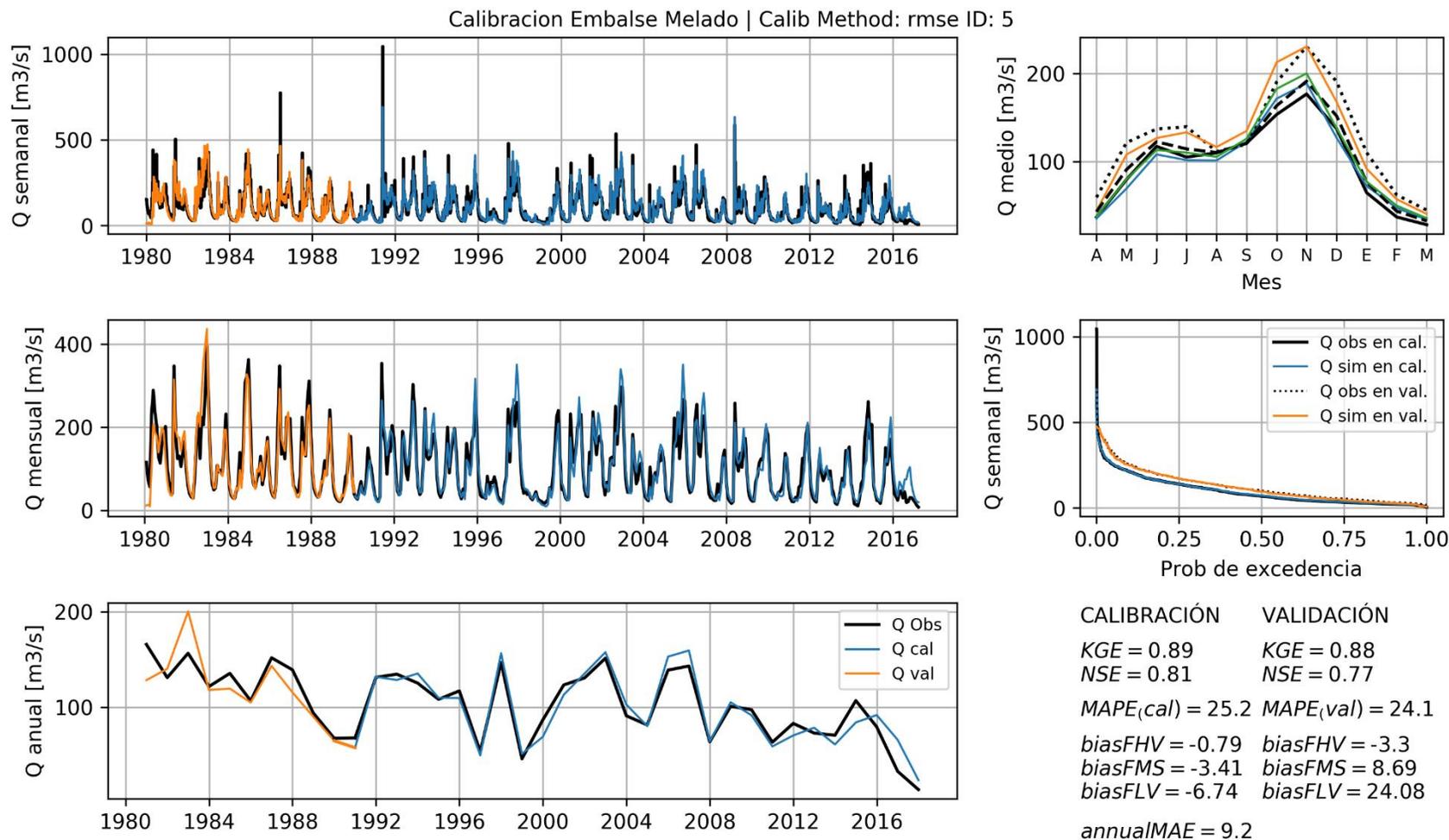


Figura 8.2. Resultados del proceso de calibración desarrollados para la cuenca definida por el punto de control embalse Melado. Fuente: elaboración propia.

