



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

CARACTERIZACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ASOCIADA A PROYECCIONES CLIMÁTICAS EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE RIO CACHAPOAL ALTO, CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

MARÍA ALEJANDRA ISAMIT FAURE

PROFESOR GUÍA:
MIGUEL LAGOS ZUÑIGA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PABLO MENDOZA ZUÑIGA
RAFAEL RUIZ GARCÍA

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniera Civil
POR: María Alejandra Isamit Faure
Fecha: 2022
PROFESOR GUÍA: Miguel Lagos

CARACTERIZACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ASOCIADA A PROYECCIONES CLIMATICAS EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE RIO CACHAPOAL ALTO, CHILE

En el contexto actual de cambio climático, existe un gran interés desde distintos sectores por conocer los impactos socioeconómicos y ambientales que este tendrá a nivel local el caso de los recursos hídricos, en esa línea, un impacto a considerar es cómo los cambios en las variables meteorológicas afectarán el ciclo hidrológico, y por lo tanto, la disponibilidad de este vital recurso.

En esta memoria se evaluaron los impactos que tienen sobre la incertidumbre los pasos seguidos en la generación proyecciones del cambio climático en los recursos hídrico para la cuenca del Río Cachapoal Alto ubicada en la Región de O'Higgins, Chile. En particular, se trabaja con el escenario SSP5-8.5, tres modelos de circulación general (GCM, por sus siglas en inglés), dos métodos de escalamiento (Asynchronous Regression y Quantile Delta Mapping) y el modelo hidrológico VIC; los caudales resultantes se comparan con los obtenidos en la evaluación de cambio climático de la Actualización del Balance Hídrico de Chile, en el que se utilizó el escenario RCP8.5, cuatro GCMs, un método de escalamiento y el modelo VIC, obteniendo 10 proyecciones distintas.

Los cambios proyectados por los GCMs en la zona de estudio indican un aumento de la temperatura entre 0-2°C y una disminución de la precipitación de entre 6-36% para el periodo 2030-2059. Las proyecciones del escenario SSP indican una disminución de los caudales medios mensuales entre 1-36% y una disminución entre 11-21% para el escenario RCP. Al analizar caudales de distintas probabilidades de excedencia se encuentra que estas proyecciones entregan resultados poco concluyentes en cuanto a los extremos (P_{exc} menor a 25% o mayor a 75%). Además de la reducción de caudales, se detecta un cambio en la temporalidad de los caudales máximos estacionales, adelantándose hasta un mes para ambos escenarios, sin embargo, este cambio es más severo en cuanto a temporalidad y magnitud para los modelos del escenario RCP. Por otra parte, se encontraron mayores diferencias entre escenarios climáticos que entre modelos de un mismo escenario y no se encontraron diferencias significativas entre los dos métodos de escalamiento utilizados. Para analizar la incertidumbre asociada al tamaño del conjunto de simulaciones, se consideró la variación en la desviación estándar de los índices hidrológicos de conjuntos de 3 a 10 simulaciones, obteniendo que con al menos 6 es posible obtener valores similares a utilizar las 10 simulaciones.

Dado que las proyecciones climáticas son utilizadas para tomar decisiones respecto de, por ejemplo, diseño de infraestructura hídrica, es importante contar con una evaluación de la incertidumbre, para tener conocimiento de qué tan amplio es el rango de posibles valores de la variable en estudio. Considerando que en este trabajo se realizaron variaciones únicamente en las forzantes, se recomienda para futuras investigaciones, analizar la influencia otras fuentes de incertidumbre relevantes que fueron excluidas del diseño experimental, como la elección de la estructura del modelo, los parámetros o la variabilidad natural. Dentro de la elección de la estructura del modelo se propone incluir una metodología para evaluar el aporte glaciar. Además, es posible extender el análisis de los resultados a nivel espacial, lo que puede ser útil dependiendo de la cuenca estudiada y la finalidad de dicho análisis.

A todas las mujeres que rompieron barreras y abrieron caminos.
A todes quienes se cuestionan el mundo constantemente y luchan por construir un lugar mejor.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi familia. A mi mamá María Eugenia Faure Álvarez y a mi papá Juan Manuel Isamit Contreras por su cariño y su apoyo y porque gracias a su esfuerzo pude preocuparme todos estos años únicamente de estudiar, algo que lamentablemente es un privilegio en este país y probablemente en gran parte del mundo. A mis hermanos Juan Pablo y Viviana, gracias por existir, por estar junto a mí y aguantar mis locuras.

Agradezco a mis sumlitas: Coni, Paula, Caro y Dani, por todos estos años de amistad, de transformación y de crecimiento.

A mis divinas: Vale, Coni, Isi, Mala, Jojo y Cas, por todo el aprendizaje colectivo, amorcito y ternura.

A Val, Pao, Maxi y Coke por todas las aventuras vividas y por vivir.

A Cote Chacón, porque sin nuestro apañe mutuo no habiéramos sobrevivido ni a la pandemia ni a la memoria y mucho menos a las dos cosas al mismo tiempo.

Al grupito lindo de beauchefianas que fue creciendo con el paso de los años, las tkm.

A mis amigos de one love con los que disfrutamos mucho los últimos años de u (y nos pasamos un poco también).

A mis compañeros y amigos de hidráulica y de civil, y todos quienes conocí en estos años.

Finalmente a la danza, por sostenerme en los peores momentos y ser mi vía de escape y mi vía de encuentro.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivo general.....	2
1.2.2	Objetivos específicos.....	2
1.3	Estructura del documento.....	2
2	Marco Teórico.....	3
2.1	Cambio climático.....	3
2.1.1	Definición y estado actual.....	3
2.1.2	Escenarios climáticos.....	4
2.2	Modelos de Circulación General y escalamiento estadístico.....	6
2.3	Producto meteorológico CR2MET.....	6
2.4	Modelación hidrológica.....	7
2.4.1	Modelo VIC.....	7
2.4.2	Evaluación y calibración de modelos hidrológicos.....	8
2.4.3	Índices hidrológicos.....	9
2.5	Cuantificación de incertidumbre.....	9
3	Caracterización de la Zona de Estudio.....	11
3.1	Ubicación.....	11
3.2	Clima.....	13
3.3	Hidrología.....	13
4	Metodología.....	14
4.1	Escenarios Climáticos.....	15
4.2	Modelos de Circulación General.....	15
4.2.1	Métodos de escalamiento.....	17
4.2.2	Distribución subdiaria.....	18
4.3	Evaluación del modelo hidrológico.....	18
4.4	Índices hidrológicos empleados en el análisis.....	19
4.5	Caracterización de la incertidumbre.....	21
5	Resultados.....	22
5.1	Procesamiento de Datos.....	22
5.1.1	Funcionamiento del modelo calibrado.....	22
5.1.2	Variables obtenidas del escalamiento.....	25

5.2	Resultados de las simulaciones.....	28
5.2.1	Análisis por escenarios climáticos.....	28
5.2.2	Análisis por método de escalamiento.....	36
5.2.3	Caracterización de Incertidumbre.....	43
6	Conclusiones.....	50
	BIBLIOGRAFÍA.....	53
	ANEXOS.....	56

Índice de Tablas

Tabla 3-1	Información sobre la cuenca.....	12
Tabla 3-2	Tipos de suelos presentes en la cuenca. (Fuente: CAMELS-CL, 2017).....	12
Tabla 4-1	Porcentaje de días de lluvia para los GCM evaluados y estaciones cercanas con registro de precipitaciones.....	17
Tabla 4-2	Información de los modelos utilizados para el escenario SSP.....	17
Tabla 5-1	Métricas de evaluación de la modelación obtenidas en la calibración del Balance Hídrico (DGA, 2018) y para el caso base del presente estudio.....	22
Tabla 5-2	Índices hidrológicos obtenido en el balance hídrico y para el caso base del presente estudio.....	23
Tabla 5-3	Diferencia entre el promedio del el periodo futuro (2030-2059) y periodo histórico (1985-2014) para los modelos SSP.....	26
Tabla 5-4	Diferencia entre caudales futuros e históricos según escenario y modelo GCM.....	30
Tabla 5-5	Diferencia entre el caudal medio mensual promedio del periodo futuro e histórico. ...	34
Tabla 5-6	Diferencia entre caudales futuros e históricos según modelo GCM y método de escalamiento.....	38
Tabla 5-7	Diferencia entre el caudal medio mensual según AR y QDM para el periodo histórico y futuro.....	39
Tabla 5-8	Diferencia entre el caudal medio mensual promedio del periodo futuro e histórico. ...	41

Índice de Figuras

Figura 2-1	Cambios en la temperatura de la superficie global en relación con 1850-1900. a) Cambio en la temperatura de la superficie global (promedio de 10 años) reconstruido (1-2000) y observado (1850-2020) y b) Cambio en la temperatura de la superficie global (promedio anual) observado y simulado utilizando factores humanos y naturales y solo naturales (ambos 1850-2020). Fuente: IPCC (2021).....	4
Figura 2-2	Las cinco narrativas de los escenarios SSP, representando distintos niveles de desafío en mitigación y adaptación. Fuente: Adaptado de O'Neill et al. (2017).....	5

Figura 2-3 Representación de una celda del modelo VIC. Fuente: adaptado de Liang et al. (1994).	8
Figura 2-4 Cascada de incertidumbre en la evaluación de impactos del cambio climático (Clark et al. 2016).	10
Figura 3-1 Mapa de la zona de estudio.	11
Figura 3-2 Curva hipsométrica de la cuenca.	12
Figura 3-3 Precipitación y temperatura promedio mensual (máxima, media y mínima) (1985-2014) obtenida del producto CR2met para la cuenca del Río Cachapoal Alto.	13
Figura 3-4 Curva de variación estacional para diferentes probabilidades de excedencia.	14
Figura 4-1 Esquema de los tres puntos de decisión utilizados para crear el conjunto de resultados.	15
Figura 4-2 Evaluación de la climatología de los modelos de circulación general utilizando interpolación espacial (inverso de la distancia) a la estación Rengo.	16
Figura 4-3 Dos curvas de duración distintas mostrando los atributos utilizados para calcular índices hidrológicos.	21
Figura 5-1 Comparación entre los caudales obtenidos en VIC para el Balance Hídrico y para este estudio. En el panel superior se muestra la serie diaria de caudales (en gris el periodo de calibración), en el panel del medio la curva de variación estacional y en el panel inferior la curva de duración.	24
Figura 5-2 CDF de la precipitación mensual obtenida del escalamiento para los GCM.	25
Figura 5-3 Curva de duración para la temperatura media obtenida del escalamiento.	26
Figura 5-4 Curva de variación estacional para los GCM sin escalar.	27
Figura 5-5 Curvas de variación estacional de los GCM escalados donde: a) es la temperatura en el periodo histórico, b) es la temperatura en el periodo futuro, c) es la precipitación en el periodo histórico y d) es la precipitación en el periodo futuro.	28
Figura 5-6 Curva de duración de caudales medios mensuales para los modelos de los escenarios RCP y SSP, escalados mediante QDM.	29
Figura 5-7 Curva de duración de caudales medios mensuales para el modelo MIROC5 (RCP8.5) y MIROC6 (SSP5-8.5).	31
Figura 5-8 Índices hidrológicos del periodo futuro en función del periodo histórico, para ambos escenarios.	32
Figura 5-9 Curva de variación estacional de caudales para los escenarios RCP y SSP.	33
Figura 5-10 Diferencia entre los caudales medios mensuales históricos y futuros. En la parte superior se muestra el escenario RCP y en la parte inferior el escenario SSP.	35
Figura 5-11 Coeficiente de estacionalidad para ambos escenarios en el periodo histórico y el periodo futuro.	36
Figura 5-12 Curva de duración de caudales medios mensuales para los GCM del escenario SSP con dos métodos de escalamiento cada uno.	37
Figura 5-13 Cambios proyectados en índices hidrológicos para los distintos métodos de escalamiento aplicados a tres GCMs y el mismo escenario (SSP5-8.5).	39
Figura 5-14 Curva de variación estacional de caudales para los GCM del escenario SSP con dos métodos de escalamiento.	40
Figura 5-15 Diferencia de caudales entre el periodo histórico y futuro para los modelos SSP según los métodos de escalamiento.	42
Figura 5-16 Coeficiente de estacionalidad para los GCM del escenario SSP con sus métodos de escalamiento.	43

Figura 5-17 Curva de variación estacional de los caudales proyectados según escenario climático. La línea continua indica el valor medio de los modelos de cada escenario, mientras que el área coloreada representa el intervalo de valores máximos y mínimos.	43
Figura 5-18 Curva de duración de los caudales medios mensuales proyectados según escenario climático. La línea continua indica el valor medio de los modelos de cada escenario, mientras que el área coloreada representa el intervalo de valores máximos y mínimos.....	44
Figura 5-19 Desviación estándar de los índices hidrológicos calculados para cada escenario climático por separado y agrupados.	45
Figura 5-20 Curva de variación estacional para los caudales proyectados según método de escalamiento. La línea continua indica el valor medio de los modelos de cada método, mientras que el área coloreada representa el intervalo de valores máximos y mínimos.....	45
Figura 5-21 Curva duración para los caudales medios mensuales proyectados según método de escalamiento. La línea continua indica el valor medio de los modelos de cada método, mientras que el área coloreada representa el intervalo de valores máximos y mínimos.....	46
Figura 5-22 Desviación estándar de los índices hidrológicos calculados para cada método de escalamiento por separado y agrupados.	46
Figura 5-23 Curva de variación estacional para los caudales proyectados según todos los modelos utilizados.....	47
Figura 5-24 Curva de duración para los caudales medios mensuales proyectados según todos los modelos utilizados.	48
Figura 5-25 Boxplot de los valores de desviación estándar de los índices hidrológicos calculados al considerar distinta cantidad de GCM.	49

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En el contexto actual de cambio climático, existe un gran interés desde distintos sectores por conocer los impactos socioeconómicos y ambientales a nivel local. En el caso de los recursos hídricos, un impacto a considerar es cómo los cambios afectarán el ciclo hidrológico y por lo tanto la disponibilidad de este vital recurso.

A nivel global, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), ha publicado desde su creación en 1988 seis informes de evaluación donde dan cuenta del estado del sistema climático global. En el año 2014 se publicó el quinto informe (AR5), en el que se utilizaron escenarios climáticos llamados *Representative Concentration Pathways* (RCP) (van Vuuren et al 2011) asociados principalmente a las afectaciones en la forzante radiativa, las que están directamente relacionadas a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). A mediados del 2021 se publicó la primera parte del sexto informe (AR6), en el que se utiliza una nueva generación de escenarios climáticos llamados *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP; Riahi et al 2017), que considera las emisiones de GEI y la interacción de las políticas de mitigación y adaptación al cambio climático que podrían adoptarse a nivel mundial.

A nivel local, diversos estudios han analizado los efectos que el cambio climático tendrá en Chile. Un ejemplo es el trabajo realizado por Bozkurt et al. (2018), quienes consideraron dos escenarios RCP: el más favorable (RCP2.6) y el más desfavorable (RCP8.5) en términos de emisiones, determinando que, en ambos escenarios, existirá una disminución de hasta un 30% en las precipitaciones y hasta un 40% en la escorrentía anual. En otro estudio realizado por Ragettli et al. (2016), se analizó el efecto en cuencas altas de Los Andes centrales, con régimen nival, concluyendo que existirá un cambio en la temporalidad de la escorrentía producto de una disminución de la precipitación sólida acompañada de un aumento en la temperatura, lo que implica que las alzas anuales de caudales producto del deshielo se producirán hasta un mes antes que en el periodo histórico. Un estudio de gran importancia a nivel nacional corresponde a la Actualización del Balance Hídrico (BH) (DGA, 2017) se realizaron proyecciones de caudales en el escenario RCP8.5 para todo el territorio continental de Chile, utilizando el modelo hidrológico VIC, en particular, en la segunda etapa del BH que abarcó la Macrozona Norte y Centro, se concluyó que “los resultados del proceso de modelación de las cuencas en régimen natural son satisfactorios de acuerdo al análisis crítico que se hace de múltiples criterios de eficiencia (..) Además, los valores asociados a los procesos de acumulación y derretimiento de nieve (equivalente en agua promedio y fracción de área cubierta por nieve) presentan un comportamiento modelado similar al observado mediante imágenes y productos satelitales.” (DGA, 2018).

En general los estudios antes mencionados, para estimar los cambios en el ciclo hidrológico que experimentará una cuenca, utilizan un enfoque llamado *top-down* (Wilby & Dessai, 2010), que consiste en realizar simulaciones hidrológicas utilizando como forzantes a las variables meteorológicas proyectadas por modelos de circulación global (GCM por sus siglas

en inglés) derivadas de los escenarios climáticos futuros y llevadas a escala local. Una de las mayores implicancias de esta metodología es que se genera una “cascada de incertidumbre” (Wilby & Dessai, 2010; Clark et al., 2016) debido a las distintas elecciones que deben realizarse desde el escenario climático hasta el modelo hidrológico y sus parámetros, por lo que es de especial importancia considerar esta incertidumbre en la toma de decisiones en base a los resultados de estudios que se realicen mediante esta metodología.

En base a los antecedentes expuestos, en este estudio se realiza un análisis de la incertidumbre asociada al conjunto de caudales proyectados obtenidos para la cuenca Río Cachapoal 5 km aguas abajo de la junta con el Río Cortaderal. En particular, se trabaja con el escenario SSP más desfavorable (SSP5-8.5), tres GCMs, dos métodos de escalamiento y el modelo hidrológico VIC; los caudales resultantes se comparan con los obtenidos en la Actualización del Balance Hídrico.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Caracterizar la incertidumbre de proyecciones climáticas en los recursos hídricos de la cuenca del Río Cachapoal 5 km aguas abajo de la junta con Río Cortaderal, considerando distintos escenarios climáticos, modelos de circulación general, técnicas de escalamiento de GCM y utilizando el modelo hidrológico distribuido de base física VIC.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar la incertidumbre derivada de proyecciones de caudales para el periodo 2030-2060, utilizando variables meteorológicas provenientes de modelos de circulación general que consideran los nuevos escenarios SSP (Riahi et al. 2017) y sus diferencias respecto de las proyecciones generadas con los escenarios RCP (van Vuuren et al. 2011).
2. Analizar el efecto de considerar distintos modelos de circulación general y diversas técnicas de escalamiento en las proyecciones de precipitación y temperatura.
3. Estudiar la incertidumbre de escenarios, GCMs y métodos de escalamiento de caudales medios diarios en la cuenca.

1.3 Estructura del documento

Este trabajo se encuentra organizado de la siguiente forma: en el Capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica que abarca investigaciones relacionadas al tema en estudio, y explicaciones de la terminología utilizada durante el resto del documento. En el Capítulo 3 se entrega información sobre la zona de estudio, considerando características geomorfológicas, meteorológicas e hidrológicas de la cuenca. En el Capítulo 4 se presenta la metodología utilizada para obtener las forzantes meteorológicas que requiere el modelo hidrológico a partir de los modelos climáticos, considerando el escalamiento espacial y temporal de las variables, se presentan las métricas de evaluación de modelos e índices hidrológicos a utilizar. En el Capítulo 5 se muestran los resultados del procesamiento de datos correspondiente a generar el caso base y los escalamientos de las variables climáticas. El Capítulo 6 corresponde a los resultados obtenidos de la modelación hidrológica y el análisis de incertidumbre, se analizan los resultados desagregándolos según escenario climático y

según método de escalamiento. El capítulo final corresponde a la discusión y conclusiones del estudio.

2 MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se presenta la información existente en la literatura referente a los temas abordados en la presente memoria, los que se subdividen en: 1) cambio climático, incluyendo escenarios climáticos, modelos de circulación general y técnicas de escalamiento, 2) modelación hidrológica y 3) caracterización de la incertidumbre.

2.1 Cambio climático

2.1.1 Definición y estado actual

El cambio climático es un proceso del sistema climático de la Tierra que se define en base a variaciones estadísticas significativas que persisten por un periodo extenso de tiempo, del orden de décadas (Baede et al., 2001).

Respecto del origen del cambio climático actual, el Sexto Informe de Evaluación (AR6) desarrollado por el Grupo de Trabajo I (GT-I) del IPCC, confirma que la acción humana es la causante del calentamiento global, dado que al realizar simulaciones climáticas los cambios actuales en la temperatura solo se producen al agregar los factores humanos (Figura 2-1b). Además, se indica que han existido cambios rápidos y generalizados en la atmósfera, el océano, la criósfera y la biósfera; agregando que el estado actual del sistema climático en muchos aspectos no tiene precedentes durante muchos siglos o miles de años, como se muestra en la Figura 2-1a. Considerando los posibles futuros climáticos, el reporte menciona que el aumento de la temperatura global superará los 1,5°C y 2°C durante el siglo XXI, a menos que se produzcan reducciones profundas de dióxido de carbono (CO₂) y otras emisiones de gases de efecto invernadero en las próximas décadas.

Dentro de los efectos que produce el calentamiento global en el sistema climático, en el reporte se incluyen aumentos en la frecuencia e intensidad de temperaturas extremas cálidas, olas de calor marinas, y aumento de eventos extremos de precipitaciones, sequías agrícolas y ecológicas en algunas regiones y en la proporción de ciclones tropicales intensos, así como reducciones en el hielo marino del Ártico, la capa de nieve y el permafrost. En cuanto al ciclo del agua, se proyecta que el calentamiento global continuará aún más sus cambios, incluyendo la variabilidad y la gravedad de los eventos húmedos y secos. Se prevé que al aumentar las emisiones de CO₂ los sumideros de carbono oceánicos y terrestres serán cada vez menos efectivos para frenar su acumulación en la atmósfera. Se proyecta que muchos de los cambios existentes y futuros serán irreversibles durante siglos o milenios, especialmente los cambios en el océano, las capas de hielo y el nivel global del mar (IPCC, 2021).

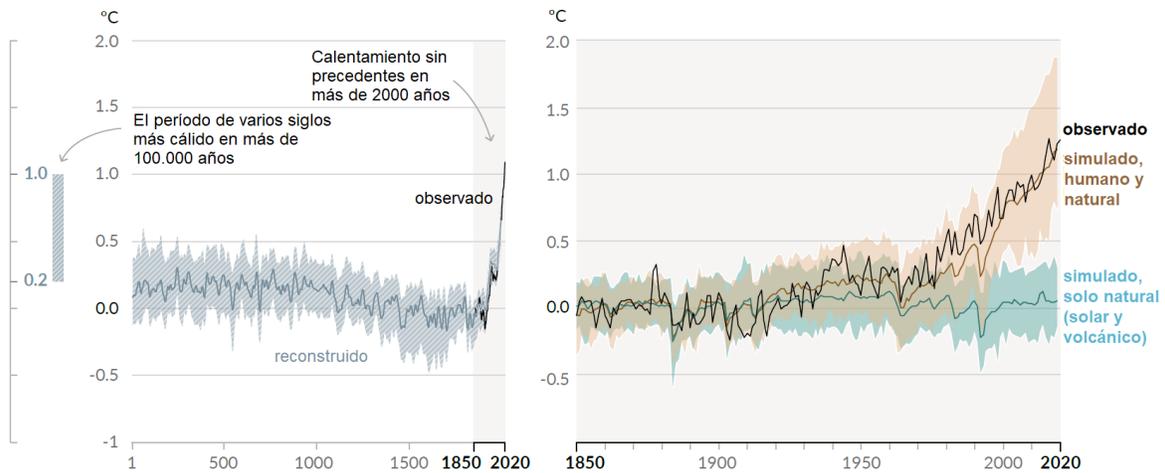


Figura 2-1 Cambios en la temperatura de la superficie global en relación con 1850-1900. a) Cambio en la temperatura de la superficie global (promedio de 10 años) reconstruido (1-2000) y observado (1850-2020) y b) Cambio en la temperatura de la superficie global (promedio anual) observado y simulado utilizando factores humanos y naturales y solo naturales (ambos 1850-2020). Fuente: IPCC (2021).

Los modelos climáticos indican que, para limitar el calentamiento global producido por el ser humano a un nivel específico (por ejemplo, a 1.5°C), es necesario limitar la concentración de CO₂ en la atmósfera, alcanzando al menos cero emisiones de CO₂ neto, junto con fuertes reducciones en otras emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como el CH₄ (IPCC, 2021).

2.1.2 Escenarios climáticos

Las proyecciones climáticas mencionadas en los informes del IPCC y en otros trabajos se basan en escenarios climáticos, que corresponden a representaciones del futuro que ayudan a entender las consecuencias de largo plazo de decisiones de corto plazo (Riahi et al 2017), estas proyecciones son una parte importante de la investigación y evaluación del cambio climático. Los escenarios en general consideran variables que incluyen el cambio socioeconómico, el cambio tecnológico, la energía y el uso de suelo, y las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos.

Entre los años 1990 y 1992, el IPCC desarrolló la primera generación de escenarios climáticos, llamados IS92, integrados por 4 escenarios (A, B, C y D) que abarcaron desde futuros en que todo seguía igual que hasta esa fecha hasta un futuro con políticas aceleradas de reducción de emisiones (IPCC, 1992). En la evaluación posterior (IPCC, 1996), se recomendó considerar los avances existentes en la comprensión de las fuerzas que rigen las emisiones y en el desarrollo de metodologías. Es por ello que, para el AR3 (IPCC, 2000), se incluyeron nuevos escenarios climáticos llamados SRES, que consiste en escenarios que surgen de la combinación entre énfasis en riqueza material o sostenibilidad-equidad y énfasis en globalización o regionalización, obteniendo así cuatro familias de escenarios: A1, A2, B1 y B2.

Luego, IPCC (2014) entregó el informe del Quinto Informe de Evaluación (AR5), donde se analizó la tercera generación de escenarios climáticos, llamados Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs por sus siglas en inglés). En esta oportunidad, el IPCC

decidió que la tarea de crear estos nuevos escenarios estaría a cargo de la comunidad de investigadores y no de la institución. Los investigadores escogieron cuatro escenarios representativos de la literatura, que fueron nombrados de acuerdo con el nivel objetivo de forzamiento radiativo para 2100, obteniendo un escenario de mitigación que conduce a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), dos escenarios de estabilización media (RCP4.5 / RCP6) y un escenario de emisiones de referencia muy alto (RCP8.5). Dado que el desarrollo de los RCPs estuvo enfocado principalmente en las emisiones y concentraciones de GEI, los autores plantearon que era necesaria una nueva fase de trabajo enfocada en los supuestos socioeconómicos y narrativas que guiaran los análisis de mitigación, adaptación e impacto del cambio climático asociados a los niveles de forzamiento radiativo de los RCP (van Vuuren et al 2011).

La siguiente fase de trabajo resultó en los nuevos escenarios utilizados para el desarrollo del Sexto Informe de Evaluación del IPCC – i.e., las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP por sus siglas en inglés; Riahi et al 2017), cuya principal consideración son los desafíos socioeconómicos de mitigación y adaptación al cambio climático que podrían existir a nivel mundial, en la Figura 2-2 muestran las cinco narrativas asociadas a los escenarios SSP ordenados según los desafíos que presentan, estos relatos se encuentran con más detalle en el Anexo A.

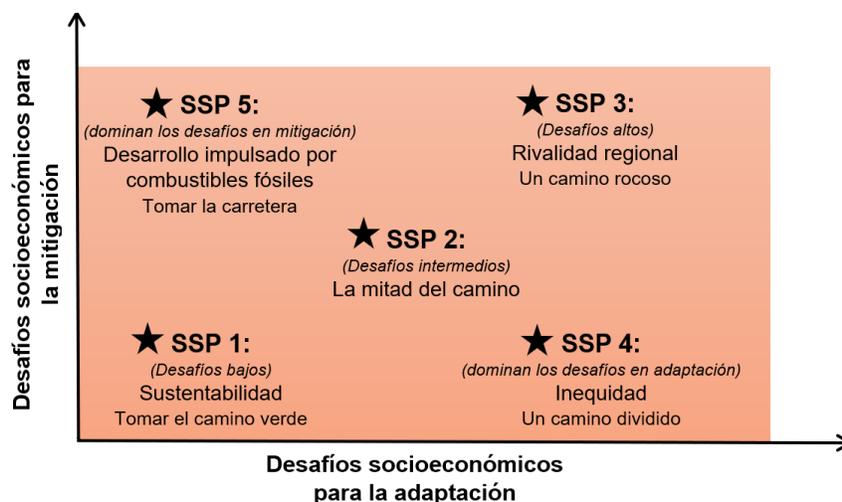


Figura 2-2 Las cinco narrativas de los escenarios SSP, representando distintos niveles de desafío en mitigación y adaptación. Fuente: Adaptado de O'Neill et al. (2017).

Asociando estas narrativas socioeconómicas con distintos niveles de emisión de GEI en la atmósfera, y analizando su factibilidad, se determinaron cinco escenarios ilustrativos: SSP1-1.9 (emisiones muy bajas), SSP1-2.6 (emisiones bajas), SSP2-4.5 (emisiones intermedias), SSP3-7.0 (emisiones altas) y SSP5-8.5 (emisiones muy altas).

Según el informe del Grupo de Trabajo I del IPCC (2021), los escenarios de GEI con bajas y muy bajas emisiones podrían tener efectos rápidos y sostenidos en limitar los efectos del cambio climático de origen antrópico, comparados con los escenarios de emisiones altas y muy altas; sin embargo, las primeras respuestas del sistema climático pueden no ser distinguibles de la variabilidad climática natural (REF?). En el caso de la temperatura de la

superficie terrestre, las diferencias en las tendencias asociadas a periodos de 20 años comienzan a notarse en el corto plazo para el escenario de menores emisiones (SSP1-1.9) en comparación con los escenarios de emisiones altas. Para otras variables climáticas, las respuestas del sistema climático no son diferenciables de la variabilidad climática natural hasta fines del siglo XXI.

2.2 Modelos de Circulación General y escalamiento estadístico

Los GCMs corresponden a representaciones de los procesos físicos de la atmósfera, el océano, la criósfera y la superficie terrestre. Estos modelos utilizan una grilla tridimensional sobre el planeta, teniendo típicamente una resolución horizontal de 100 a 600 km y una discretización vertical de la atmosfera de entre 10 a 20 capas y hasta 30 capas en el océano (IPCC, 2018).

Dada la resolución espacial que entregan los GCM, es necesario utilizar alguna metodología de escalamiento para llevar los resultados de estos modelos a la escala de aplicación (Maurer, 2008).

Actualmente existen dos tipos de metodologías de escalamiento: dinámico y estadístico. El escalamiento dinámico se basa en el uso de Modelos de Circulación Regional (MCR) que utilizan los valores entregados por los GCMs para establecer condiciones iniciales y de borde, representando la dinámica de la atmósfera a escalas más pequeñas mediante ecuaciones físicas (Spak et al. 2007); sin embargo, uno de sus mayores inconvenientes es su alto costo computacional. El escalamiento estadístico corresponde a una evaluación de las relaciones espaciales y temporales de gran escala y locales para un periodo de entrenamiento, que luego son extendidas para un periodo no observado. Su principal ventaja sobre el escalamiento dinámico es su menor costo computacional, pero tienen la desventaja de ser altamente dependientes de las observaciones.

Algunos ejemplos de estudios en los que se utilizó el escalamiento estadístico es el trabajo de Bozkurt et al. (2018), donde se utilizó una corrección de sesgo estadística basada en el trabajo de Piani et al. (2010) y el proyecto “Actualización del Balance Hídrico Nacional” (DGA, 2017), donde fue utilizado el método Quantile Delta Mapping (Cannon et al, 2015).

2.3 Producto meteorológico CR2MET

De acuerdo con el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) “el conjunto de datos CR2MET contiene información meteorológica (precipitación, temperaturas medias y extremas) en una grilla rectangular de 0.05° latitud-longitud (aproximadamente 5km) para el territorio de Chile continental y el periodo 1979-2016. El desarrollo de este producto responde a la necesidad de contar con datos distribuidos espacialmente coherentes con la información observacional disponible”.

El producto de precipitación fue realizado mediante un proceso de escalamiento estadístico de datos del reanálisis atmosférico ERA5 utilizando funciones de transferencia, topografía local y datos observados. En el caso de las temperaturas, además de los datos locales de

topografía, observaciones y el reanálisis ERA5, se considera la temperatura superficial estimada a partir de la información satelital de MODIS proporcionada por las misiones AQUA y TERRA.

2.4 Modelación hidrológica

Para evaluar el efecto que tendrán en los recursos hídricos los cambios en distintas variables climáticas proyectados por los GCM, es necesario realizar una modelación hidrológica de las cuencas de interés.

Los modelos hidrológicos corresponden a representaciones o simplificaciones de los procesos hidrológicos de un sistema hídrico, y pueden caracterizarse por su forma de representar los procesos (conceptual, base física); su distribución espacial (concentrado, distribuido) y la arquitectura del modelo (continuo, estanques) (Hrachowitz y Clark, 2017).

Los principales usos de los modelos hidrológicos incluyen la predicción de crecidas, sequías, recarga de agua subterránea e intercambios entre la superficie de la tierra y la atmósfera, permitiendo desarrollar estrategias para la planificación y gestión de los recursos hídricos. Las principales debilidades de estos modelos para realizar predicciones se encuentran en que algunos procesos hidrológicos no están lo suficientemente bien representados, además del impacto de las incertidumbres en las observaciones utilizadas como inputs (Hrachowitz y Clark, 2017).

Recientemente en el estudio DGA (2017) se utilizó el modelo VIC para el proyecto de “Actualización del Balance Hídrico Nacional”, en el que se estudiaron las 174 cuencas hidrográficas del territorio chileno, generando simulaciones de caudales históricos y futuros a fin de comparar la disponibilidad del recurso, en la proyección de los escenarios hídricos se utilizó el escenario climático RCP8.5 y cuatro GCM.

2.4.1 Modelo VIC

El modelo hidrológico Variable Infiltration Capacity (VIC, Liang et al. 1994), corresponde a un modelo semi-distribuido de base física que representa una gran cantidad de procesos hidrológicos. En la Figura 2-3 se muestra un esquema representativo de los procesos del modelo: evaporación desde suelo desnudo ($E1$), evaporación de agua interceptada en el follaje (Ec), transpiración (Et), escorrentía producto de la precipitación en exceso (Qd), flujo base (Qb) y el traspaso de agua entre las distintas capas del suelo ($Q12$). La escorrentía generada por VIC proviene de dos flujos: la escorrentía que producto de precipitación en exceso no es infiltrada por el suelo y llega directamente a algún cauce (Qd), y el flujo base (Qb), que corresponde al agua que entrega el último estrato de suelo (Liang et al., 1994).

El modelo permite que una cuenca pueda ser dividida horizontalmente en píxeles o celdas con una resolución horizontal que puede estar en el rango de 1 km a 2° de circunferencia (~200 km), y dentro de cada píxel es posible incluir distintos tipos de vegetación o usos de suelo e incorporar bandas de elevación para considerar el efecto topográfico de algunas forzantes. Verticalmente, es posible dividir el suelo en hasta 3 estratos para representar algunos procesos subterráneos, sin incorporar formalmente un acuífero (DGA, 2017). El

modelo realiza un balance de masa cuando se utiliza a escala diaria, y además un balance energético si se utiliza a una resolución temporal menor.

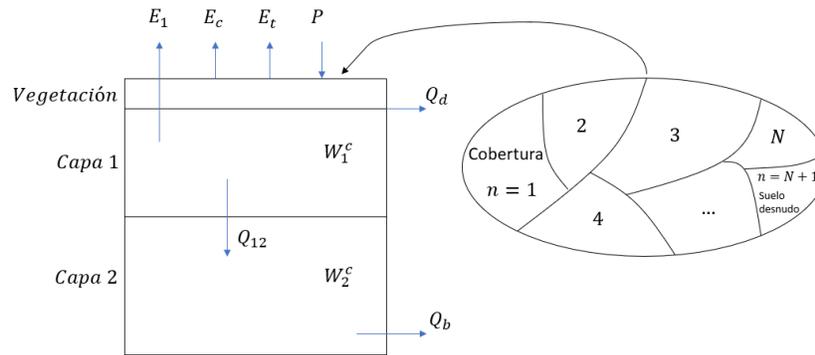


Figura 2-3 Representación de una celda del modelo VIC. Fuente: adaptado de Liang et al. (1994).

Dado que la unidad espacial básica del modelo son celdas, VIC exige la independencia de flujos entre cada celda a ser ingresada, simulando la serie temporal por separado para cada una de ellas sin flujo horizontal de agua, y llevando la escorrentía directamente a la salida de la cuenca, por lo que es necesario entregar todas las forzantes meteorológicas y parámetros necesarios de cada celda por separado.

Los parámetros esenciales para el modelo son los relacionados con la vegetación y con el suelo. Como forzantes meteorológicas, se deben incluir la precipitación y las temperaturas mínimas y máximas, y pueden incluirse otras variables como la velocidad del viento, humedad, radiación, entre otras.

La simulación de nieve en VIC se realiza con un módulo especial, el cual realiza el balance de energía en dos capas de nieve (una capa delgada en la superficie y otra capa en el manto de nieve), modelando la acumulación y derretimiento. Para diferenciar la precipitación líquida de la sólida se utiliza una partición simple de temperatura, donde todos los valores presentados sobre 2°C corresponden a precipitación líquida y los valores bajo 0°C corresponde a nieve, con una variación lineal entre estos valores. La acumulación de nieve nueva genera una compresión de la ya existente, aumentando la densidad, esta acumulación es simulada mediante la utilización de un algoritmo recursivo que consiste en ir generando capas de nieve comprimida a medida que se tiene nieve nueva en el sistema, además se asume una disminución del albedo a medida que aumenta la edad de la nieve.

2.4.2 Evaluación y calibración de modelos hidrológicos

Al trabajar con modelos hidrológicos, es importante realizar una evaluación de la capacidad del modelo para reproducir los procesos de la cuenca en estudio. Por lo general, esta evaluación consiste en realizar simulaciones para un periodo en el que existen datos históricos disponibles para poder comparar ambas series de datos utilizando estadísticos y regresiones. Algunos, estadísticos ampliamente utilizados son el coeficiente de correlación y criterios de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE; Nash and Sutcliffe, 1970) y Kling-Gupta (KGE; Gupta et al, 2009) (ver sección 4.3).

Los modelos hidrológicos utilizan distintos parámetros como parte de la formulación matemática, y si son calibrados pueden representar de mejor manera los procesos de la

cuenca, por ejemplo, el modelo VIC requiere ingresar parámetros asociados al suelo y a la vegetación. Incluso cuando es posible obtener mediciones en terreno de ciertos parámetros se hace necesario realizar un proceso de calibración de éstos.

Para el proceso de calibración se debe: a) escoger la función objetivo que se desea optimizar, b) los parámetros que serán calibrados, escogidos preferentemente a partir de un análisis de sensibilidad, y c) el algoritmo de búsqueda.

Algunos ejemplos de estudios con distintas metodologías de evaluación y de calibración son el trabajo de Mendoza et al. (2016), en el que se analiza y evalúa el impacto de las decisiones de modelación en el cambio hidrológico, la Actualización del Balance Hídrico, cuya calibración se realizó buscando maximizar conjuntamente los valores de NSE y KGE y también los trabajos de Addor et al. (2015), Melsen et al. (2018), Chegwiddden et al. (2019).