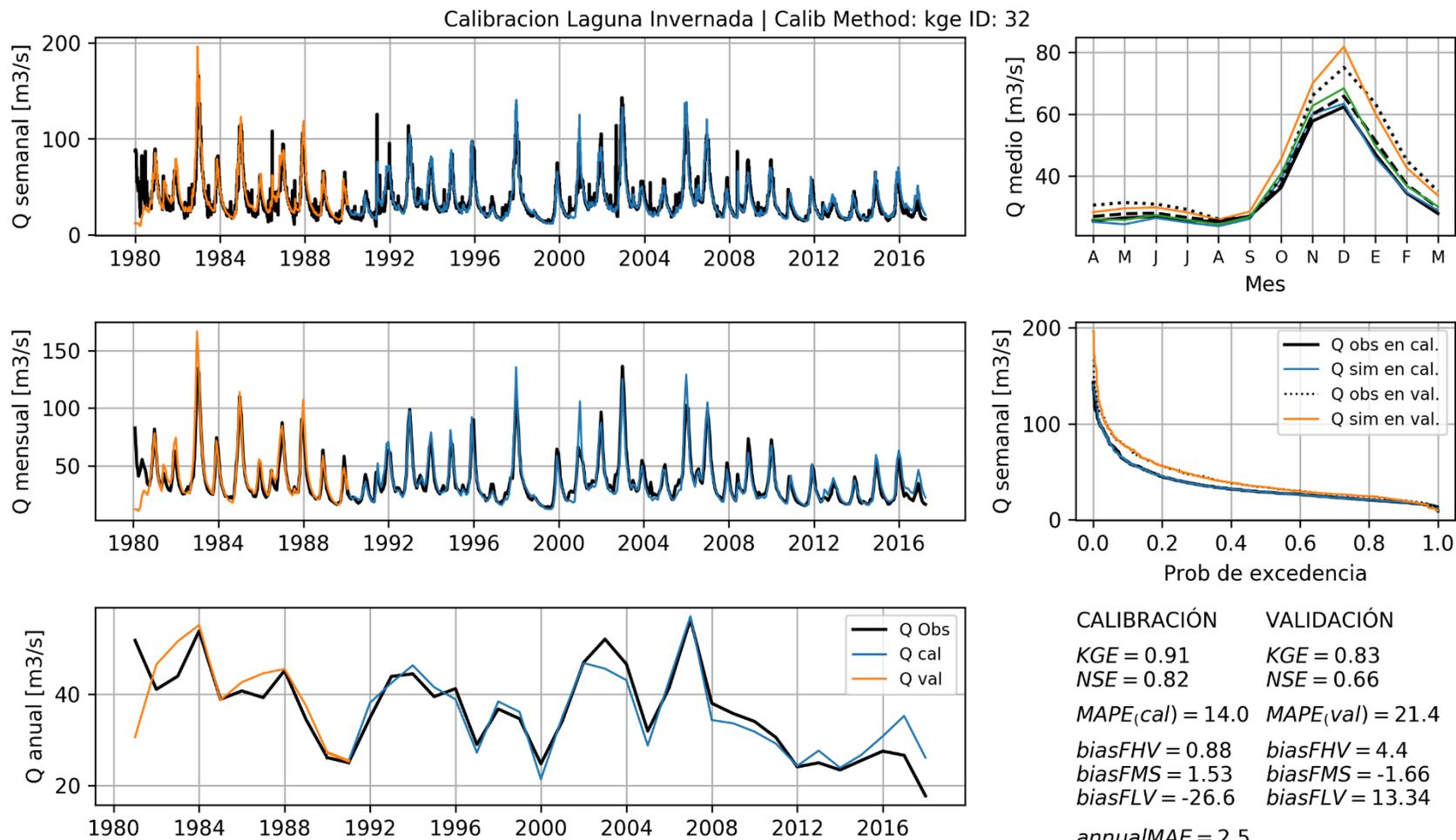


Figura 8.3. Resultados del proceso de calibración desarrollados para la cuenca definida por el punto de control Laguna Invernada. Fuente: elaboración propia.

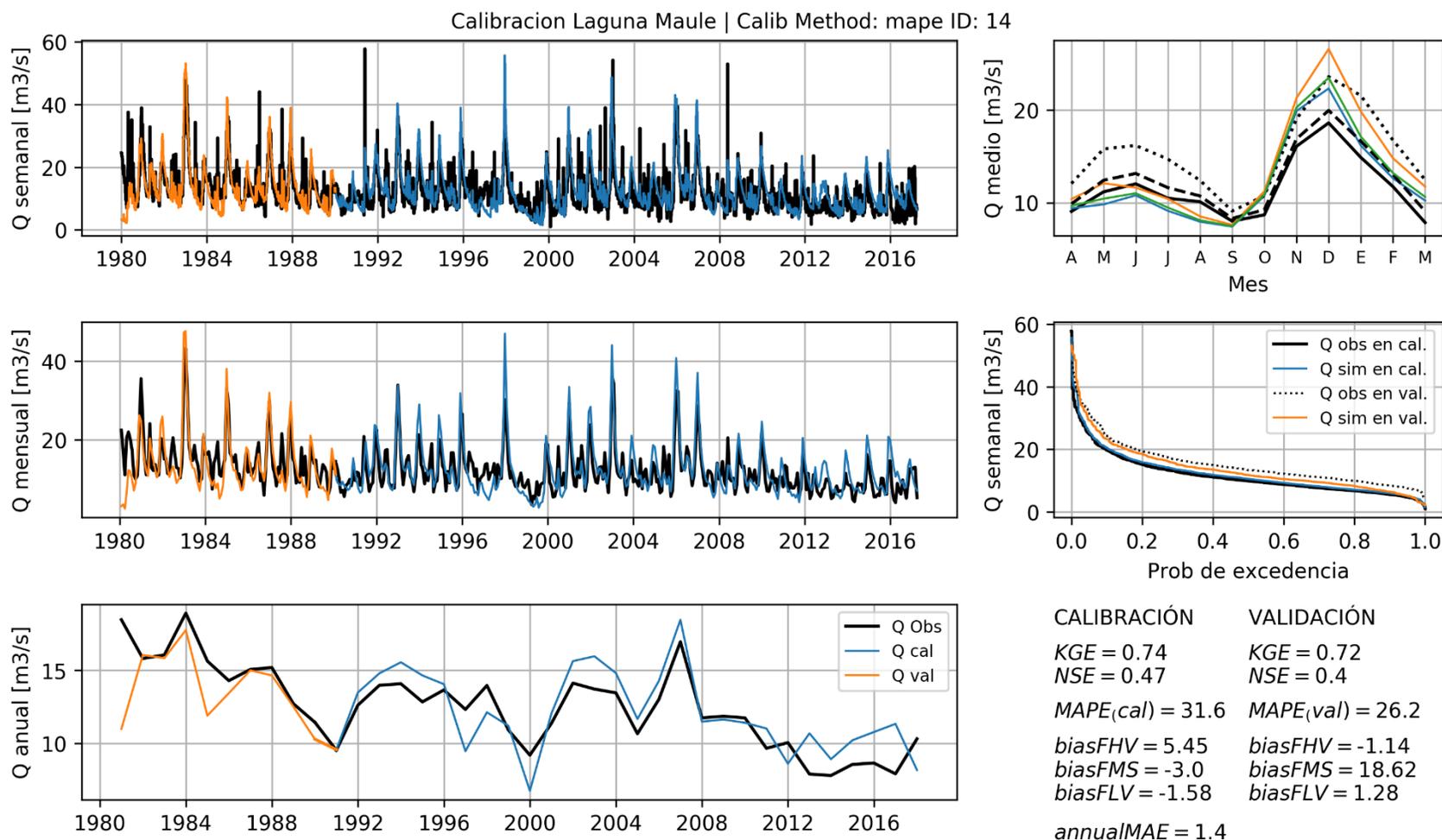


Figura 8.4. Resultados del proceso de calibración desarrollados para la cuenca definida por el punto de control Laguna Maule. Fuente: elaboración propia.