2.4.3 Índices hidrológicos

Los índices hidrológicos corresponden a valores derivados de series hidrológicas observadas o modeladas y están diseñados para extraer información relevante de una cuenca como, por ejemplo, procesos hidrológicos dominantes (Mcmillan et al. 2017). Por ello, son útiles a la hora evaluar la calibración de un modelo, de caracterizar de una cuenca y también evaluar su respuesta frente a distintos estímulos, como es el caso de los cambios asociados a los escenarios climáticos.

Los índices hidrológicos descritos en el trabajo de Yilmaz et al. (2008), corresponden a cuantificaciones del sesgo en distintas partes de la curva de duración como valores medios, altos y bajos, pendiente de la zona media y volumen en valores medios, las que permiten evaluar caudales medios y extremos.

2.5 Cuantificación de incertidumbre

El enfoque top-down considera las distintas etapas en el modelamiento de proyecciones hidrológicas, comenzando con los escenarios climáticos, seguidos por los GCM, técnicas de escalamiento, las condiciones iniciales de las cuencas en estudio y finalmente los modelos hidrológicos y sus parámetros asociados; lo que genera una “cascada de incertidumbre”, como detallaron Clark et al. en el 2016 (Figura 2-4).

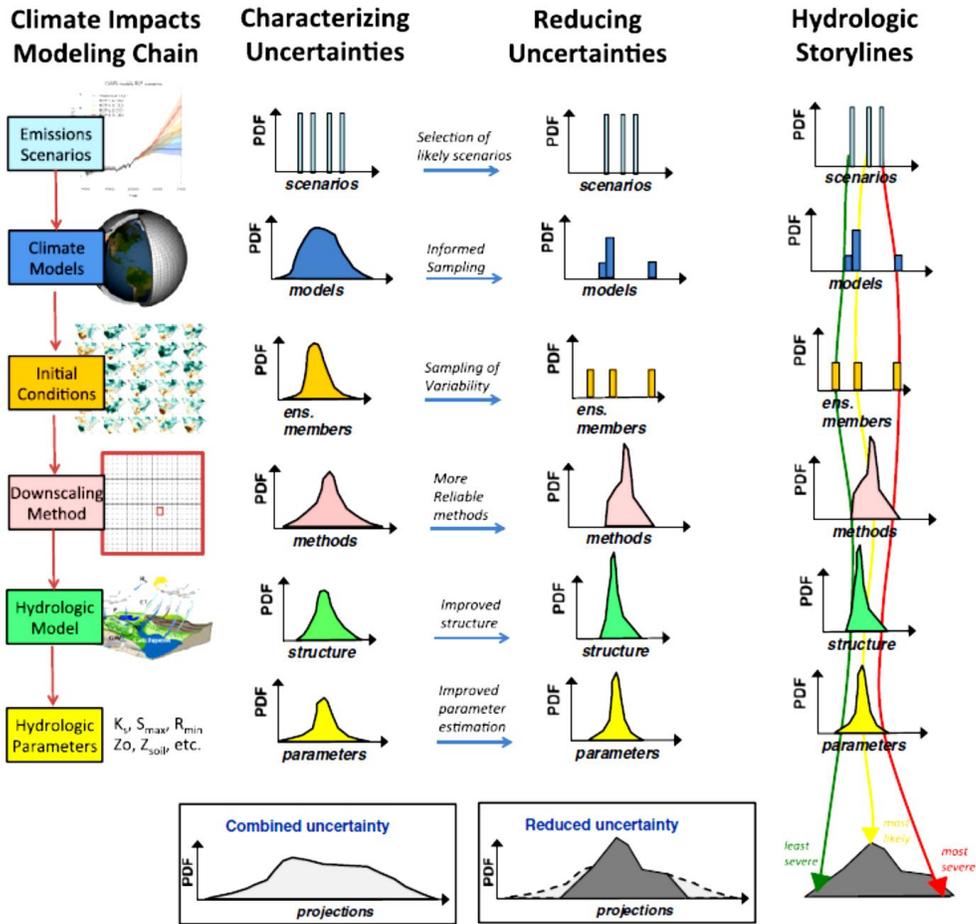


Figura 2-4 Cascada de incertidumbre en la evaluación de impactos del cambio climático (Clark et al. 2016).

En hidrología, usualmente se utilizan conjuntos para caracterizar la incertidumbre, que corresponden a un conjunto de resultados de simulaciones, derivados de las diferentes decisiones tomadas durante la modelación, lo que permite tener un espectro más amplio de posibilidades que al tener un único resultado; además, cada miembro del conjunto puede tener una probabilidad de ocurrencia asociada o pueden ser equiprobables.

Existe una gran cantidad de estudios que consideran distintas partes de la cascada de incertidumbre, con muestras de distintos tamaños para cada paso. Un ejemplo de ello es el trabajo de Chegwiddden et al et al. (2019), donde se utilizan dos escenarios climáticos, 10 modelos de circulación general, dos métodos de escalamiento y cuatro implementaciones de modelos hidrológicos, resultando un ensemble con 160 simulaciones, concluyendo que las mayores diferencias entre los resultados son debido a las métricas utilizadas.

3 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1 Ubicación

La zona en estudio corresponde a la Cuenca alta del Río Cachapoal, ubicada dentro de la cuenca del Río Rapel en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile (Figura 3-1). La cuenca se encuentra delimitada por la estación fluviométrica Río Cachapoal 5 km aguas arriba río Cortaderal, perteneciente a la Dirección General de Aguas (DGA). La Figura 3-1 incluye la estación meteorológica Rengo, utilizada para evaluar los modelos de circulación general debido a la extensión de sus registros.

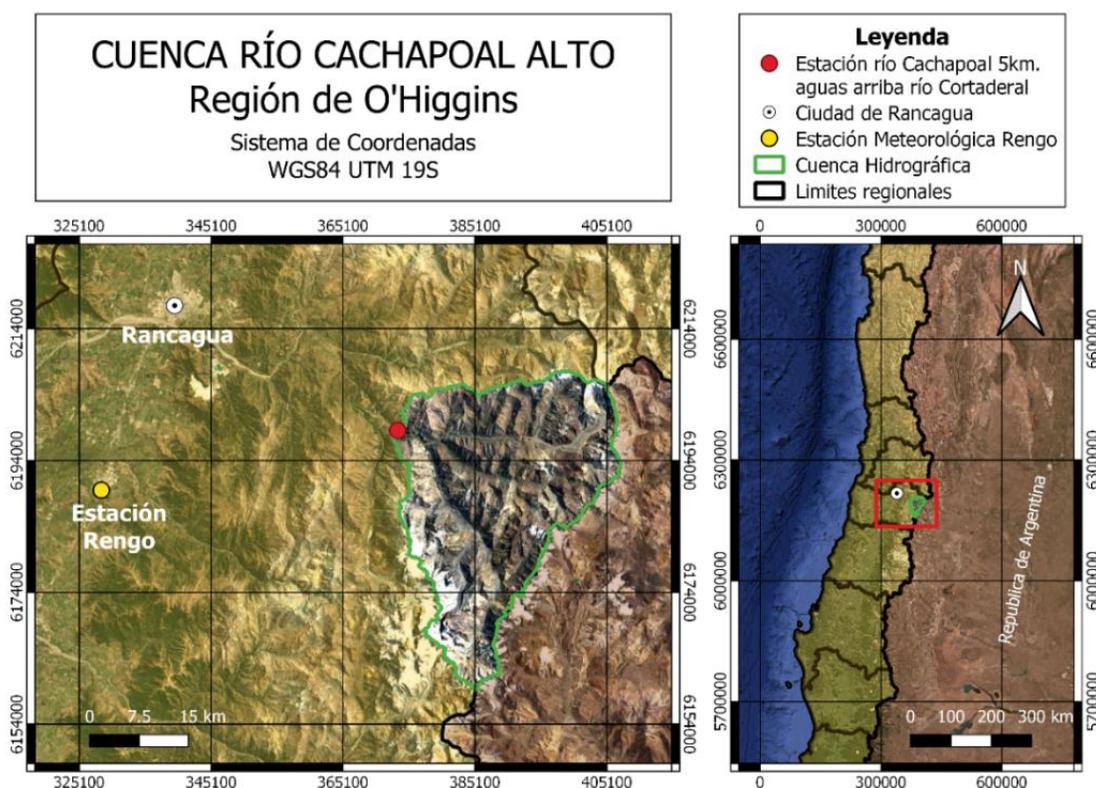


Figura 3-1 Mapa de la zona de estudio.

La cuenca en estudio posee un área de 965 km², con rangos de elevación que van entre 1104 y 5150 m.s.n.m. (Tabla 3-1), incluyendo zonas de alta pendiente. En la Figura 3-2 se muestra la curva hipsométrica de la cuenca, donde es posible observar que al menos la mitad de la cuenca se encuentra a una altura superior a los 3000 (m.s.n.m.), siendo una cuenca de alta montaña.

Tabla 3-1 Información sobre la cuenca.

ID cuenca	6003001
Nombre de la cuenca	Rio Cachapoal 5 Km. Aguas Abajo Junta Cortaderal
Latitud	-34,35
Longitud	-70,38
Área (km ²)	964,7
Elevación Media (m.s.n.m.)	2993
Elevación Estación (m.s.n.m.)	1104
Elevación Máxima (m.s.n.m.)	5150
Pendiente Media (°)	29.8

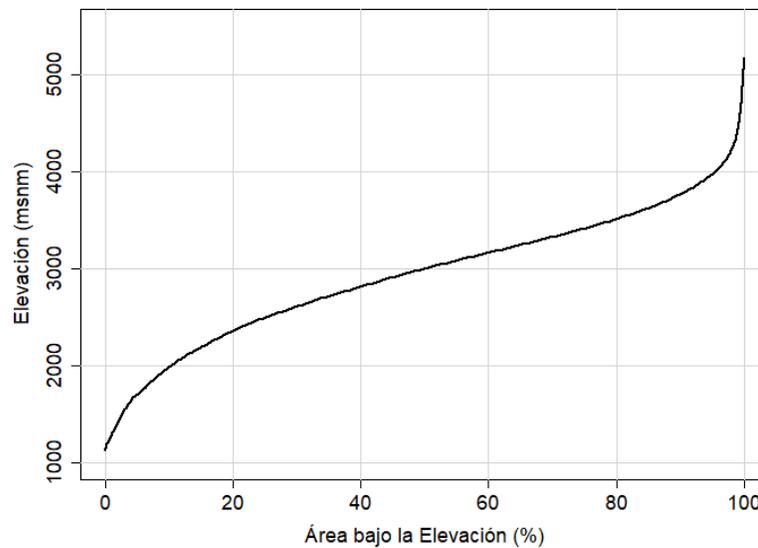


Figura 3-2 Curva hipsométrica de la cuenca.

la Tabla 3-2 muestra los distintos tipos de cobertura de suelo en la cuenca. Se observa que predomina el suelo desnudo (~77,9%), pastizales (~8,4%) y arbustos (~6%). Según la base de datos de CAMELS-CL (Álvarez-Garretón et al., 2017) el porcentaje glaciar de la cuenca es de alrededor de 9%; sin embargo, esta fracción fue calculada utilizando una metodología distinta a los otros tipos de suelo por lo que no se incluye en la tabla.

Tabla 3-2 Tipos de suelos presentes en la cuenca. (Fuente: CAMELS-CL, 2017).

Tipo de suelo	Porcentaje de la cuenca (%)
Suelo desnudo	77.87
Pastizales	8.42
Arbustos	5.84
Nieve o hielo	4.53
Cuerpos de agua	2.37
Bosque Nativo	<1
Impermeable	<1

3.2 Clima

En la cuenca del río Cachapoal Alto existe una única estación que registra precipitación; sin embargo, sus registros son incompletos. La estación de temperatura más cercana a la zona de estudio se encuentra a 42 km. Por ello, se utiliza en este estudio el producto grillado CR2MET v2.0 (DGA, 2017), según el cual la cuenca presenta una precipitación media anual de 1233 (mm), con una temperatura anual promedio de 4,2°C. En la Figura 3-3 se presenta la climatología de la cuenca para el periodo 1985-2014, teniendo en el eje izquierdo la precipitación y en el eje derecho las temperaturas máxima, media y mínima.

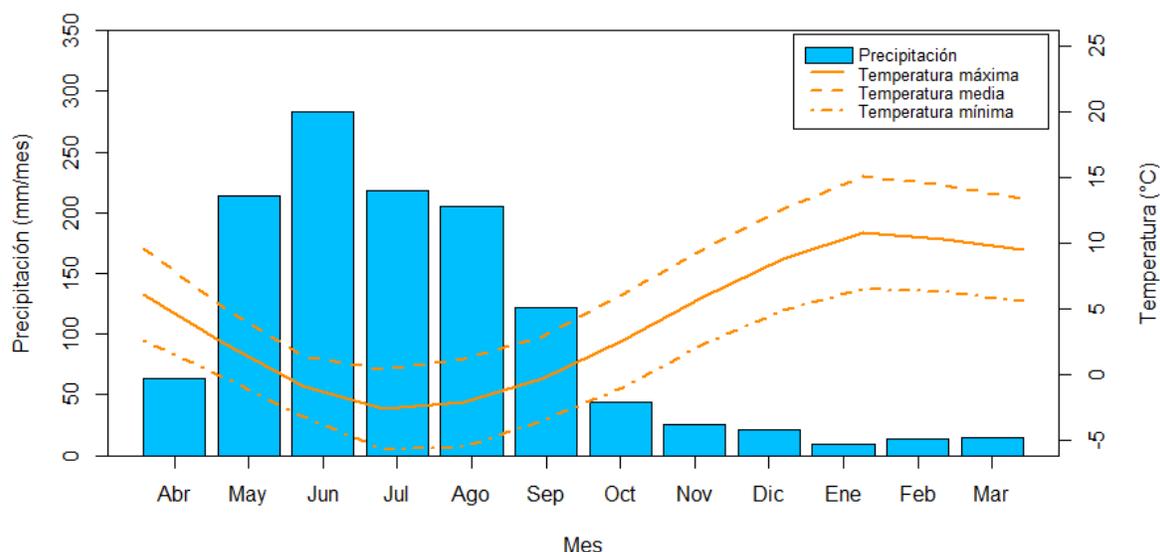


Figura 3-3 Precipitación y temperatura promedio mensual (máxima, media y mínima) (1985-2014) obtenida del producto CR2met para la cuenca del Río Cachapoal Alto.

3.3 Hidrología

La Figura 3-4 muestra la curva de variación estacional para los caudales de la estación Cachapoal 5 km bajo Cortaderal. La cuenca posee un régimen nival, ya que el alza de caudales en la temporada de primavera-verano corresponde al derretimiento de la nieve acumulada durante los meses de invierno, sin embargo, a menor probabilidad de excedencia aparece un comportamiento pluvial.

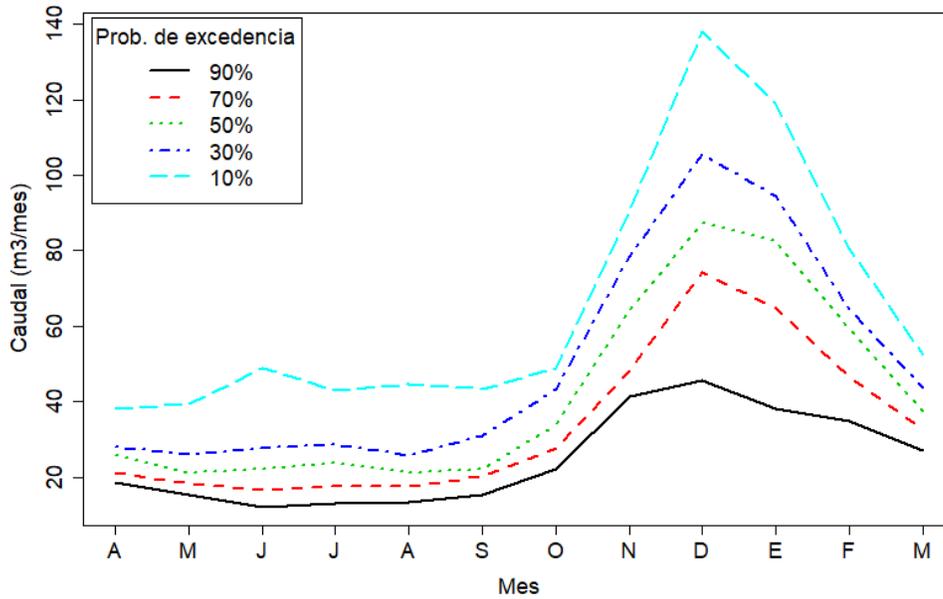


Figura 3-4 Curva de variación estacional para diferentes probabilidades de excedencia.

4 METODOLOGÍA

En este capítulo se detallan las decisiones metodológicas utilizadas para caracterizar la incertidumbre en proyecciones de cambio hidrológico, desde el procesamiento del escenario climático hasta la evaluación de los caudales obtenidos con el modelo hidrológico.

En la Figura 4-1 se muestra un diagrama explicativo de las distintas opciones utilizadas para generar variaciones de las forzantes meteorológicas. Considerando todas las combinaciones de escenarios climáticos, modelos de circulación general y métodos de escalamiento, se obtienen 10 sets de forzantes climáticas.

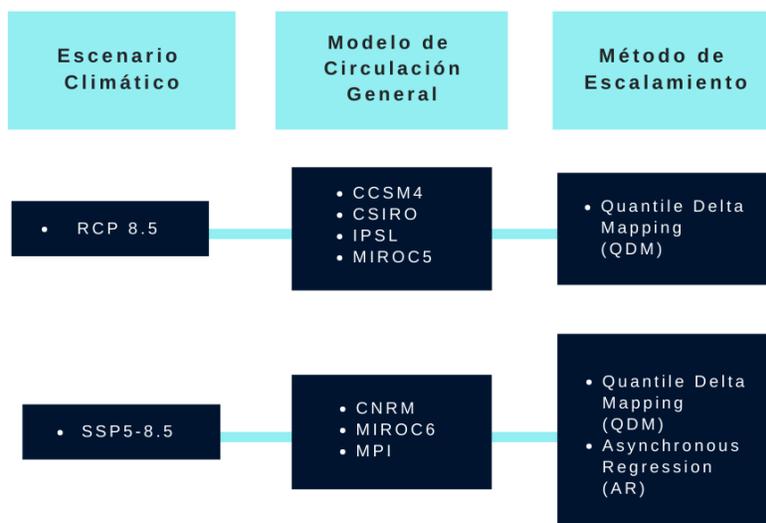


Figura 4-1 Esquema de los tres puntos de decisión utilizados para crear el conjunto de resultados.

4.1 Escenarios Climáticos

Se utilizan 2 escenarios, correspondientes a aquéllos más desfavorables en cuanto a emisiones de GEI considerados en el Quinto y Sexto Proyecto de Intercomparación de modelos acoplados (CMIP5 y CMIP6, por sus siglas en inglés), respectivamente.

En el CMIP5 el escenario más desfavorable corresponde al RCP8.5, el que fue utilizado en la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018), siendo utilizadas en el presente estudio como primer set de forzantes (Figura 5-6 y Figura 5-9).

El segundo escenario utilizado es el SSP5-8.5 que corresponde al escenario más desfavorable en términos de emisiones en el CMIP6. En el resto del capítulo se hará referencia únicamente a los procesos realizados para los modelos del escenario SSP5-8.5; sin embargo, es importante mencionar que el procesamiento de los datos del escenario RCP8.5 fue realizado de manera similar para el Balance Hídrico (BH).

4.2 Modelos de Circulación General

Debido a la falta de observaciones directas de precipitación y temperatura, se utilizará el producto grillado CR2MET v2.0 como caso base, el que se encuentra disponible para el periodo 1979-2018 con una resolución de $0,005^\circ$ lo que equivale a alrededor de 5 km.