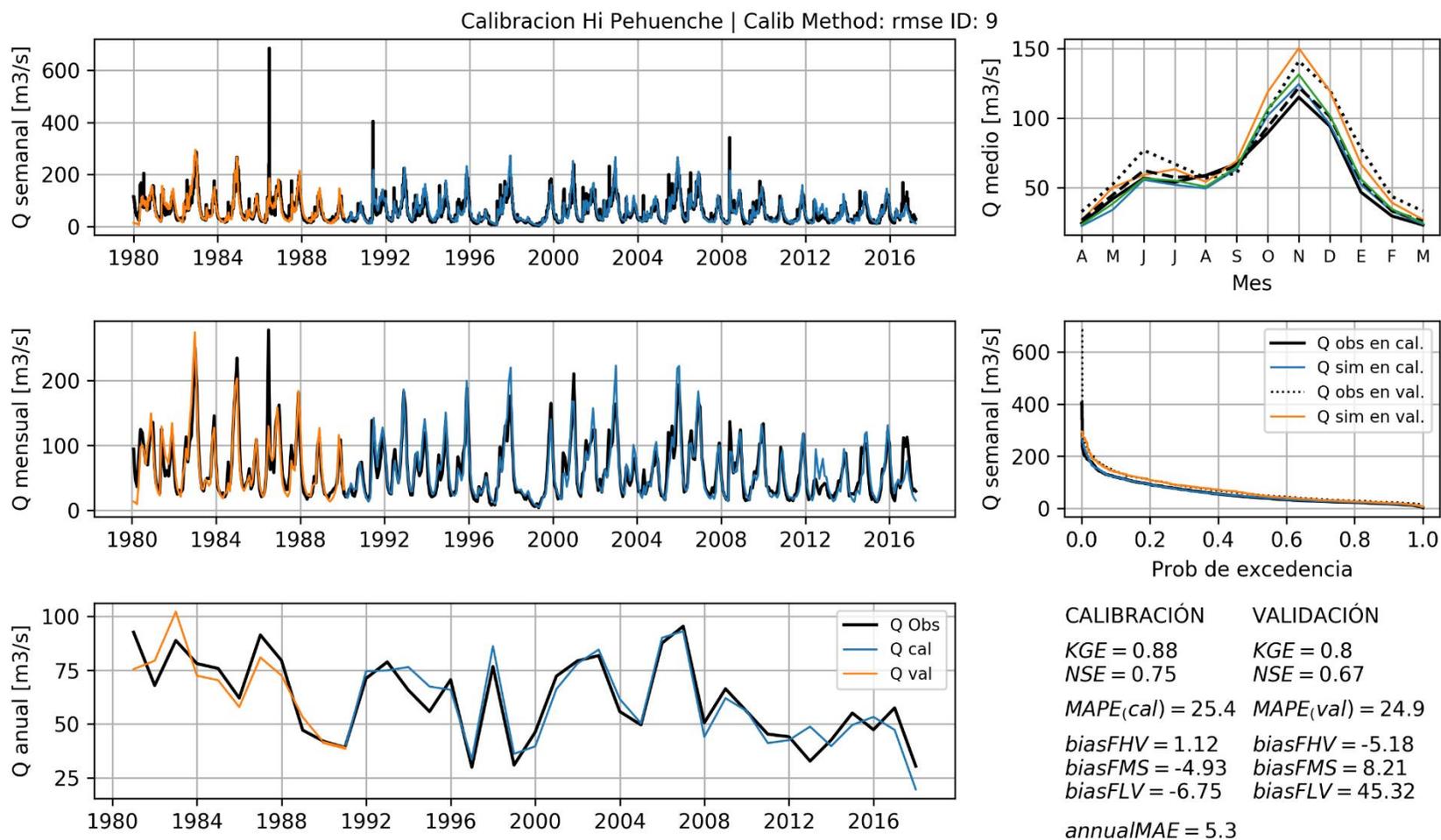


Figura 8.5. Resultados del proceso de calibración desarrollados para la cuenca definida por el punto de control Hoya Intermedia Pehuenche. Fuente: elaboración propia.