Una vez escogido el escenario climático, se buscó aquellos modelos climáticos disponibles para la misma resolución temporal de las forzantes a trabajar, es decir, temperatura y precipitación diarias. Inicialmente se encontraron 4 GCMs disponibles para el escenario SSP5-8.5 (CNRM, IPSL, MIROC y MPI), los que fueron sometidos a evaluación para determinar si lograban reproducir la climatología de la zona de estudio. Para valuar la climatología se utilizó la estación Rengo (Figura 3-1).

Para la evaluación de los modelos, se utilizó la temporalidad de la precipitación (Figura 4-2 (a)), la cantidad de días de lluvia, la temperatura y amplitud térmica diaria (Figura 4-2 (b) y

(c)), siendo la amplitud térmica la diferencia entre la temperatura máxima y mínima durante el día.

En cuanto a la precipitación, el modelo IPSL muestra un aumento de las lluvias en verano, lo que no tiene relación con los patrones de la zona. Además, la cantidad de días de lluvia que entrega este modelo corresponden al 54% de los días periodo en estudio, una cifra alta considerando que en estaciones de la región los días de lluvia no superan el 20% (ver Tabla 4-1).

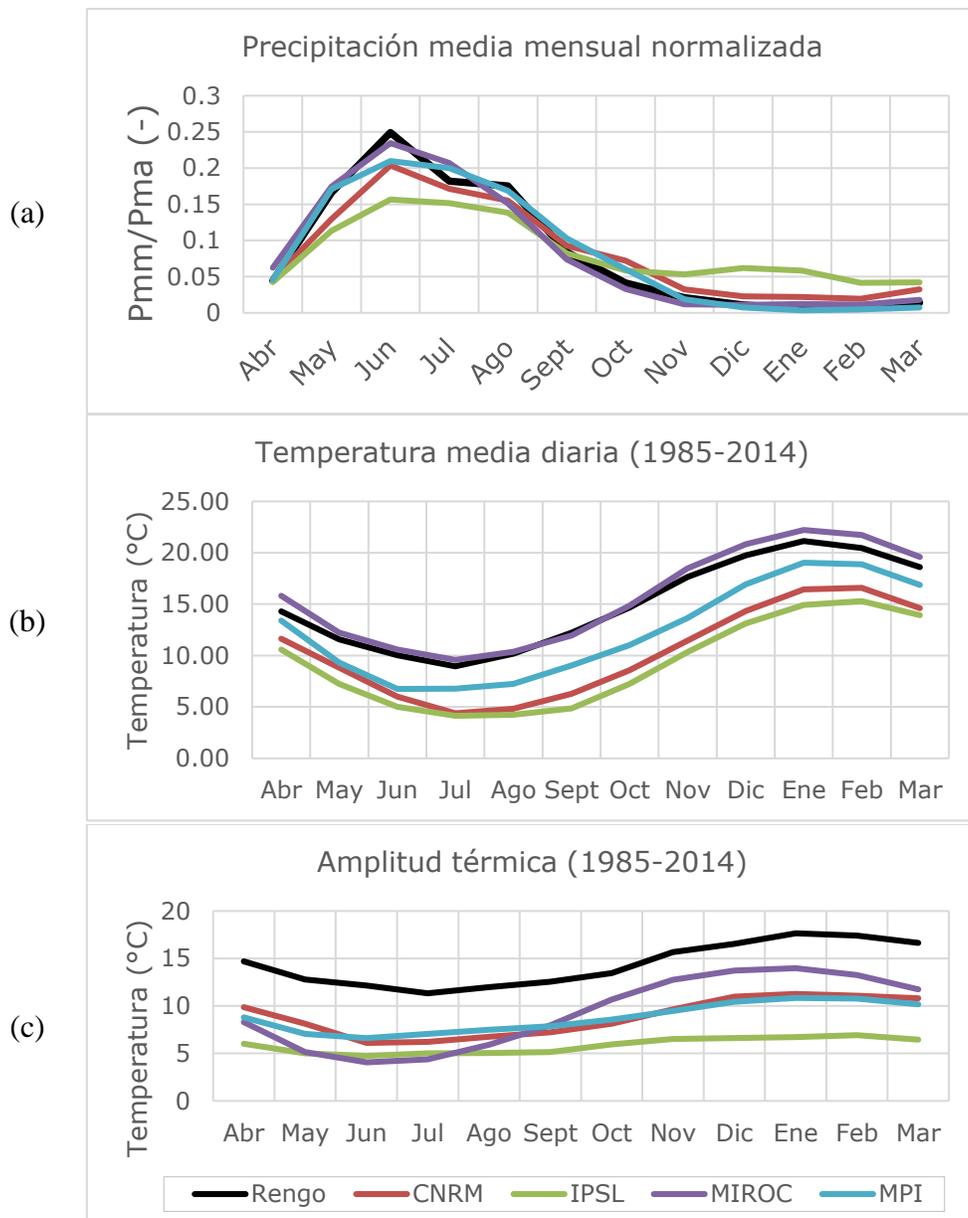


Figura 4-2 Evaluación de la climatología de los modelos de circulación general utilizando interpolación espacial (inverso de la distancia) a la estación Rengo.

Tabla 4-1 Porcentaje de días de lluvia para los GCM evaluados y estaciones cercanas con registro de precipitaciones.

	CNRM	IPSL	MIROC	MPI	Estación Rancagua (s/r)	Estación Popeta (s/r)
Días totales	10957	10957	10949	10949	10867	10867
Días sin lluvia	6933	5067	7764	8861	9455	9745
Días con lluvia	4024	5890	3185	2088	1412	1122
Porcentaje días con lluvia	0.37	0.54	0.29	0.19	0.13	0.1

*s/r: sin rellenar.

En base a la evaluación realizada, se decide trabajar con los modelos CNRM, MIROC y MPI, detallados en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2 Información de los modelos utilizados para el escenario SSP.

Modelo	Abreviación	Variable	Periodo histórico	Periodo proyectado	Realización	Resolución
CNRM-CERFACS.CNRM-CM6-1	CNRM	temperatura	1850-2014	2015-2100	r1i1p1f2	250 km
		precipitación	1950-2014			
DKRZ.MPI-ESM1-2-HR	MPI	temperatura	1850-2014	2015-2100	r1i1p1f1	100 km
		precipitación				
MIROC.MIROC6	MIROC	temperatura	1850-2014	2015-2100	r1i1p1f1	250 km
		precipitación				

Debido a la extensión temporal disponible tanto de los GCM así como de las modelaciones realizadas para el balance hídrico, el periodo histórico utilizado fue 1985-2014 y el periodo futuro fue 2030-2060.

4.2.1 Métodos de escalamiento

En primer lugar, se realiza una interpolación espacial usando el inverso de la distancia (Burrough and McDonnell, 1998; Longley et al., 2001) para llevar los datos de los GCM a la misma resolución que el CR2MET. Luego, se aplican las correcciones de utilizando dos métodos: Asynchronous Regression (AR) y Quantile Delta Mapping (QDM).

4.2.1.1 Asynchronous Regression (AR)

Método desarrollado por Dettinger et al. (2004) que consiste en – una vez realizado el escalamiento espacial – ordenar los datos de mayor a menor para luego desarrollar modelos de regresión lineal de las series observadas y simuladas históricas mediante “stepwise linear regression”, lo que permite reducir los sesgos no solo en los valores medios sino que también en los extremos (Stoner et al. 2013). Es importante destacar que, para la estación seca (verano), si se tienen pocas observaciones se realiza una agrupación de estos meses para

poder realizar la regresión. Este método fue programado para el presente trabajo siguiendo los pasos explicados en Stoner et al (2013).

4.2.1.2 Quantile Delta Mapping (QDM)

Este método – propuesto por Cannon et al. (2015) – consiste en realizar un escalamiento espacial para luego generar curvas de probabilidad acumulada de los GCM para cada periodo (histórico o futuro), para luego determinar una razón entre las probabilidades de no excedencia de ambos periodos, como se muestra en la ecuación (I).

$$\Delta_m = \frac{X_{GCM-fut}(m)}{X_{GCM-hist}(m)} \quad (I)$$

Luego, se multiplica la CDF de la serie observada en el periodo histórico por el valor de Δ_m en cada cuartil de no excedencia, obteniendo la serie futura. El procesamiento fue realizado en Rstudio, utilizando la función QDM del paquete MBC (Cannon, 2018).

4.2.2 Distribución subdiaria

El modelo hidrológico VIC requiere que las forzantes de entrada se encuentren a una resolución temporal trihoraria, por lo que los GCM debieron ser llevados a esta escala.

Para la precipitación, se toma una distribución representativa diaria de los eventos de tormenta para cada mes y se aplica esta distribución a los valores diarios. En el caso de la temperatura, se ajusta una curva sinusoidal para representar la variación de la temperatura durante el día. (Hreinsson, 2008; Mendoza, 2010).

$$T(t) = -\frac{1}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{24}(t + \varphi)\right) (T_{max} - T_{min}) + \frac{1}{2}(T_{max} + T_{min}) \quad (II)$$

Donde:

T_{max} : temperatura máxima diaria

T_{min} : temperatura mínima diaria

t: hora del día

φ : parámetro que controla el tiempo de ocurrencia de las temperaturas extremas

El parámetro φ se consideró igual a 15 para que las temperaturas mínimas y máximas sean a las 5 y 15 horas respectivamente.

4.3 Evaluación del modelo hidrológico

En este estudio, se utilizan las siguientes métricas.

- Eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970): compara la habilidad de un modelo con respecto a la media de las observaciones.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (QS_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1}^N (QO_i - \mu_o)^2} = 1 - \frac{MSE}{\sigma_o^2} \quad (III)$$

- Eficiencia de Kling-Gupta (Gupta et al., 2009):

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

con:

Alpha: división entre la desviación estándar de valores simulados y observados; evalúa la capacidad del modelo de reproducir la variabilidad temporal en las observaciones.

$$\alpha = \frac{\sigma_S}{\sigma_O} \quad (V)$$

- Beta: división entre la media del valor simulado y observado; evalúa la capacidad del modelo para reproducir el volumen observado.

$$\beta = \frac{\mu_S}{\mu_O} \quad (VI)$$

- r: corresponde al coeficiente de correlación de Pearson. Evalúa el error en forma y tiempo entre los caudales observados y simulados.

$$r = \frac{cov(QO, QS)}{\sigma_O^2 \sigma_S^2} \quad (VII)$$

Donde “cov” es la covarianza entre observación y simulación y σ es la desviación estándar.

4.4 Índices hidrológicos empleados en el análisis

Los índices hidrológicos cuantifican las diferencias en distintas partes de las curvas de duración de dos series de caudales distintos, a continuación se detallan los índices utilizados obtenidos de Yilmaz et al. (2008) además de un coeficiente que evalúa la estacionalidad de los caudales. Estos índices son utilizados en el presente estudio para comparar los caudales medios mensuales obtenidos en el periodo futuro respecto del histórico.

- Porcentaje de sesgo en el coeficiente de esorrentía: Diferencias en el balance.

$$BiasRR = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^N (QS_i - QO_i)}{\sum_{i=1}^N QO_i} \quad (VIII)$$

Donde N corresponde al número de días, QO corresponde al caudal observado y QS al simulado.

- Porcentaje de sesgo en la pendiente del segmento medio de la CD: Variabilidad de caudales o “rapidez” de la respuesta hidrológica.

$$BiasFMS = 100 \cdot \frac{[\log(QS_{m1}) - \log(QS_{m2})] - [\log(QO_{m1}) - \log(QO_{m2})]}{[\log(QO_{0.2}) - \log(QO_{0.7})]} \quad (IX)$$

Donde $m1$ y $m2$ son la parte más baja y más alta de la curva de duración (0,2 y 0,7 respectivamente).

- Porcentaje de sesgo en el segmento de volúmenes altos en la CD: Cuantifica diferencias en los caudales altos.

$$BiasFHV = 100 \cdot \frac{\sum_{h=1}^H (QS_h - QO_h)}{\sum_{h=1}^N QO_h} \quad (X)$$

Donde $h = 1, 2, \dots, H$ corresponden a los índices inferiores a una probabilidad de excedencia igual a 0,02.

- Porcentaje de sesgo en el segmento de volúmenes bajos en la CD: Sirve para cuantificar diferencias en los caudales bajos.

$$BiasFLV = 100 \cdot \frac{\sum_{l=1}^L [\log(QS_l) - \log(QS_L)] - \sum_{l=1}^L [\log(QO_l) - \log(QO_L)]}{\sum_{l=1}^L [\log(QO_l) - \log(QO_L)]} \quad (XI)$$

Donde $l = 1, 2, \dots, L$ son los índices entre las probabilidades 0,7 y 1,0, con L el índice del mínimo caudal ($p_{exc} = 1$).

- Porcentaje de sesgo en el rango de caudales medios en la CD: Diferencia entre la mediana de los caudales.

$$BiasFMM = 100 \cdot \frac{\log(QS_{med}) - \log(QO_{med})}{\log(QO_{med})} \quad (XII)$$

Donde med representa el valor medio.

- Coeficiente estacional: Corresponde al cociente entre el caudal de verano sobre el de invierno y será utilizado para comparar la estacionalidad.

$$C_{est} = \frac{Q_{verano}}{Q_{invierno}} \quad (XIII)$$

La Figura 4-3 muestra las partes de la curva de duración utilizadas para calcular los distintos errores en la simulación de índices hidrológicos.

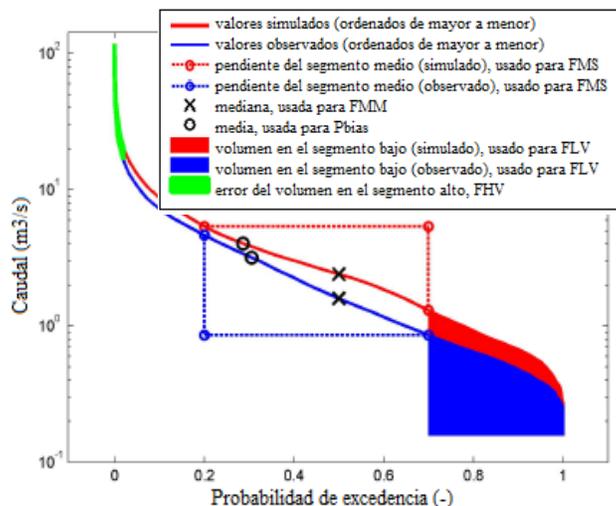


Figura 4-3 Dos curvas de duración distintas mostrando los atributos utilizados para calcular índices hidrológicos. Fuente: Traducido de Casper et al (2012).

4.5 Caracterización de la incertidumbre

Para realizar un primer acercamiento a la evaluación de la incertidumbre asociada a las proyecciones de caudales se calculó:

- El porcentaje de error de las simulaciones del periodo histórico de cada GCM respecto del caso base para distintas probabilidades de excedencia.
- La diferencia porcentual entre los caudales del periodo futuro respecto de los caudales históricos de cada GCM para distintas probabilidades de excedencia.
- Los índices hidrológicos descritos en el acápite anterior comparando caudales futuros versus históricos para cada GCM.

Estos valores fueron analizados según escenario climático y según método de escalamiento. Además, se realizó un análisis de dispersión de los índices hidrológicos utilizando la desviación estándar. La desviación estándar fue calculada primero para cada grupo obtenido de clasificar los modelos según escenario climático o método de escalamiento y luego se calcula para todo el conjunto. Por ejemplo, si se clasifica según escenario climático se tienen dos grupos: GCMs del escenario RCP8.5 y GCMs del escenario SSP5-8.5, por lo que se calcula la desviación estándar de los índices para cada grupo y luego se calcula para el universo total, es decir, para ambos escenarios juntos. Con estas comparaciones se pretende vislumbrar si al agregar más escenarios climáticos o más métodos de escalamiento se contribuye a la dispersión de los datos, aumentando el rango de valores posibles y la incertidumbre asociada o si por el contrario la mayor cantidad de datos contribuye a disminuir esta dispersión.

Finalmente, se propone una metodología cuyo objetivo es determinar si a mayor cantidad de modelos la dispersión aumenta o disminuye, independiente del escenario climático y del método de escalamiento, la que se detalla a continuación:

- i. Se construyen de forma aleatoria subgrupos de GCM de distintos tamaños considerando todas las combinaciones posibles, tomando en cuenta todos los escenarios y métodos de escalamiento, para este estudio se tienen 10 sets distintos de caudales. Así, se obtienen XX subgrupos de 3 GCM, XX subgrupos de 4 GCM y así hasta llegar al grupo de 10 GCM.
- ii. Se calcula la desviación estándar de los índices hidrológicos de cada subgrupo.
- iii. Se construyen boxplots para comparar la desviación estándar según el tamaño de cada subgrupo.

5 RESULTADOS

5.1 Procesamiento de Datos

5.1.1 Funcionamiento del modelo calibrado

Los parámetros utilizados por el modelo Variable Infiltration Capacity (VIC) para la cuenca fueron calibrados en el contexto de la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018). Para el presente estudio, se utilizan los mismos sets de parámetros, variando sólo las forzantes precipitación y temperatura.

En la Tabla 5-1 se presentan los índices de eficiencia NSE y KGE obtenidos en la calibración utilizada y para el caso base utilizado en este estudio. Para el cálculo de estos índices, se considera el periodo 01-04-1995 a 31-03-2005. Se observa que los valores de NSE y KGE son levemente más bajos a los obtenidos en el BH (2018), un resultado esperable considerando que en el caso del BH dichos valores corresponden al periodo de calibración y en el caso base (LB) utilizado se calculó para todo el periodo de estudio.

Se presentan también los valores de tres coeficientes asociados al índice KGE, para el caso base. Por una parte, se tiene que α tiene un valor cercano a 1, lo que implica que la desviación estándar de valores simulados y observados es similar, siendo la desviación estándar de los caudales simulados levemente menor que la de los observados. Por otra parte, el valor de β indica que la media del valor simulado es menor que la media de los observados, lo que podría indicar una tendencia a la subestimación. Finalmente, el valor de r indica una correlación aceptable entre los caudales simulados y observados.

Tabla 5-1 Métricas de evaluación de la modelación obtenidas en la calibración del Balance Hídrico (DGA, 2018) y para el caso base del presente estudio.

Métrica	Valor BH (-)	Valor LB (-)
NSE	0.374	0.301
KGE	0.647	0.609
r	no disp.	0.655
β	no disp.	0.823
α	no disp.	0.947

En la Figura 5-1 se muestra una comparación de los caudales simulados en VIC para el caso base del BH y el caso base del presente estudio, con los caudales observados de la estación fluviométrica. Se aprecia que la simulación de este estudio difiere de la del BH en la

distribución de los caudales de invierno (curva de variación estacional, panel del medio) y en los caudales bajos (curva de duración, panel inferior). Sin embargo, se mantiene la estacionalidad y el mes de caudales máximos.

Para tener un conocimiento más detallado del desempeño del modelo, se calcularon errores asociados a distintos índices hidrológicos (Tabla 5-2). Existen diferencias notorias entre los valores del BH y de la LB, coincidiendo con las diferencias observadas para las curvas de duración (Figura 5-1). Analizando el caso base, se observa que el mayor sesgo se encuentra en los caudales bajos (FLV), seguido por el balance general (RR) y la pendiente de la curva de duración (FMS), y los caudales altos son los que presentan el menor porcentaje de sesgo. En el caso del coeficiente estacional, este indica que los caudales de invierno son notoriamente menores que los de verano, lo que se ajusta a la hidrología natural de la cuenca, el valor levemente menor del coeficiente obtenido para la LB coincide con los caudales de invierno mayores a los obtenidos en el BH.

Tabla 5-2 Índices hidrológicos obtenido en el balance hídrico y para el caso base del presente estudio.

Índice hidrológico	Unidad	Valor BH	Valor LB
FMS	%	61	-20.274
FHV	%	-20.4	-4.400
FLV	%	-7.3	65.31
FMM	%	no disp.	8.927
RR	%	no disp.	21.75
C _{est}	-	0.4	0.3

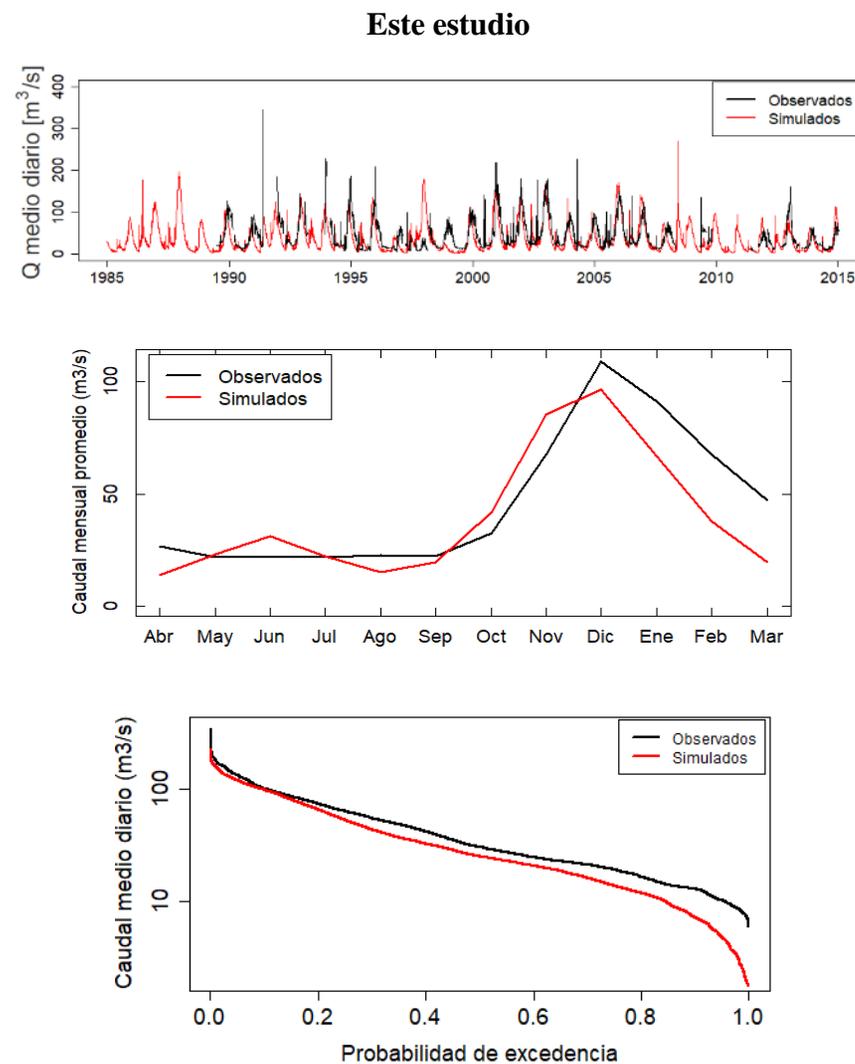
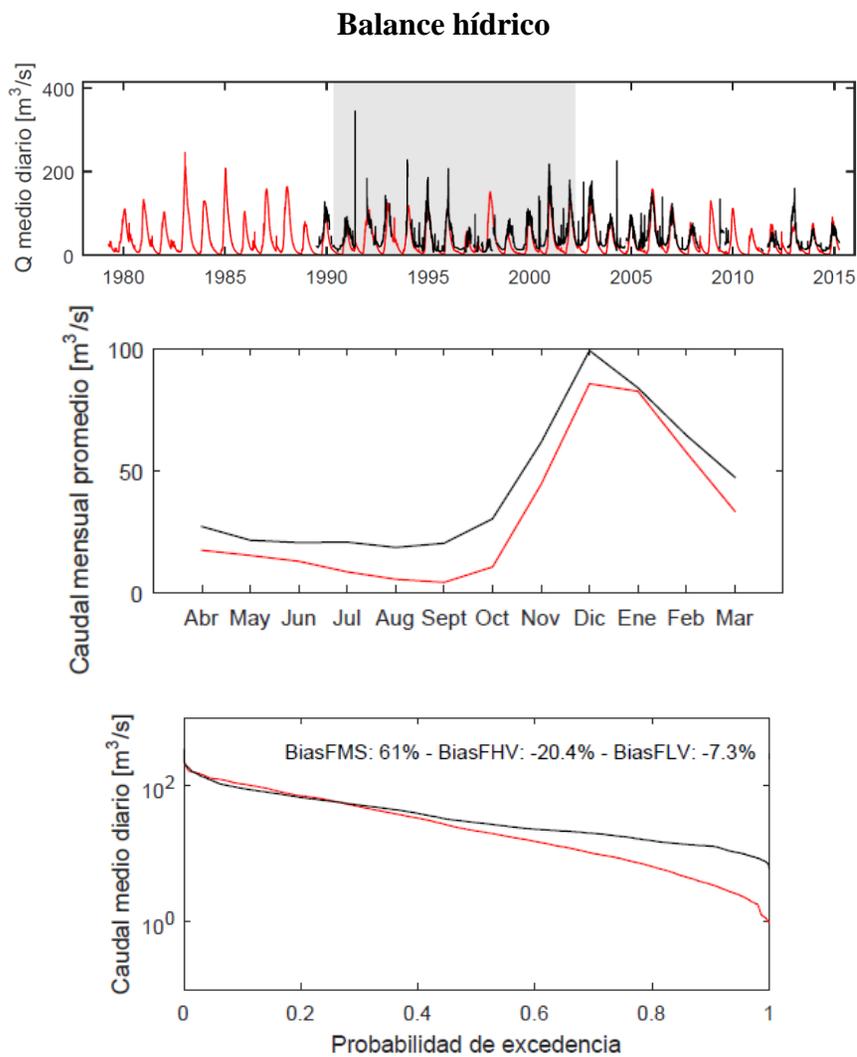


Figura 5-1 Comparación entre los caudales obtenidos en VIC para el Balance Hídrico y para este estudio. En el panel superior se muestra la serie diaria de caudales (en gris el periodo de calibración), en el panel del medio la curva de variación estacional y en el panel inferior la curva de duración.

5.1.2 Variables obtenidas del escalamiento

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los escalamientos de las variables climáticas para los distintos modelos de circulación general asociados a escenarios SSP. Se consideran como valores observados (Obs.) a los valores del producto CR2MET.

5.1.2.1 CDF de las forzantes

En la Figura 5-2 se muestran las funciones de distribución acumuladas (CDF, por sus siglas en inglés) de la precipitación mensual para los 3 GCM, el mayor valor de precipitación mensual de los datos observados en el periodo de estudio es de 809 (mm/mes), valor que se muestra como una línea vertical en el gráfico.

Las diferencias entre las CDF de los GCM en el periodo histórico respecto de las observaciones se encuentran en el rango de -26% a 67% para distintas probabilidades. En general todos los modelos tienen un comportamiento similar para las CDF históricas, siendo el modelo MPI el que presenta el peor desempeño para una probabilidad de excedencia de 0,1, es decir, para meses de baja precipitación. En el Anexo C se presentan las diferencias de todos los modelos para las probabilidades 0,1; 0,3; 0,5; 0,85 y 0,99.

En el caso de las proyecciones (ver Tabla 5-3), hay consenso en que existirá una disminución de las precipitaciones que se proyecta será de un 6,3% según CNRM, un 13% según MIROC y un 36,2% según MPI. En el Anexo C se presenta en detalle las proyecciones para distintas probabilidades.

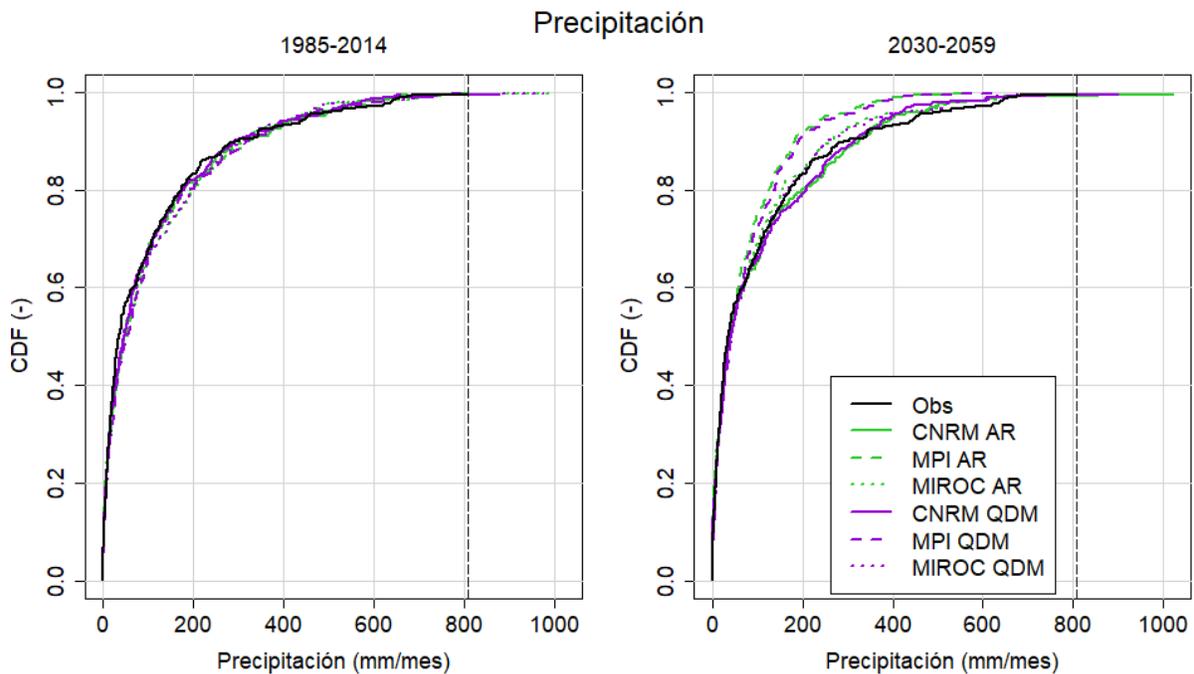


Figura 5-2 CDF de la precipitación mensual obtenida del escalamiento para los GCM. La línea vertical punteada corresponde al valor máximo de precipitación del CR2MET.

En cuanto a la temperatura media (Figura 5-3) no se observan diferencias relevantes entre las distintas curvas para el periodo histórico. En el periodo futuro se observa que todos los

modelos indican una tendencia al aumento de las temperaturas, existiendo diferencias en la magnitud de este aumento según cada modelo. Para un mismo modelo, no existen diferencias claras entre los distintos métodos de escalamiento.

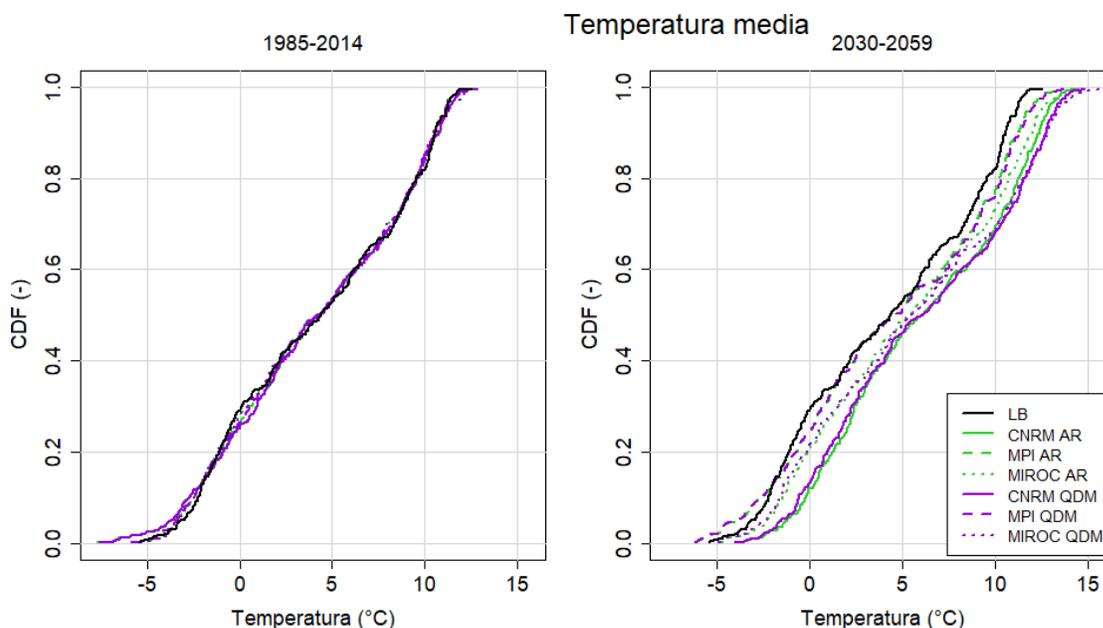


Figura 5-3 Curva de duración para la temperatura media obtenida del escalamiento.

El aumento de temperatura medio del periodo (Tabla 5-3) se proyecta que será de 0,4°C según MIROC, 1,4°C según MPI y casi 2°C según CNRM.

Tabla 5-3 Diferencia entre el promedio del el periodo futuro (2030-2059) y periodo histórico (1985-2014) para los modelos SSP.

Modelo	Método de Escalamiento	Temperatura media [°C]	Temperatura máxima [°C]	Temperatura mínima [°C]	Precipitación [%]
CNRM	Sin escalar	1.95	2.17	1.78	-6.26
	AR	1.93	1.94	1.70	-1.91
	QDM	1.95	2.17	1.78	-1.66
MPI	Sin escalar	0.38	0.71	0.09	-36.23
	AR	0.34	0.68	0.04	-38.11
	QDM	0.38	0.71	0.09	-33.88
MIROC	Sin escalar	1.41	1.96	1.04	-13.00
	AR	1.13	1.25	0.92	-17.08
	QDM	1.41	1.96	1.04	-12.88

Respecto de los métodos de escalamiento, en la tabla anterior se observa que para la temperatura la diferencia se mantiene con el método QDM, mientras que con el método AR disminuye. Por otro lado, para la presentación existen distintos comportamientos de los métodos de escalamiento para todos los modelos.

5.1.2.2 Variación estacional de las forzantes

Para el análisis de los resultados del escalamiento, se elaboraron también curvas de variación estacional (CVE). En la Figura 5-4 se muestran los modelos sin escalar, donde se observa que existe una correcta representación de la variabilidad estacional pero un sesgo en las magnitudes de las variables.

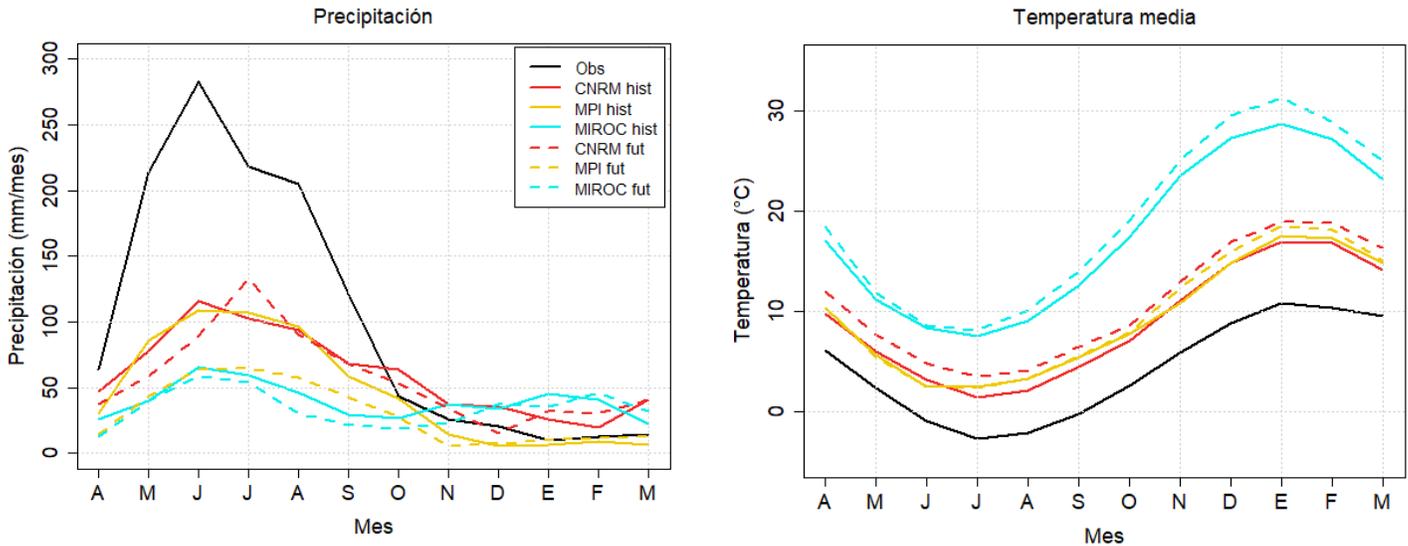


Figura 5-4 Curva de variación estacional para los GCM sin escalar.

Los resultados del escalamiento (Figura 5-5) indican que en el periodo histórico se logra disminuir la diferencia entre las observaciones y los GCM tanto para precipitación como temperatura, generando una superposición de las curvas, existiendo diferencias en los meses de verano (temporada seca) en el caso de la precipitación.

Respecto de las proyecciones, al igual que en la sección anterior, los modelos indican un aumento de la temperatura en el periodo futuro. En el caso de la precipitación, los tres modelos presentan distintos comportamientos en sus CVE futuras, los que se encuentran en concordancia con las disminuciones presentadas en la Tabla 5-3.

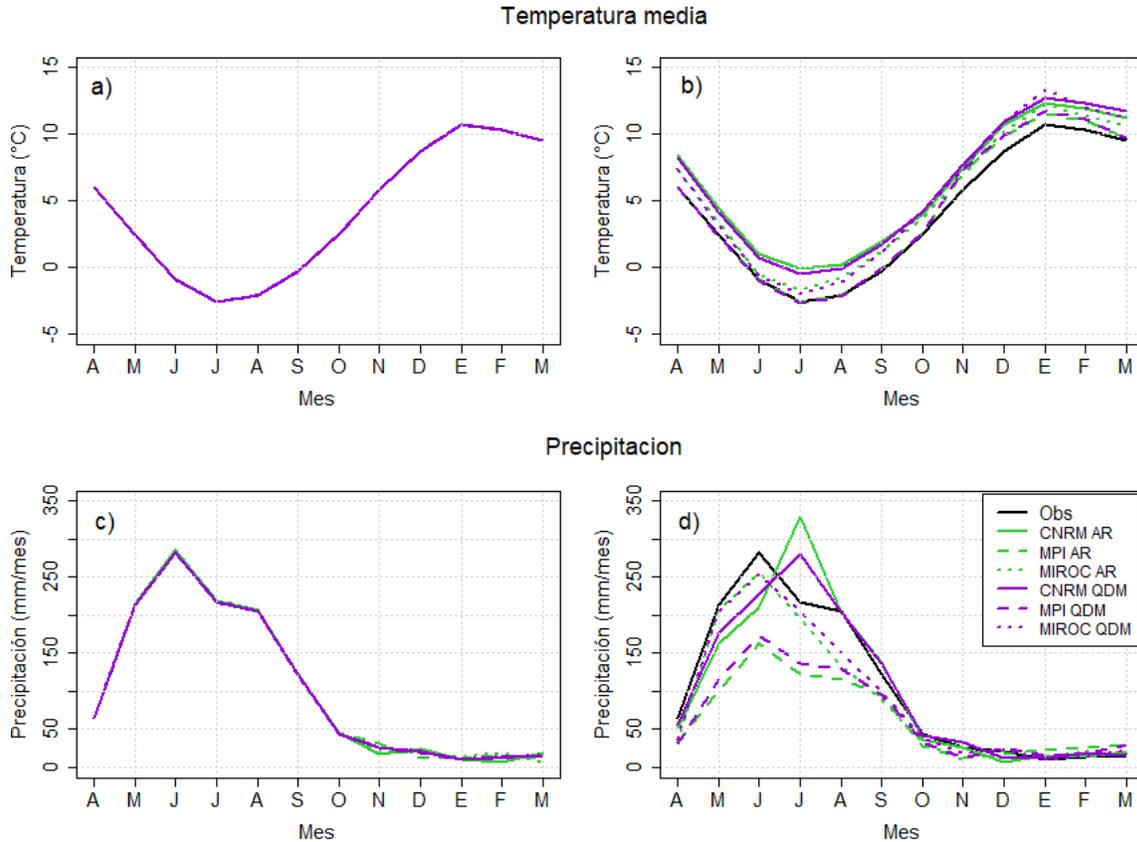


Figura 5-5 Curvas de variación estacional de los GCM escalados donde: a) es la temperatura en el periodo histórico, b) es la temperatura en el periodo futuro, c) es la precipitación en el periodo histórico y d) es la precipitación en el periodo futuro.