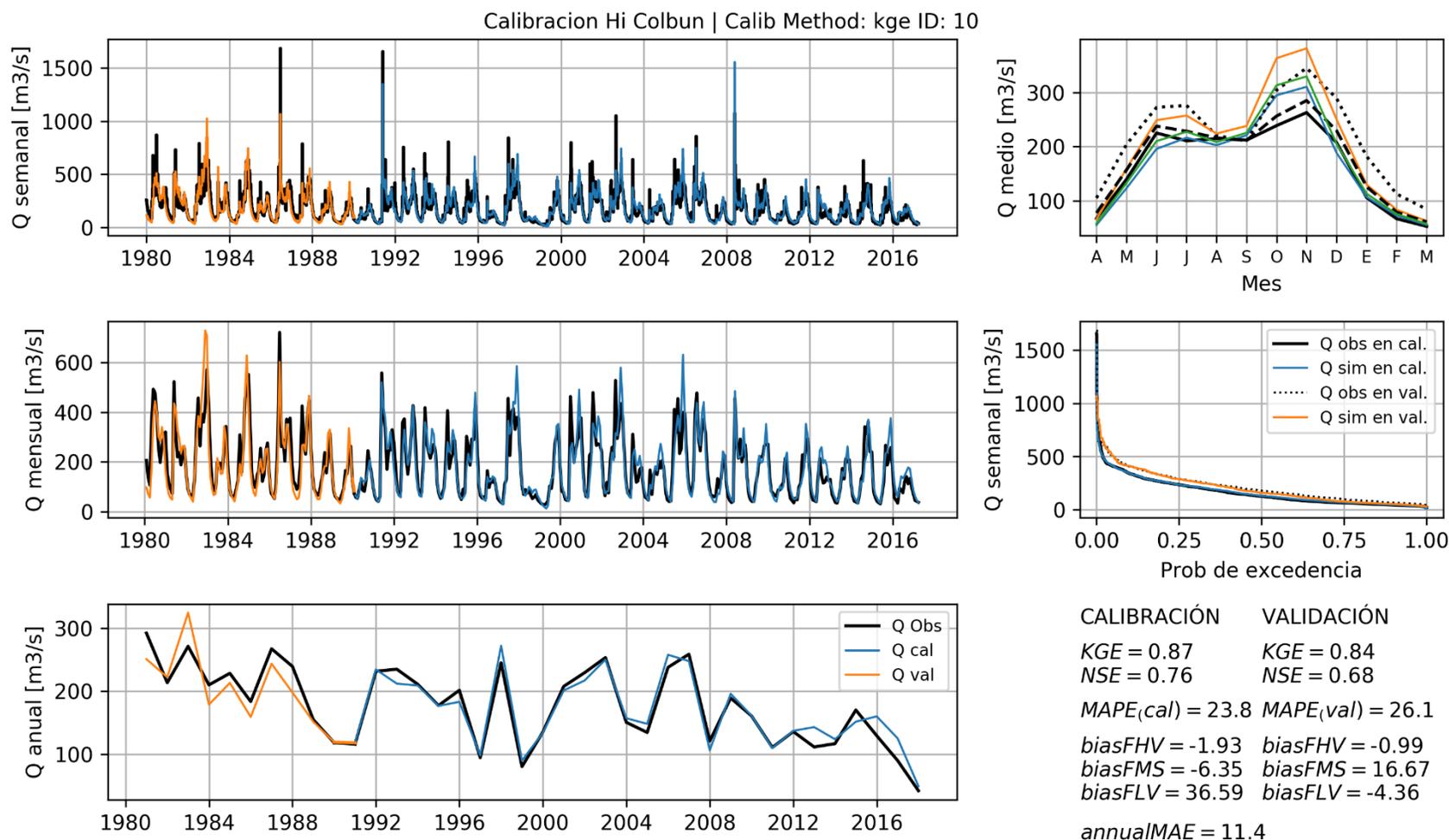


Figura 8.6. Resultados del proceso de calibración desarrollados para la cuenca definida por el punto de control Hoya intermedia Colbún. Fuente: elaboración propia.