5.2 Resultados de las simulaciones

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos de la modelación hidrológica de los caudales. En primer lugar, se comparan los resultados de los modelos del escenario RCP8.5 y del escenario SSP5-8.5 escalados mediante QDM, para analizar la influencia del escenario climático. Luego, se comparan los modelos del escenario SSP5-8.5 utilizando dos métodos de escalamiento (AR y QDM), para analizar los efectos de la elección de la técnica de escalamiento. Finalmente, se realiza una caracterización de la incertidumbre asociada a las distintas combinaciones antes mencionadas, mediante índices hidrológicos. Es importante mencionar que se considera como línea base (LB) a los valores de caudales obtenidos mediante el modelo VIC utilizando como forzantes meteorológicas al producto CR2MET.

5.2.1 Análisis por escenarios climáticos

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la modelación comparando modelos de dos escenarios climáticos distintos, escalados mediante el mismo método (QDM).

5.2.1.1 Caudales según rango

Un primer análisis se realiza comparando caudales según su probabilidad de excedencia (Pexc), en la Figura 5-6 se muestra la curva de duración asociada.

En el periodo histórico, los GCM del escenario RCP8.5 exhiben comportamientos similares entre sí, subestimando los caudales respecto de la línea base. Para los caudales altos ($P_{exc} = 5\%$) presentan una subestimación menor al 10%, mientras que para el rango medio (P_{exc} entre 25 y 75%) la subestimación de los caudales está en torno al 20% y en el caso de los caudales bajos ($P_{exc} = 99\%$) se encuentra en el rango de 23 a 46%. Se observa que a medida que aumenta la probabilidad de excedencia el error de los caudales simulados aumenta así como también aumenta la dispersión de los errores.

Para el escenario SSP5-8.5 en el periodo histórico, los tres GCM analizados muestran distintos comportamientos, siendo el modelo MPI el que presenta un menor ajuste respecto de la línea base subestimando en un 17% los caudales bajos ($P_{exc} = 99\%$), en un 37% los caudales del rango medio (P_{exc} 50 y 75%) y sobreestimando en un 12% los caudales altos ($P_{exc} = 5\%$).

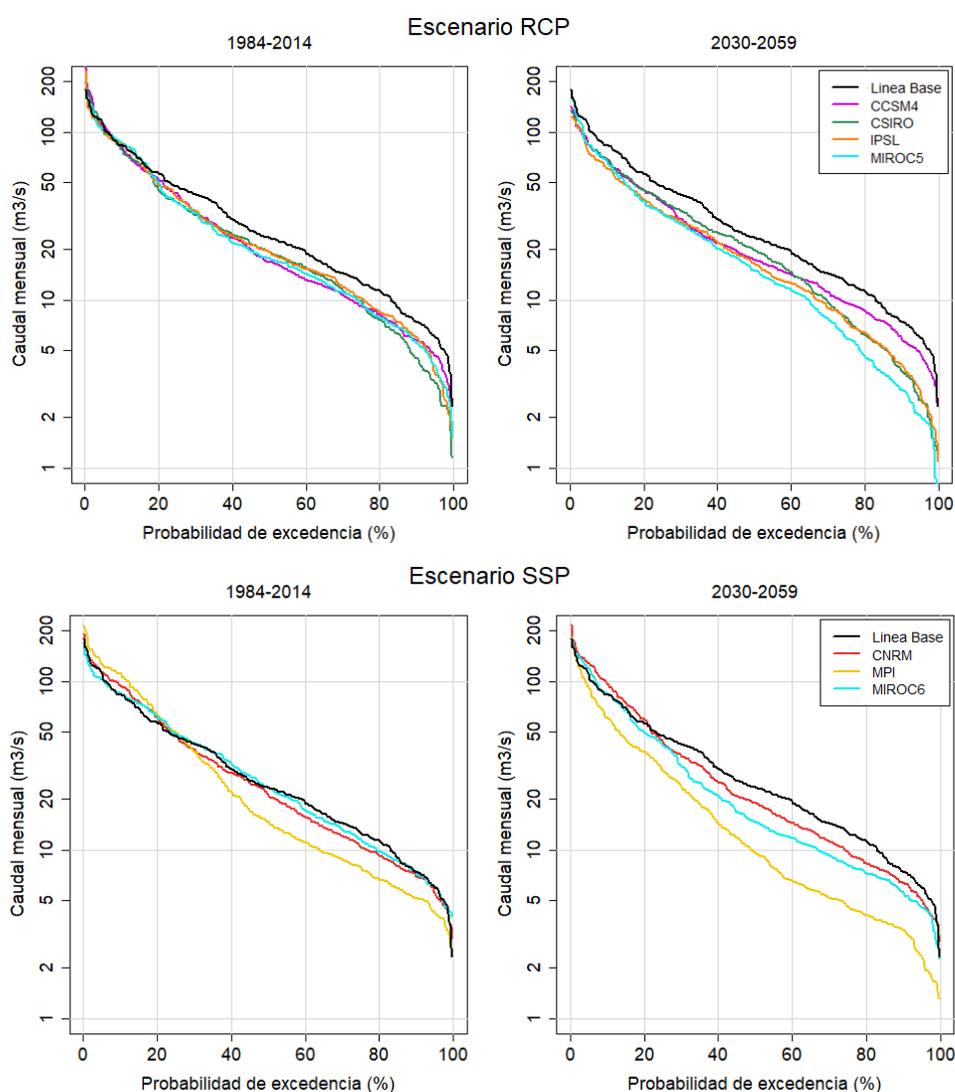


Figura 5-6 Curva de duración de caudales medios mensuales para los modelos de los escenarios RCP y SSP, escalados mediante QDM.

Las proyecciones de los modelos de ambos escenarios muestran una disminución de caudales, siendo el caso más desfavorable el modelo MPI del escenario SSP5-8.5. En la Tabla 5-4 se muestran en detalle las diferencias entre caudales futuros e históricos para distintas probabilidades de excedencia, donde no es posible observar un patrón definido en estas diferencias.

Tabla 5-4 Diferencia entre caudales futuros e históricos según escenario y modelo GCM.

Pexc (%)	Escenario	Modelo	Diferencia entre caudal futuro e histórico
5	RCP8.5	CCSM4	-21%
		CSIRO	-16%
		IPSL	-24%
		MIROC5	-17%
	SSP5-8.5	CNRM	14%
		MIROC6	16%
MPI		-26%	
25	RCP8.5	CCSM4	-12%
		CSIRO	2%
		IPSL	-17%
		MIROC5	-14%
	SSP5-8.5	CNRM	-5%
		MIROC6	-14%
MPI		-40%	
50	RCP8.5	CCSM4	3%
		CSIRO	1%
		IPSL	-16%
		MIROC5	-15%
	SSP5-8.5	CNRM	-12%
		MIROC6	-37%
MPI		-35%	
75	RCP8.5	CCSM4	4%
		CSIRO	-20%
		IPSL	-27%
		MIROC5	-38%
	SSP5-8.5	CNRM	-7%
		MIROC6	-30%
MPI		-42%	
99	RCP8.5	CCSM4	7%
		CSIRO	-38%
		IPSL	-17%
		MIROC5	-64%
	SSP5-8.5	CNRM	2%

Pexc (%)	Escenario	Modelo	Diferencia entre caudal futuro e histórico
		MIROC6	-36%
		MPI	-48%

En la Figura 5-7 se muestran las curvas de duración del modelo MIROC en sus versiones disponibles para ambos escenarios. Se observa que en el periodo histórico MIROC6 presenta un mejor ajuste respecto de la línea base que MIROC5. En cuanto a las diferencias proyectadas para caudales con probabilidad de excedencia mayor a 50%, MIROC6 indica un escenario menos pesimista que MIROC5 (ver Tabla 5-4). Estas diferencias en las proyecciones pueden ser atribuidas tanto a la definición de los escenarios climáticos como a los ajustes realizados al GCM por parte de sus desarrolladores.

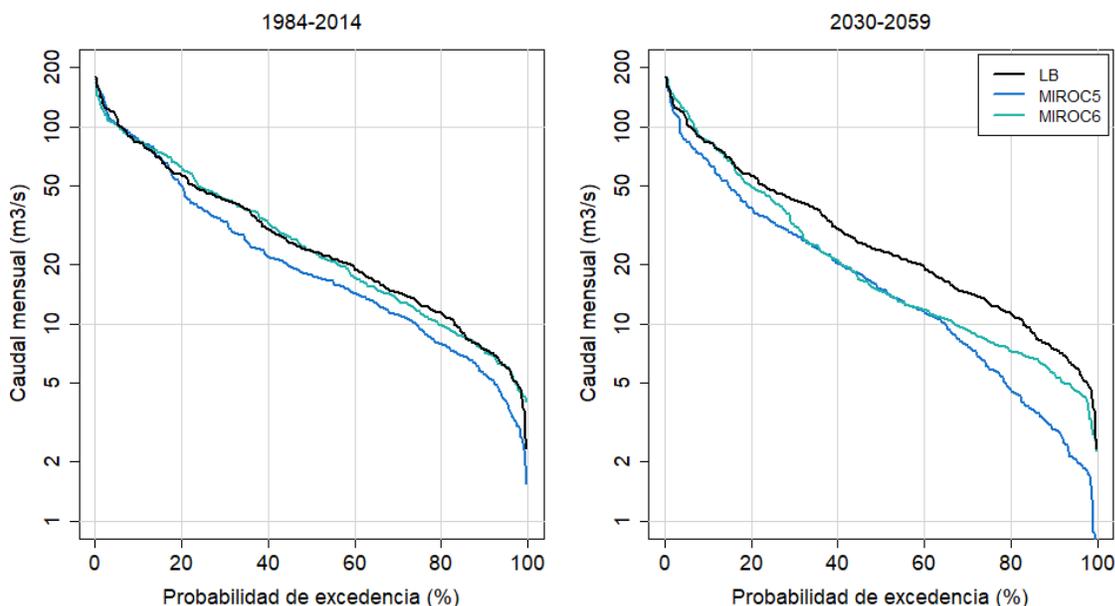


Figura 5-7 Curva de duración de caudales medios mensuales para el modelo MIROC5 (RCP8.5) y MIROC6 (SSP5-8.5).

Para analizar con mayor profundidad las diferencias existentes entre los distintos rangos de caudales, se presentan los valores de índices hidrológicos obtenidos al comparar las curvas de duración de los periodos histórico y futuro (Figura 5-8). Existe un rango importante de valores para cada índice, siendo los que presentan mayores diferencias el FHV (caudales altos) y el FLV (caudales bajos), los que presentan un grado mayor de acuerdo entre modelos son los asociados a caudales medios, mostrando una tendencia hacia reducciones de hasta 20% en FMM y RR.

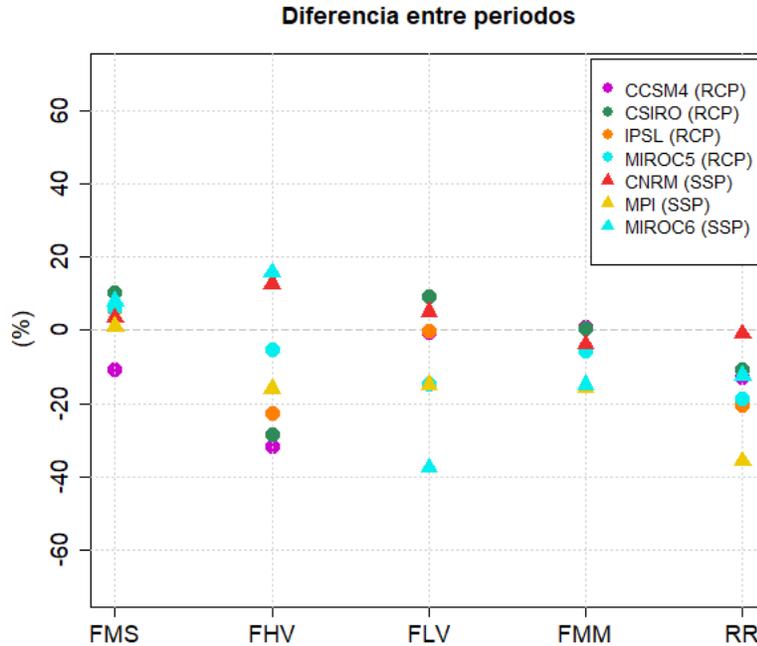


Figura 5-8 Índices hidrológicos del periodo futuro en función del periodo histórico, para ambos escenarios.

5.2.1.2 Estacionalidad

La Figura 5-9 muestra las curvas de variación estacional de ambos escenarios. En el periodo histórico los modelos RCP tienden a tener sus mayores caudales entre los meses de octubre y noviembre mientras que los modelos SSP los tienen entre noviembre y diciembre, coincidiendo con los mayores caudales del caso base. Se observa que los modelos RCP poseen un mejor ajuste que los modelos SSP entre abril y agosto, logrando reproducir el alza de caudales debido a las lluvias invernales.

En el caso del periodo futuro, en ambos escenarios existe un cambio en la temporalidad de los caudales máximos mensuales, trasladándose de noviembre a octubre en el caso de 3 de los 4 modelos RCP y de diciembre a noviembre en el caso de los modelos SSP. Los modelos RCP proyectan una baja importante de los caudales, especialmente entre septiembre y marzo, mientras que entre los modelos SSP existen distintas respuestas para los mismos meses. En los meses de invierno, la mayoría de los modelos RCP mantiene la forma de su curva, bajando sus valores. La única excepción es el modelo CSIRO (RCP) que presenta un aumento del caudal dicha temporada.

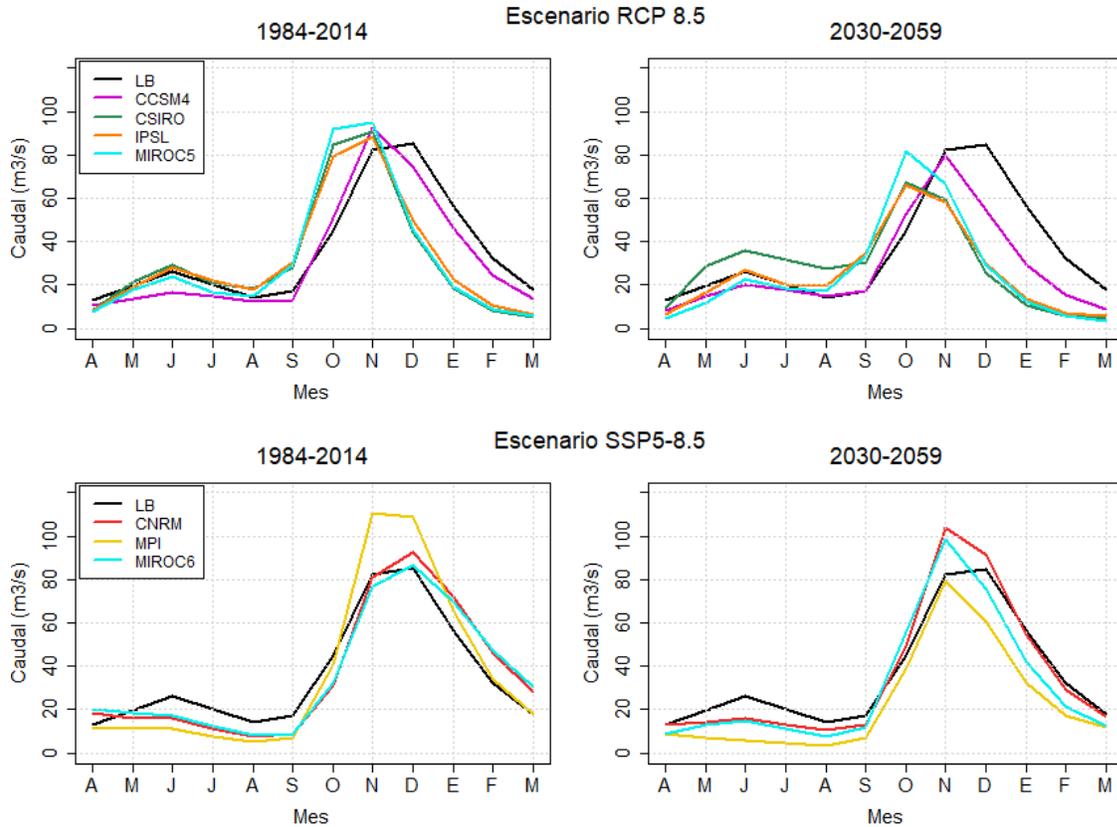


Figura 5-9 Curva de variación estacional de caudales para los escenarios RCP y SSP.

En la Figura 5-10 se presentan las diferencias mensuales proyectadas por los GCM y en la Tabla 5-5 las diferencias para todo el periodo, donde es posible observar que para el escenario RCP:

- En los meses de abril, mayo y junio no existe acuerdo entre los modelos respecto a un aumento o disminución de los caudales.
- En los meses de julio, agosto y septiembre los modelos proyectan aumentos en un rango de 10 a 50%.
- Todos los modelos señalan una disminución de caudales entre octubre y marzo de hasta un 45%.
- Los modelos de este escenario proyectan una disminución de caudales para todo el periodo de entre 11 a 21%.

El modelo CSIRO es el que proyecta los mayores cambios, por una parte un aumento importante de caudales de abril a agosto, y por otra una disminución de octubre a marzo, al observar el comportamiento de este modelo en la Figura 5-9 se observa que existe un cambio en el régimen hidrológico de la cuenca ganando mayor importancia la componente pluvial.

Por otra parte, en el escenario SSP se observa que el modelo MPI proyecta disminuciones de caudal para todo el año, resultado esperable debido a que es el modelo que proyecta las mayores disminuciones de precipitaciones (Figura 5-5). El modelo CNRM presenta aumentos de caudal entre julio y noviembre, lo que es representado en la CVE como un

cambio en la temporalidad de los caudales máximos, los que se adelantan de diciembre a noviembre, además, se observa una disminución de caudales entre diciembre y junio, lo que finalmente se traduce en una disminución de un 1% para todo el periodo. Finalmente, el modelo MIROC6 indica disminución en todos los meses exceptuando septiembre, octubre y noviembre, teniendo una disminución de 13% para el periodo completo. En resumen, los modelos del escenario SSP proyectan una reducción de los caudales de entre un 1 a un 36%

Tabla 5-5 Diferencia entre el caudal medio mensual promedio del periodo futuro e histórico.