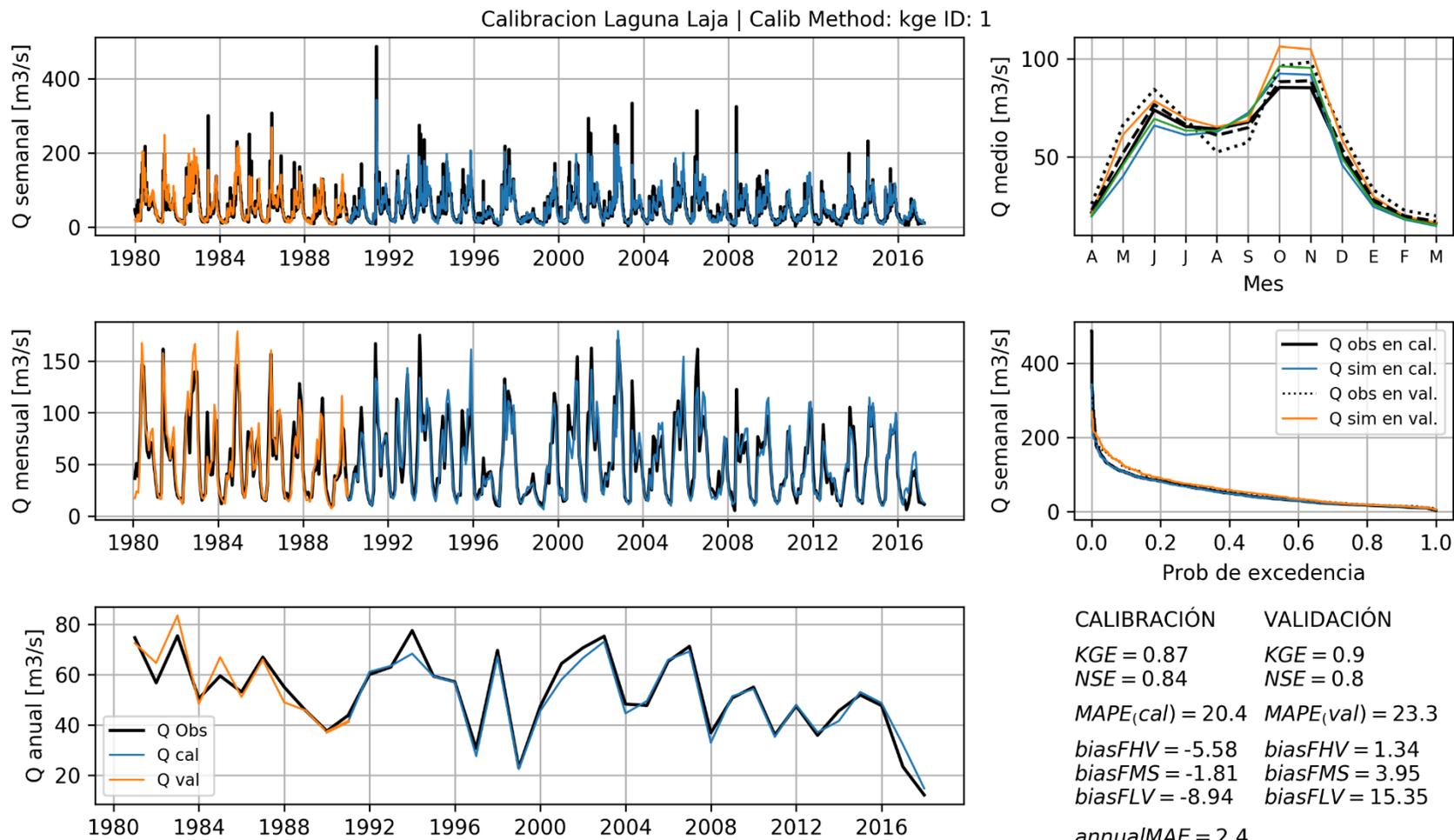
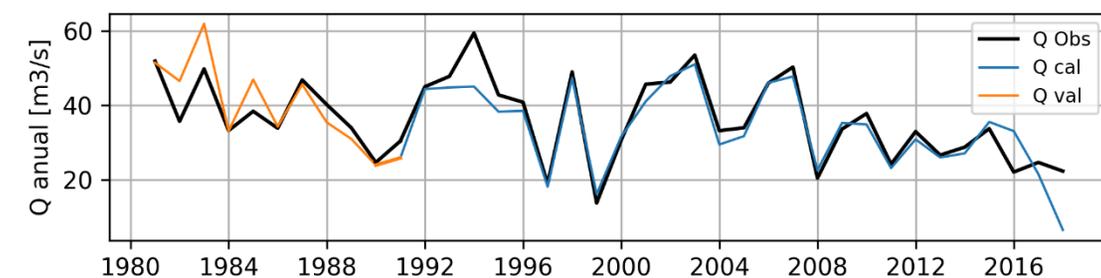
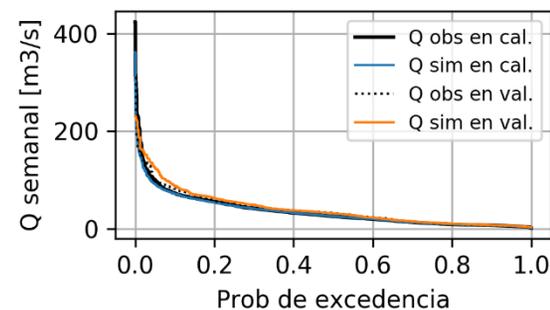
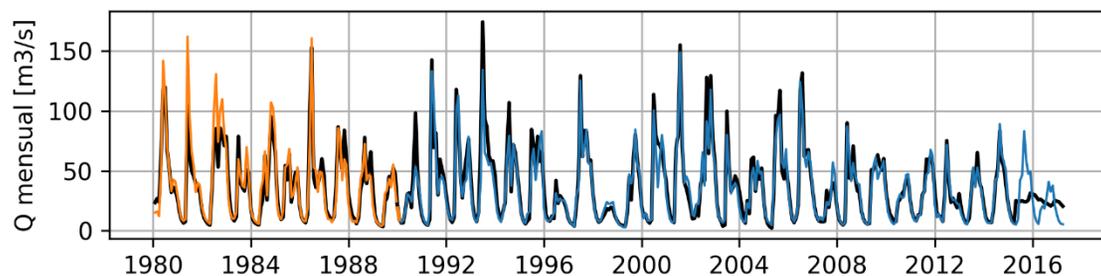
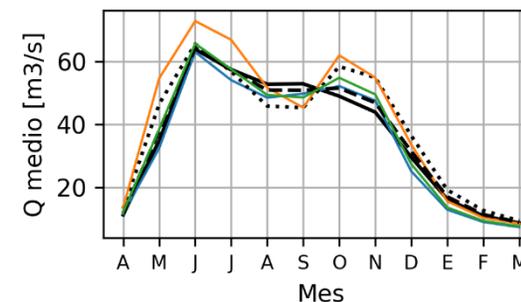
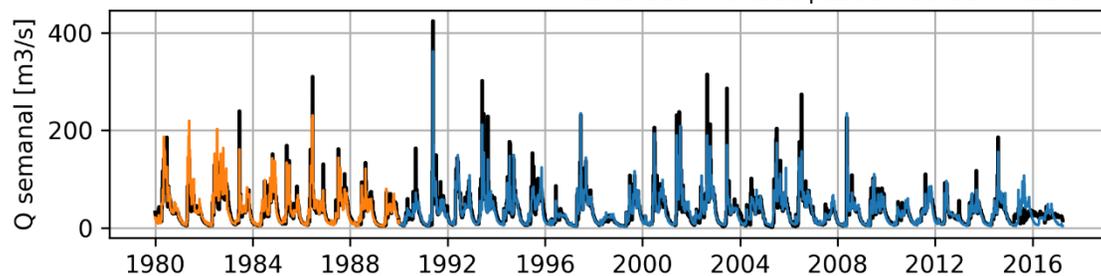


Figura 8.7. Resultados del proceso de calibración desarrollados para la cuenca definida por el punto de control Laguna Laja. Fuente: elaboración propia.

Calibración Antuco | Calib Method: rmse ID: 1



CALIBRACIÓN	VALIDACIÓN
$KGE = 0.83$	$KGE = 0.86$
$NSE = 0.83$	$NSE = 0.78$
$MAPE_{(cal)} = 26.3$	$MAPE_{(val)} = 26.1$
$bias_{FHV} = -10.71$	$bias_{FHV} = 11.61$
$bias_{FMS} = 0.37$	$bias_{FMS} = 6.2$
$bias_{FLV} = -6.6$	$bias_{FLV} = 18.06$
$annualMAE = 3.4$	

Figura 8.8. Resultados del proceso de calibración desarrollados para la cuenca definida por el punto de control Antuco. Fuente: elaboración propia.

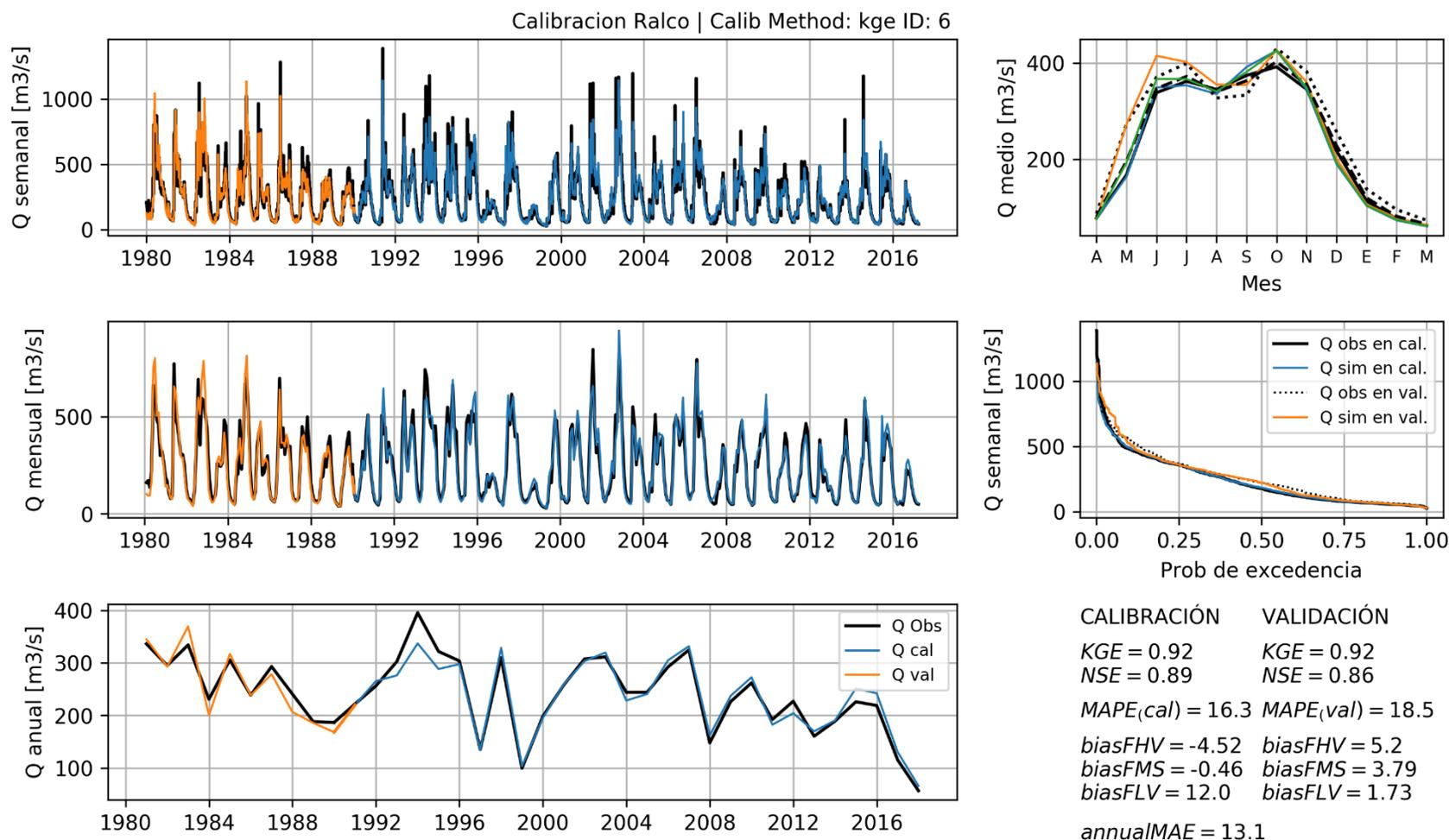


Figura 8.9. Resultados del proceso de calibración desarrollados para la cuenca definida por el punto de control Ralco.  
Fuente: elaboración propia.

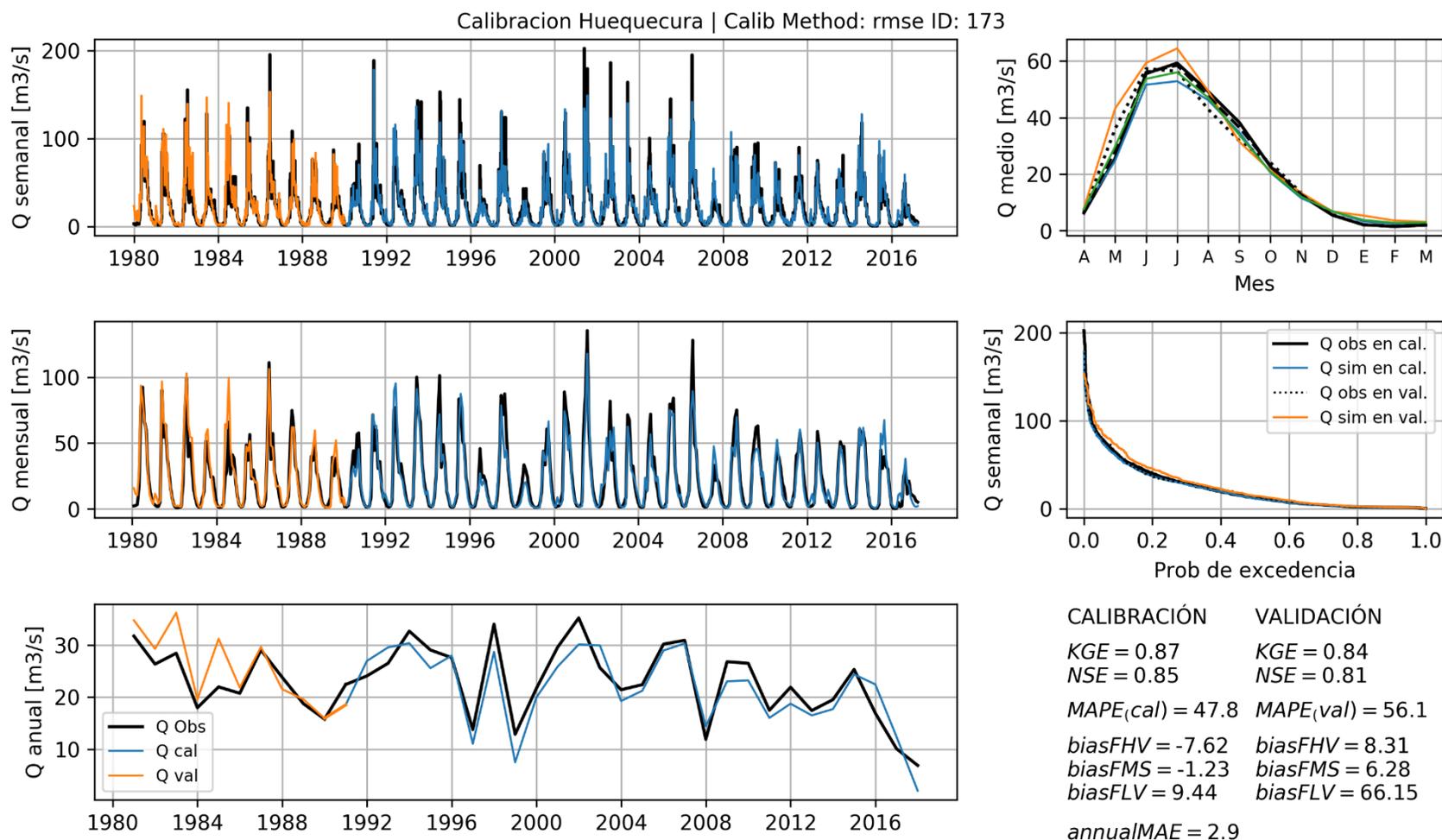


Figura 8.10. Resultados del proceso de calibración desarrollados para la cuenca definida por el punto de control Huequecura. Fuente: elaboración propia.