Escenario	Modelo	Diferencia entre periodo futuro e histórico
RCP	CCSM4	-13%
	CSIRO	-11%
	IPSL	-21%
	MIROC5	-19%
SSP	CNRM	-1%
	MPI	-36%
	MIROC6	-13%

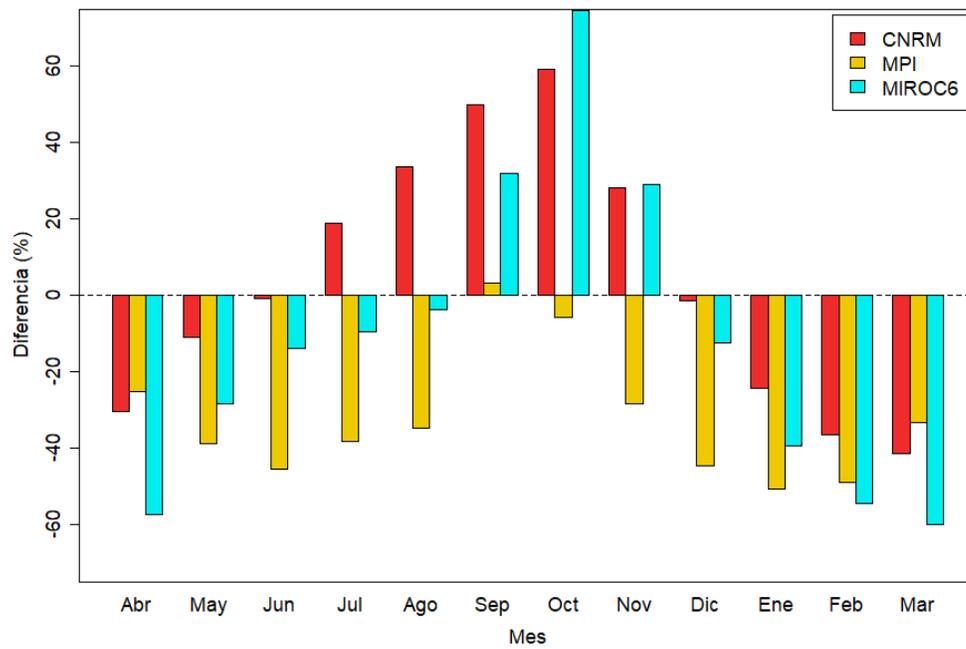
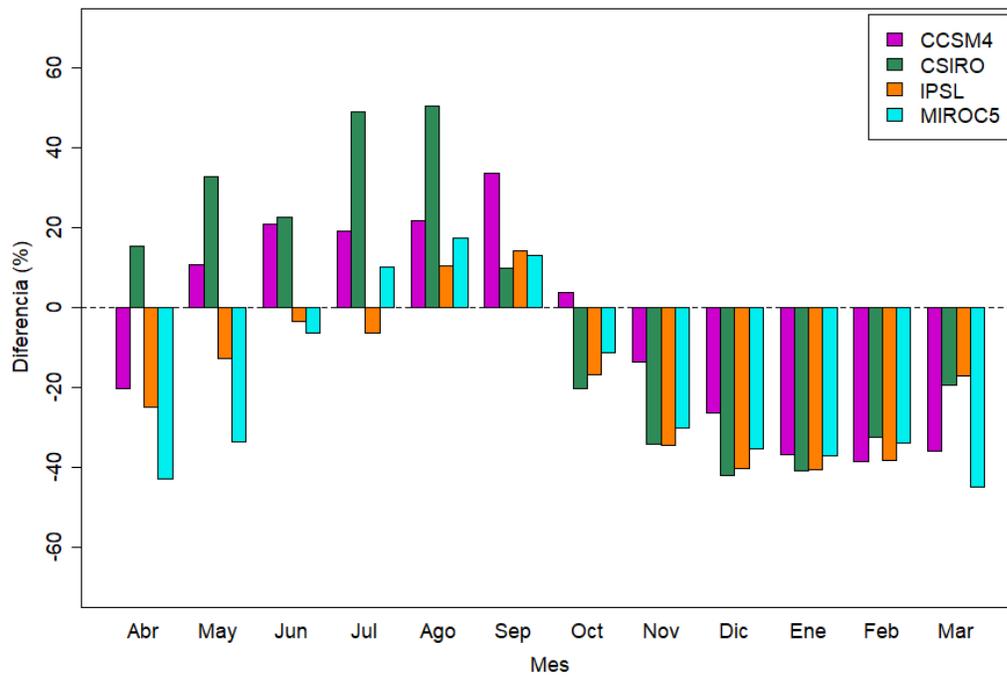


Figura 5-10 Diferencia entre los caudales medios mensuales históricos y futuros. En la parte superior se muestra el escenario RCP y en la parte inferior el escenario SSP.

En la Figura 5-11 se muestra el coeficiente de estacionalidad (XII) asociado a los GCM de ambos escenarios en el periodo histórico y futuro, donde es posible observar que, para el escenario RCP, existe un cambio importante en la estacionalidad para el periodo futuro, siendo los valores más cercanos a 1 una indicación de que el caudal que escurre en invierno y verano serán más parecidos. En el escenario SSP no se observan diferencias tan marcadas y en general sus valores son menores a los del escenario RCP.

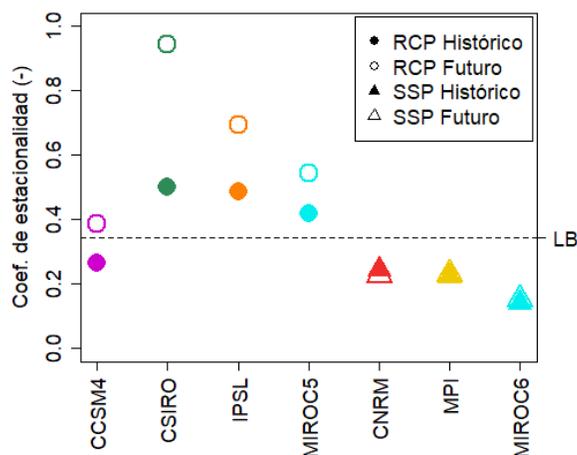


Figura 5-11 Coeficiente de estacionalidad para ambos escenarios en el periodo histórico y el periodo futuro.

5.2.2 Análisis por método de escalamiento

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de la modelación comparando modelos de un mismo escenario climático escalados mediante dos métodos distintos: Asynchronous Regression (AR) y Quantile Delta Mapping (QDM).

5.2.2.1 Caudales según rango

Para realizar una comparación de caudales según su probabilidad de excedencia (P_{exc}), en la Figura 5-12 se muestra la curva de duración asociada y en la Tabla 5-6 se detalla la diferencia para distintas probabilidades de excedencia.

Para el periodo 2030-2059 se observa una disminución de los caudales en todo el rango de probabilidades de excedencia. En el modelo CNRM esta disminución se encuentra en el rango de 5 a 10%.

El modelo MIROC proyecta disminuciones de entre un 14 y 20% para una $P_{exc} = 25\%$ según el método de escalamiento, en los caudales con probabilidades de excedencia mayores al 50% se proyecta que la disminución tendrá valores cercanos al 35% y en los caudales altos ($P_{exc} = 5\%$) indica un aumento de 12 o 16% según AR o QDM respectivamente.

En el periodo histórico se observa que la curva de los caudales simulados del modelo MPI no reproduce la forma de la curva del caso base y en el periodo futuro existe una disminución en el rango completo de caudales, con valores cercanos al 40%.

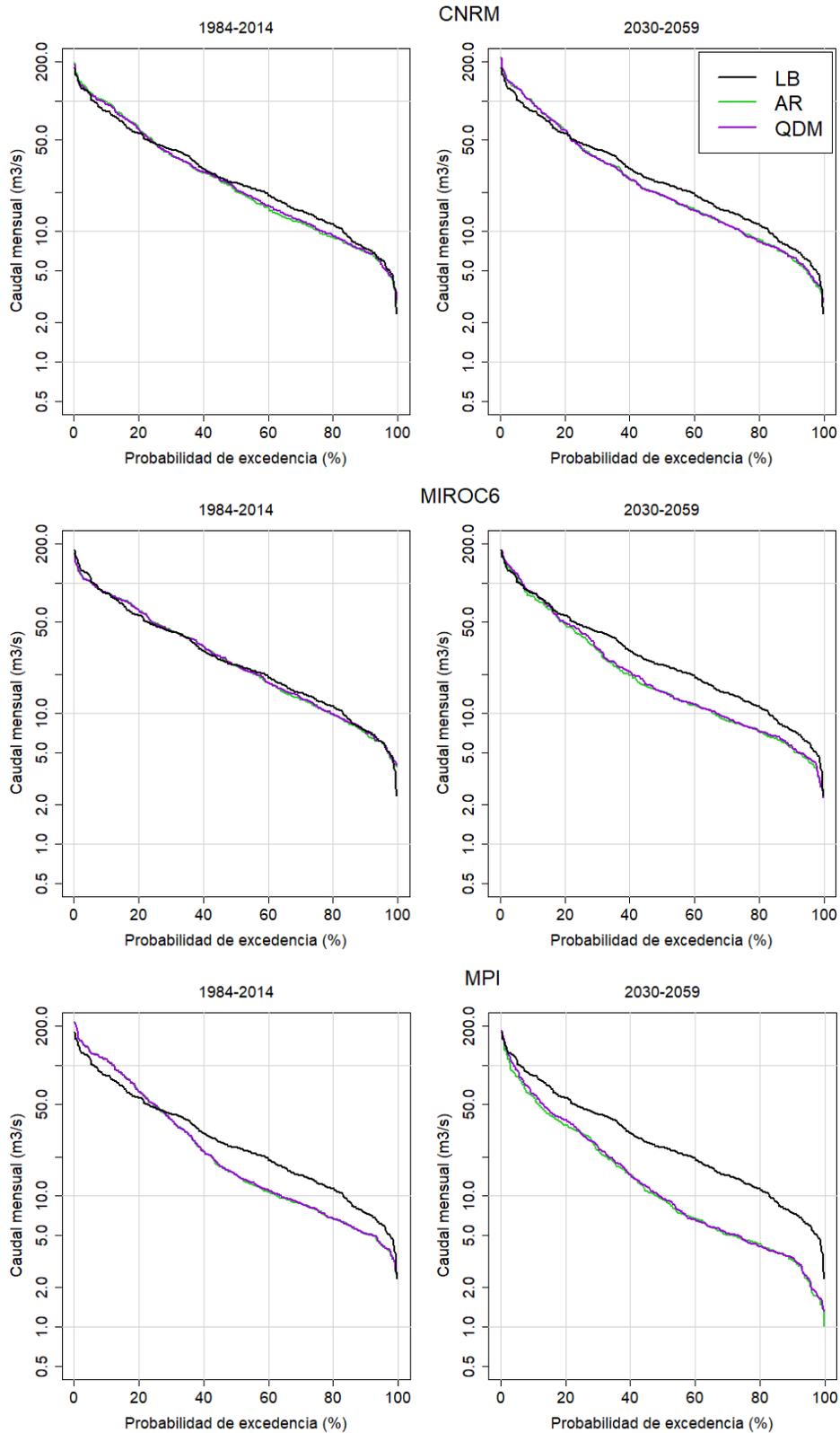


Figura 5-12 Curva de duración de caudales medios mensuales para los GCM del escenario SSP con dos métodos de escalamiento cada uno.

Tabla 5-6 Diferencia entre caudales futuros e históricos según modelo GCM y método de escalamiento.

Pexc (%)	Modelo	Escalamiento	Diferencia entre caudal futuro e histórico
5	CNRM	AR	9%
		QDM	14%
	MIROC	AR	12%
		QDM	16%
	MPI	AR	-37%
		QDM	-26%
25	CNRM	AR	-9%
		QDM	-5%
	MIROC	AR	-20%
		QDM	-14%
	MPI	AR	-39%
		QDM	-40%
50	CNRM	AR	-8%
		QDM	-12%
	MIROC	AR	-36%
		QDM	-37%
	MPI	AR	-36%
		QDM	-35%
75	CNRM	AR	-5%
		QDM	-7%
	MIROC	AR	-28%
		QDM	-30%
	MPI	AR	-41%
		QDM	-42%
99	CNRM	AR	-7%
		QDM	2%
	MIROC	AR	-31%
		QDM	-36%
	MPI	AR	-53%
		QDM	-48%

En la tabla anterior es posible observar que el método de escalamiento tiene una menor influencia en la diferencia proyectada que la elección del modelo. Para reafirmar esta idea se presenta en la Tabla 5-7 las diferencias entre los caudales de un mismo periodo obtenidos con ambos métodos de escalamiento, las cuales son menores al 1% en el periodo histórico y menores al 7% en el periodo futuro.

Tabla 5-7 Diferencia entre el caudal medio mensual según AR y QDM para el periodo histórico y futuro.

Diferencia AR-QDM		
Modelo	Histórico	Futuro
CNRM	0.9%	0.4%
MIROC6	-0.1%	-4.8%
MPI	0.0%	-6.8%

En la Figura 5-13 se muestran los índices hidrológicos de los tres modelos. Nuevamente, la elección del modelo climático tiene mayor impacto que la elección del método de escalamiento. Los modelos indican un aumento de hasta 10% en la pendiente de la CD, lo que indica mayor rapidez en la evacuación de escorrentía; además, se proyecta una disminución de hasta -20% en la mediana de los caudales medios mensuales y una disminución de hasta -40% del coeficiente de escorrentía. En los caudales altos, existen dos modelos que indican aumentos menores al 20% y uno indica una reducción cercana al -20%; en cuanto a los caudales bajos el modelo CNRM no muestra cambios, mientras que los modelos MPI y MIROC presentan grandes diferencias entre los métodos de escalamiento, por lo que los índices hidrológicos no muestran resultados concluyentes sobre los extremos de la curva de duración de caudales medios mensuales.

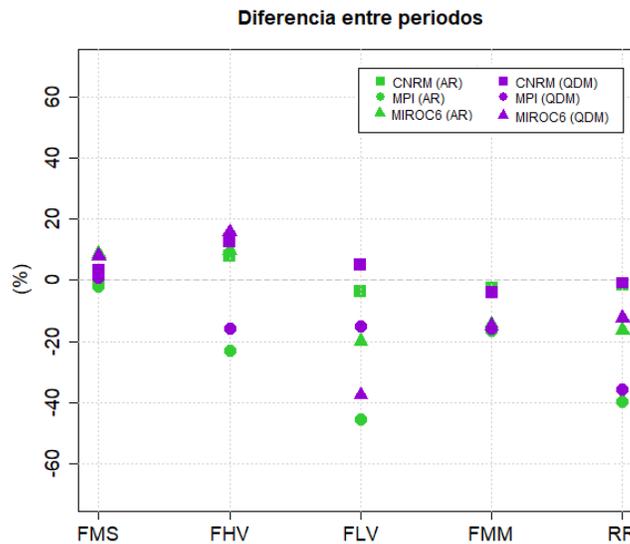


Figura 5-13 Cambios proyectados en índices hidrológicos para los distintos métodos de escalamiento aplicados a tres GCMs y el mismo escenario (SSP5-8.5).

5.2.2.2 Estacionalidad

Para analizar cambios en la estacionalidad según cada método de escalamiento, se construyeron curvas de variación estacional (Figura 5-14). En el periodo histórico, es posible observar que las diferencias son atribuibles principalmente al modelo más que al método de escalamiento.

Analizando cada modelo por separado, se observa que el modelo MPI muestra una fuerte disminución de los caudales en el periodo primaveral, además de cambios en la forma de la

curva, mientras que los modelos CNRM y MIROC6 muestran un aumento de los caudales de primavera, pero disminución en el resto de la curva.

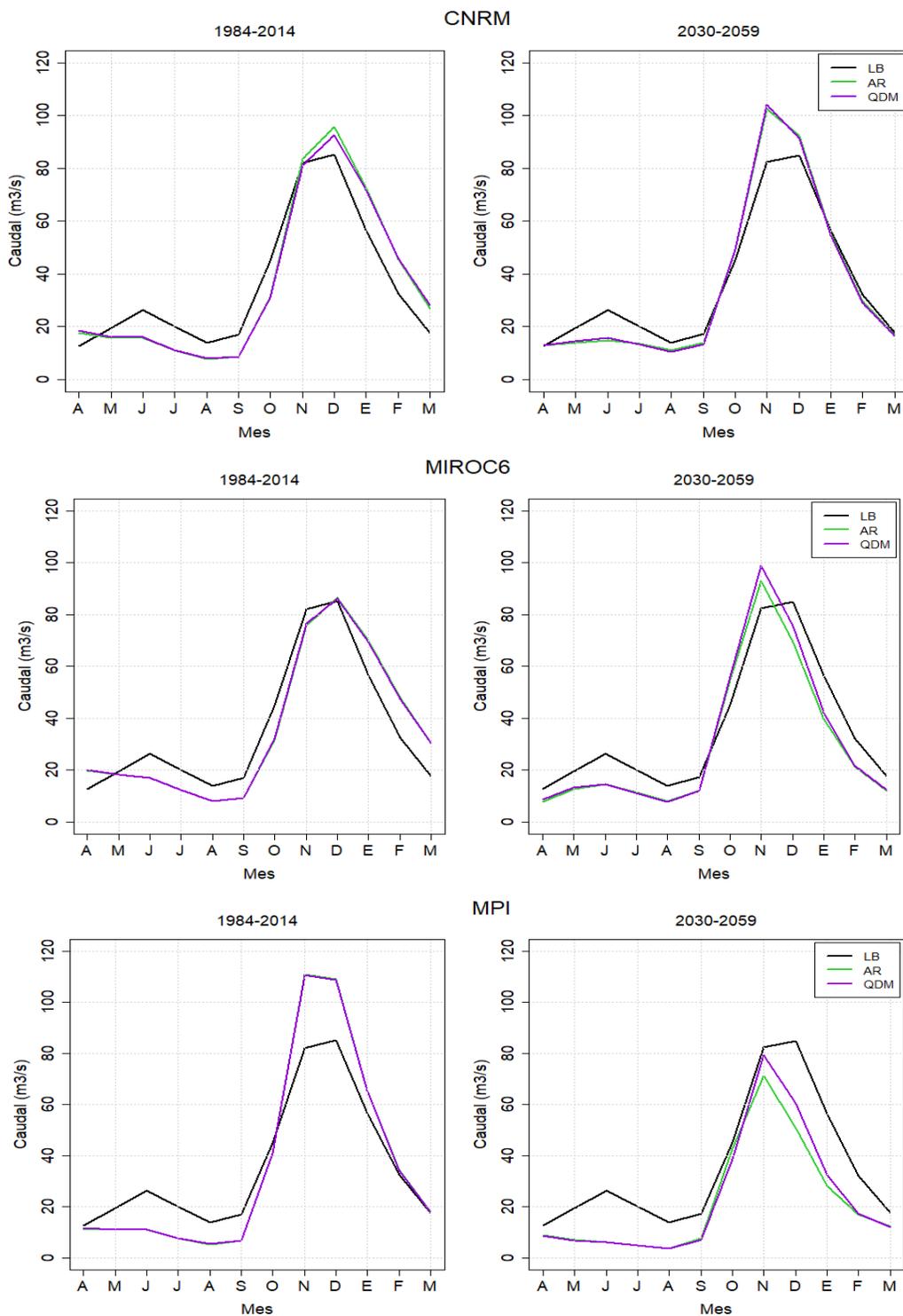


Figura 5-14 Curva de variación estacional de caudales para los GCM del escenario SSP con dos métodos de escalamiento.

Las diferencias porcentuales entre los caudales históricos y futuros muestran nuevamente leves diferencias en las proyecciones según el método de escalamiento, tanto si se consideran las diferencias a nivel mensual (Figura 5-15) como a nivel de todo el periodo (Tabla 5-8). El análisis de las diferencias estacionales por cada modelo fue realizado en la sección 5.2.1.2.

Tabla 5-8 Diferencia entre el caudal medio mensual promedio del periodo futuro e histórico.