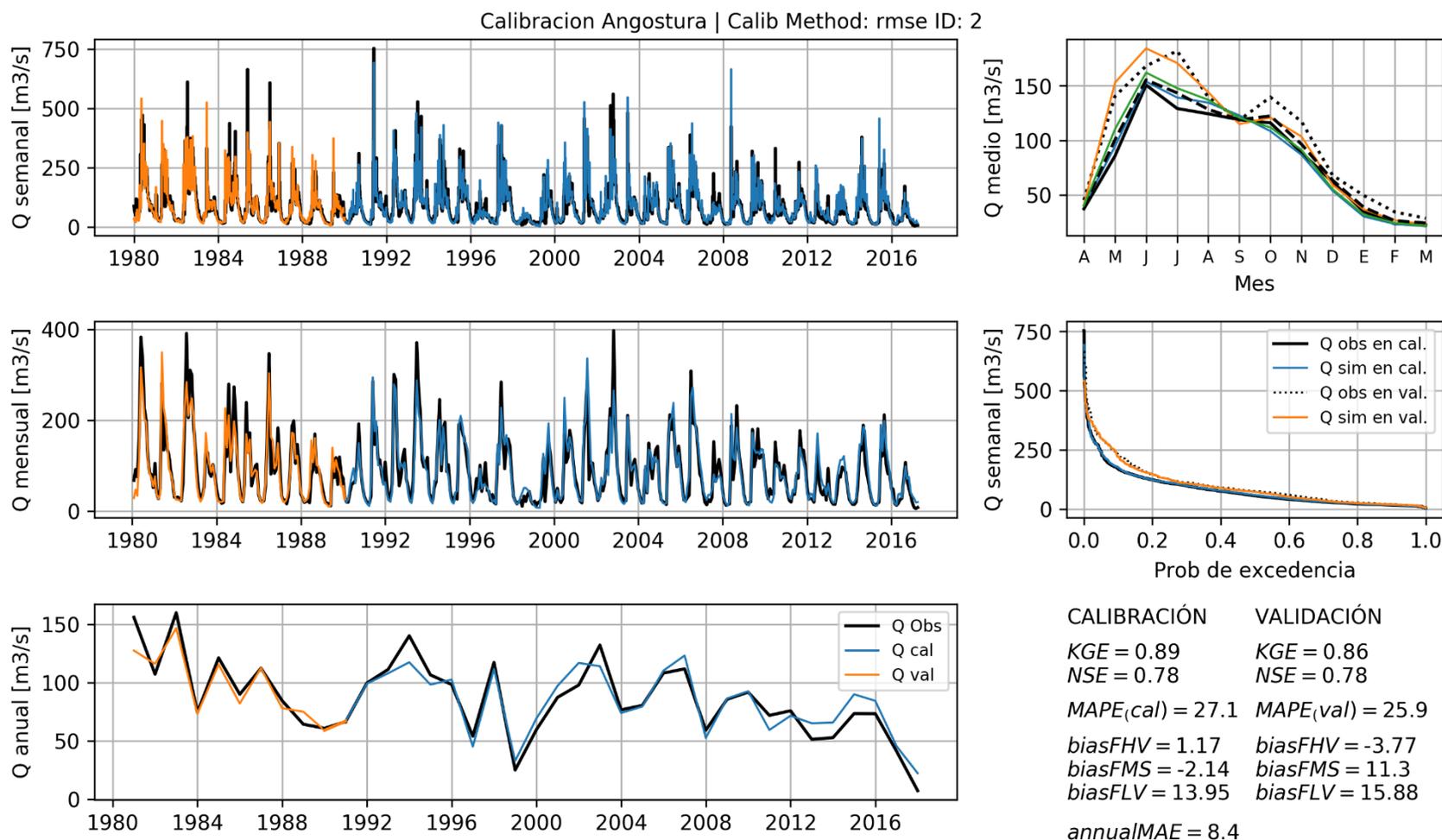


Figura 8.11. Resultados del proceso de calibración desarrollados para la cuenca definida por el punto de control Angostura. Fuente: elaboración propia.

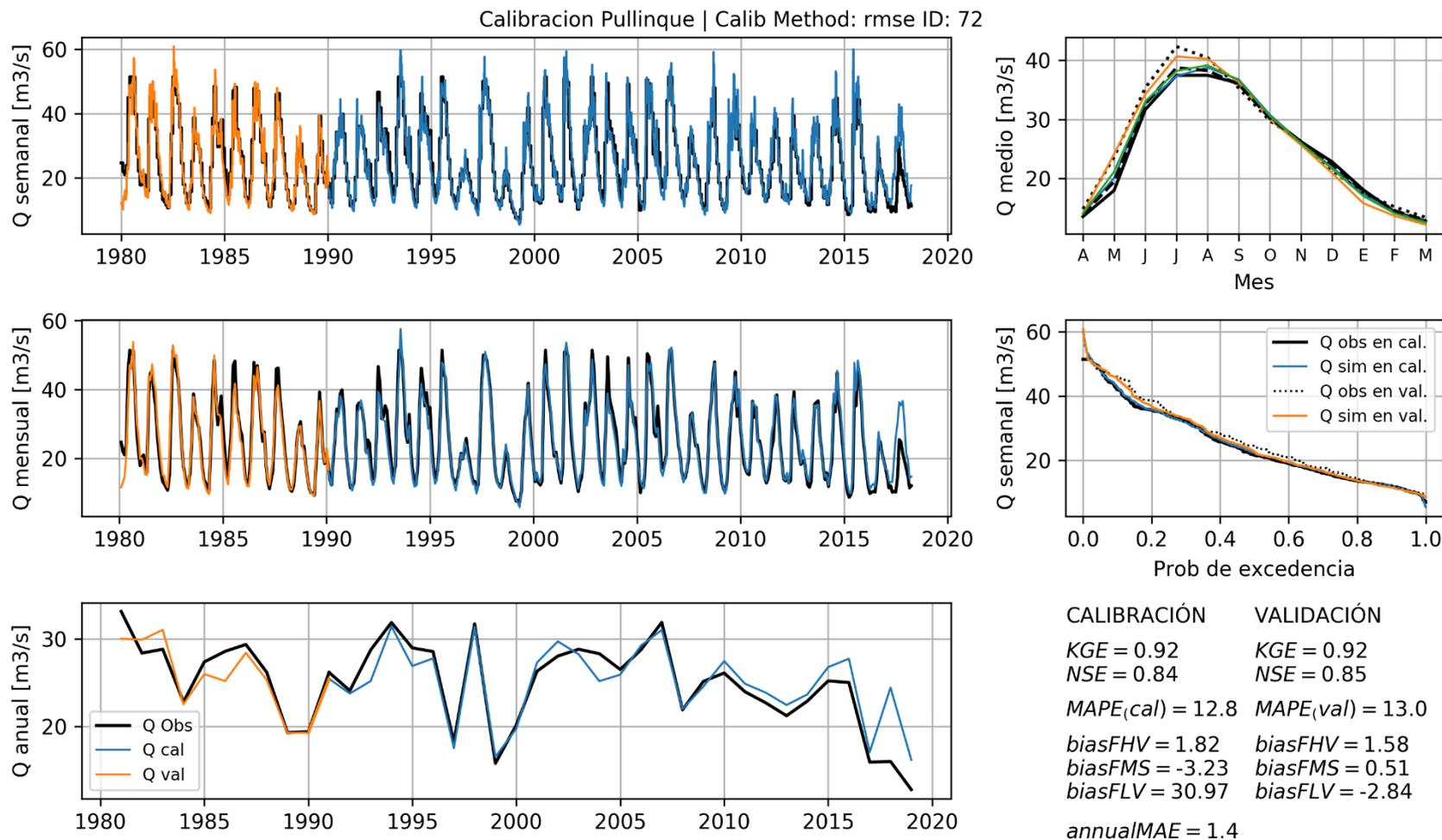


Figura 8.12. Resultados del proceso de calibración desarrollados para la cuenca definida por el punto de control Pullinque. Fuente: elaboración propia.

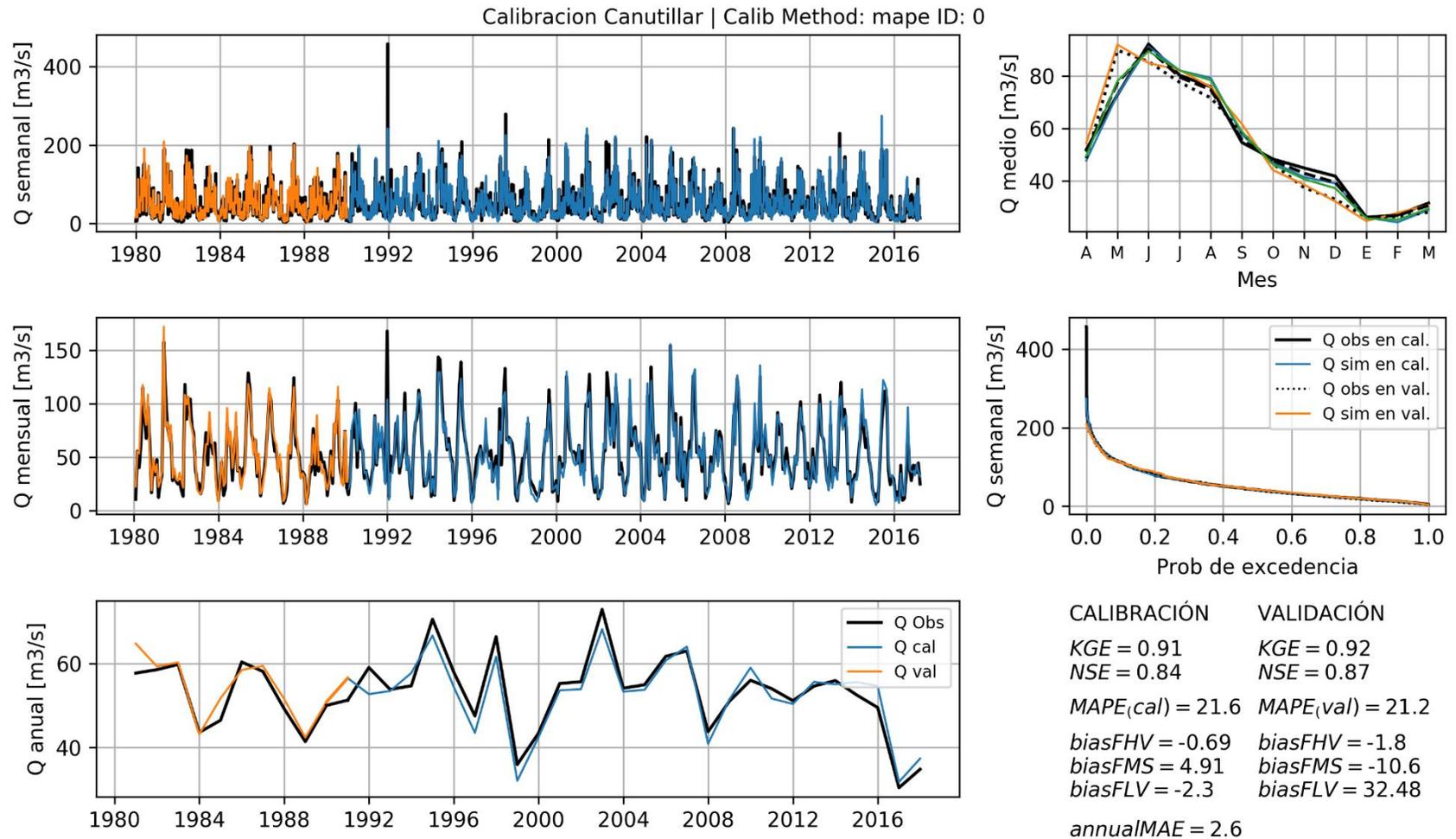


Figura 8.13. Resultados del proceso de calibración desarrollados para la cuenca definida por el punto de control Canutillar. Fuente: elaboración propia.