Modelo	Método de escalamiento	Diferencia entre periodo futuro e histórico (%)
CNRM	AR	-1.5
	QDM	-1.0
MIROC6	AR	-16.5
	QDM	-12.5
MPI	AR	-39.9
	QDM	-35.8

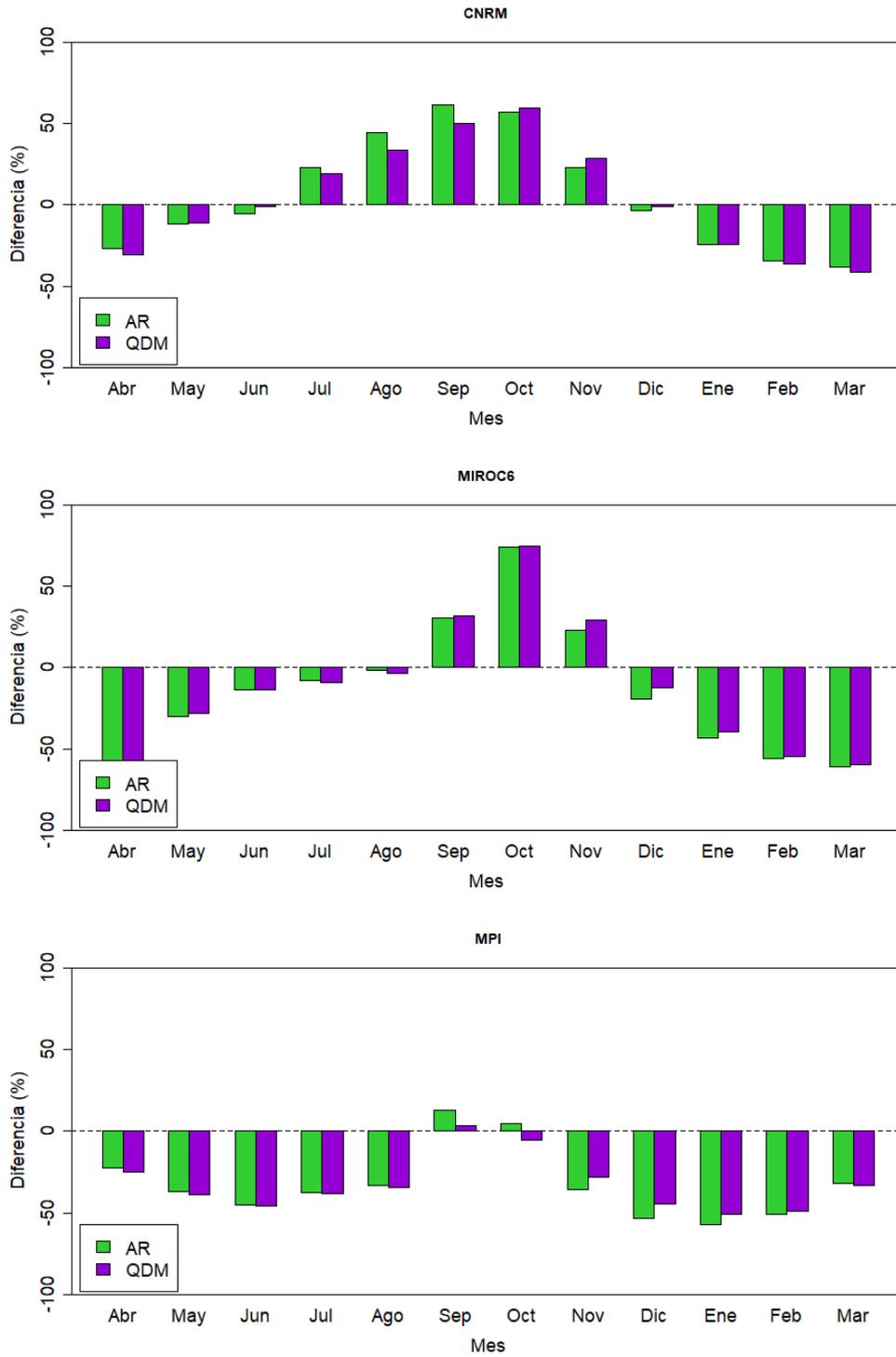


Figura 5-15 Diferencia de caudales entre el periodo histórico y futuro para los modelos SSP según los métodos de escalamiento.

Al analizar el coeficiente de estacionalidad (Figura 5-16), se observa que los tres modelos difieren del caso base y que los resultados para los métodos AR y QDM son similares en cada modelo; además, dos modelos indican un aumento en los valores del coeficiente para el periodo futuro y uno indica disminución.

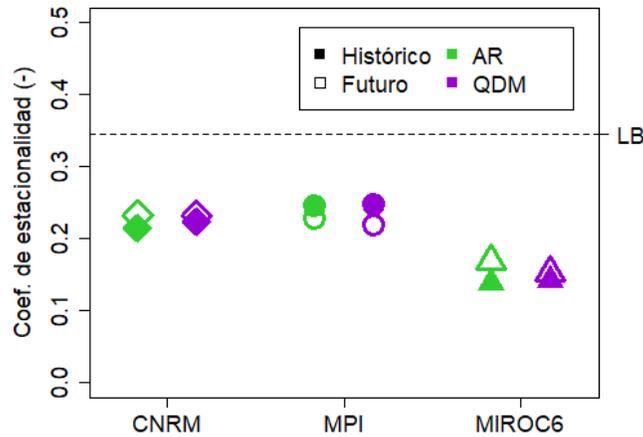


Figura 5-16 Coeficiente de estacionalidad para los GCM del escenario SSP con sus métodos de escalamiento.

5.2.3 Caracterización de Incertidumbre

5.2.3.1 Incertidumbre asociada a la incorporación de escenarios climáticos

A continuación, se muestran los caudales proyectados para el periodo futuro agrupando los GCM según escenario climático. La Figura 5-17 corresponde a la curva de variación estacional, donde se observan las diferencias en la estacionalidad entre ambos escenarios, donde el RCP8.5 proyecta que el peak de caudales se producirá hasta un mes antes de lo señalado por el escenario SSP5-8.5.

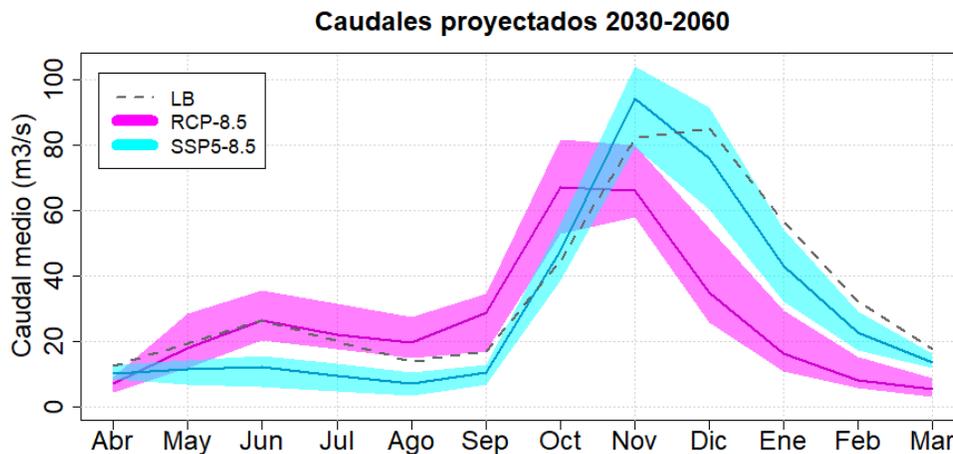


Figura 5-17 Curva de variación estacional de los caudales proyectados según escenario climático. La línea continua indica el valor medio de los modelos de cada escenario, mientras que el área coloreada representa el intervalo de valores máximos y mínimos.

Al analizar la curva de duración (Figura 5-18) se observa que en ambos escenarios la dispersión que aumenta junto con la probabilidad de excedencia y que el rango de caudales es mayor para el escenario SSP5-8.5.

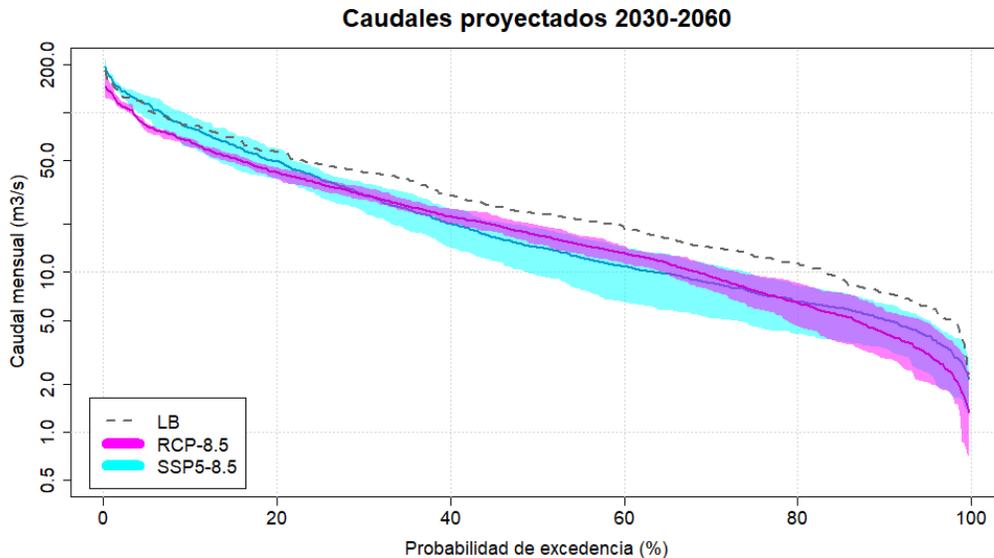


Figura 5-18 Curva de duración de los caudales medios mensuales proyectados según escenario climático. La línea continua indica el valor medio de los modelos de cada escenario, mientras que el área coloreada representa el intervalo de valores máximos y mínimos.

Si siguiendo con la metodología presentada en la sección 4.5, en la Figura 5-19 se muestran los valores de desviación estándar entre índices hidrológicos obtenidos para cada caso, de donde se desprende que, en el escenario RCP, para 4 índices hidrológicos (FHV, FLV, FMM y RR) se tiene una menor dispersión que en el escenario SSP, lo que indica que existe un mayor nivel de acuerdo entre los modelos del escenario RCP; además, en la mayoría de los casos, al agrupar ambos escenarios, se obtiene una desviación estándar con valores “intermedios” entre ambos escenarios por separado, exceptuando FHV y C_{est} donde se tiene que la desviación aumenta al agrupar los escenarios. En ninguno de los índices la desviación estándar disminuye al agrupar todos los modelos de ambos escenarios.

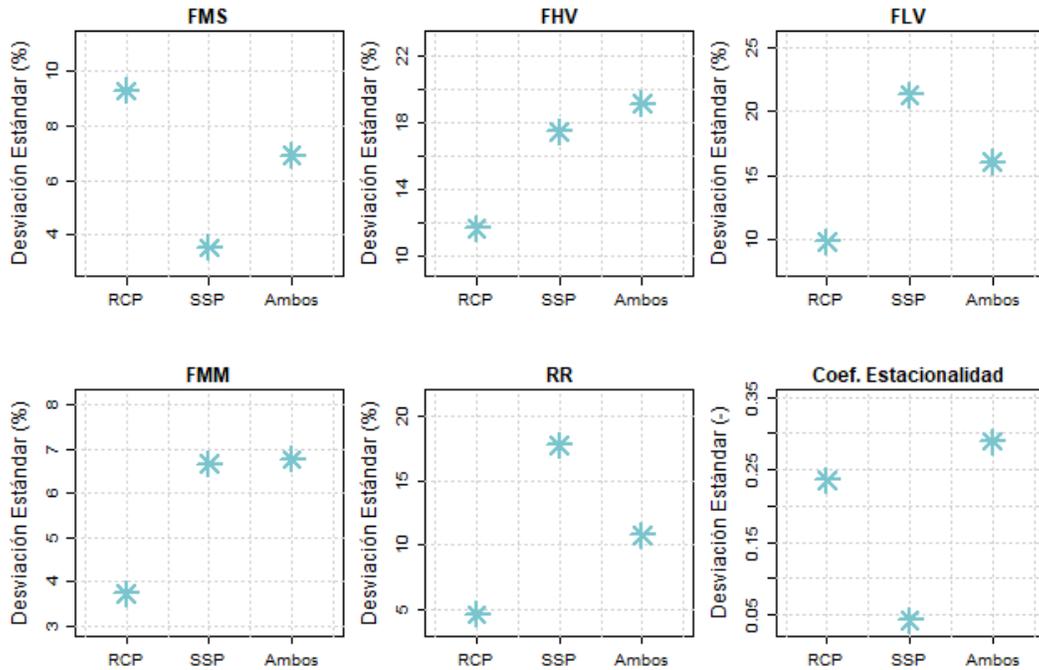


Figura 5-19 Desviación estándar de los índices hidrológicos calculados para cada escenario climático por separado y agrupados.

5.2.3.2 Incertidumbre asociada a la incorporación de métodos de escalamiento

En la Figura 5-20 se muestra la curva de variación estacional para el conjunto de modelos del escenario SSP escalados mediante AR y QDM, donde se observa que no existen diferencias en la estacionalidad de ambos grupos y existen leves diferencias en el rango de caudales entre septiembre y marzo como se evidenció en la Tabla 5-6.

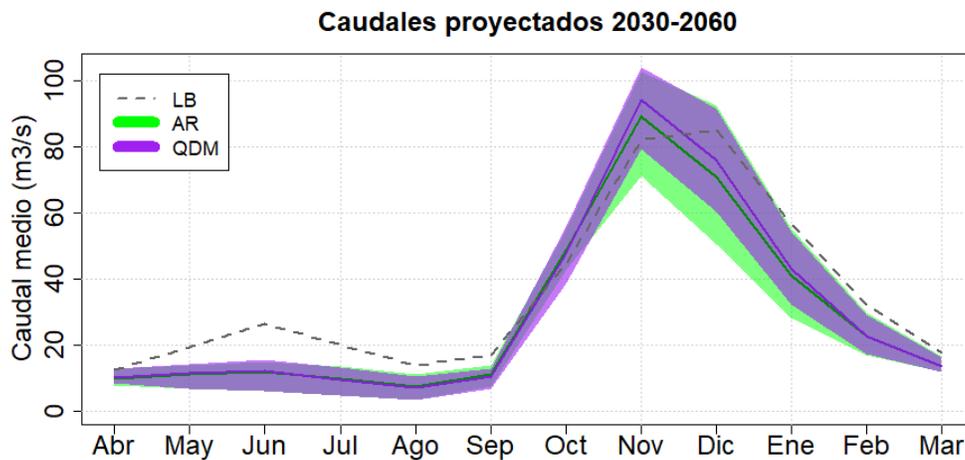


Figura 5-20 Curva de variación estacional para los caudales proyectados según método de escalamiento. La línea continua indica el valor medio de los modelos de cada método, mientras que el área coloreada representa el intervalo de valores máximos y mínimos.

En el caso de la curva de duración, las diferencias son aún más imperceptibles de manera gráfica (Figura 5-21).

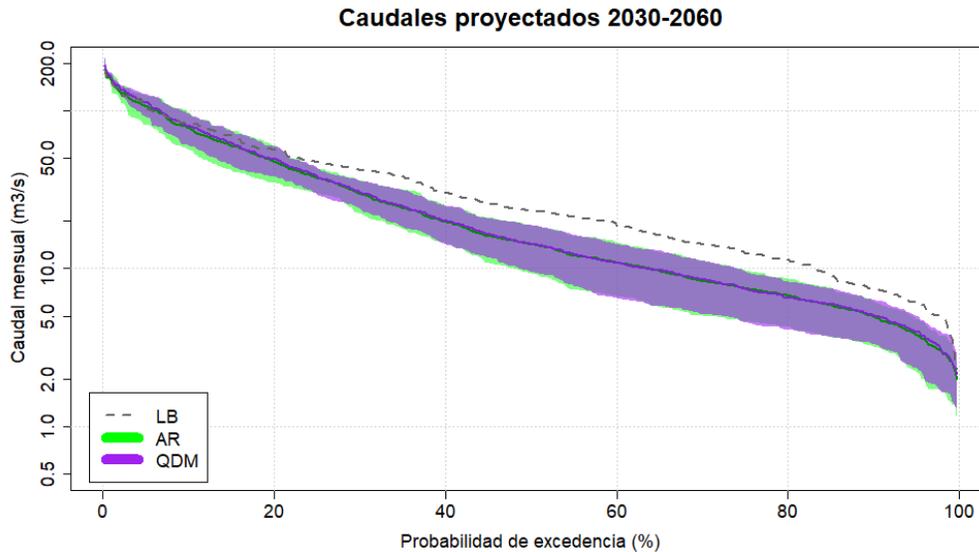


Figura 5-21 Curva duración para los caudales medios mensuales proyectados según método de escalamiento. La línea continua indica el valor medio de los modelos de cada método, mientras que el área coloreada representa el intervalo de valores máximos y mínimos.

Al analizar la desviación estándar de los valores de índices hidrológicos para cada método de escalamiento (Figura 5-22) se muestra que a diferencia de la inclusión de más escenarios, en este caso la incorporación de ambos métodos de escalamiento genera una reducción de la desviación estándar en la mayoría de los índices, posiblemente porque con ambos métodos se obtienen valores similares para cada modelo, lo que genera que en la muestra existan más valores similares entre sí.

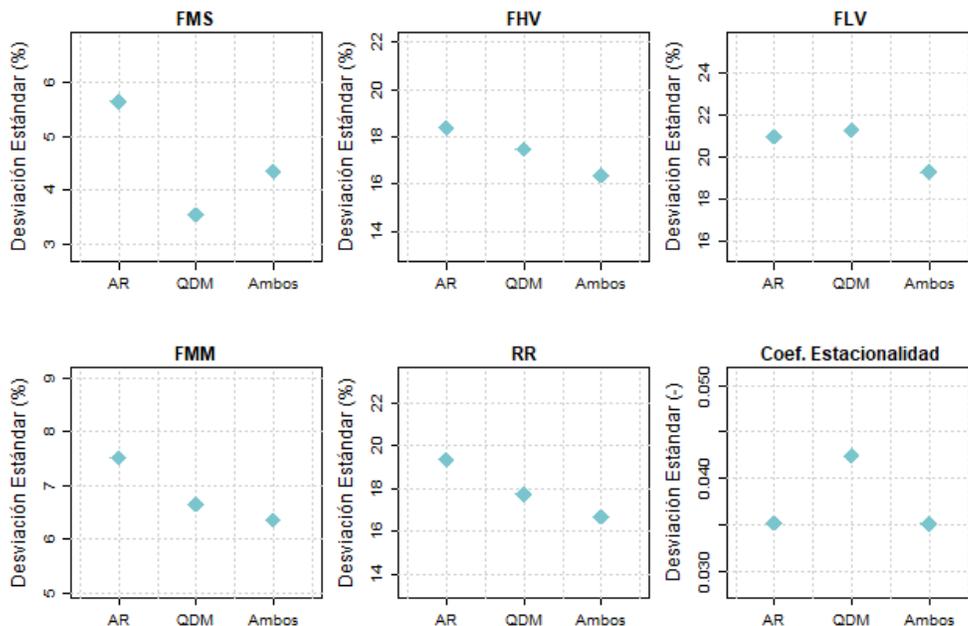


Figura 5-22 Desviación estándar de los índices hidrológicos calculados para cada método de escalamiento por separado y agrupados.

5.2.3.3 Incertidumbre asociada a la incorporación de modelos

Además de analizar el efecto de incluir distintos escenarios climáticos y métodos de escalamiento por separado, se consideró relevante conocer la incertidumbre asociada a la cantidad de set de proyecciones consideradas. El ensemble obtenido con los caudales de todos los escenarios y métodos de escalamiento (Figura 5-23) muestra que existe una disminución en los caudales de verano respecto del caso base, mientras que para el resto de los meses el rango obtenido no muestra cambios significativos.

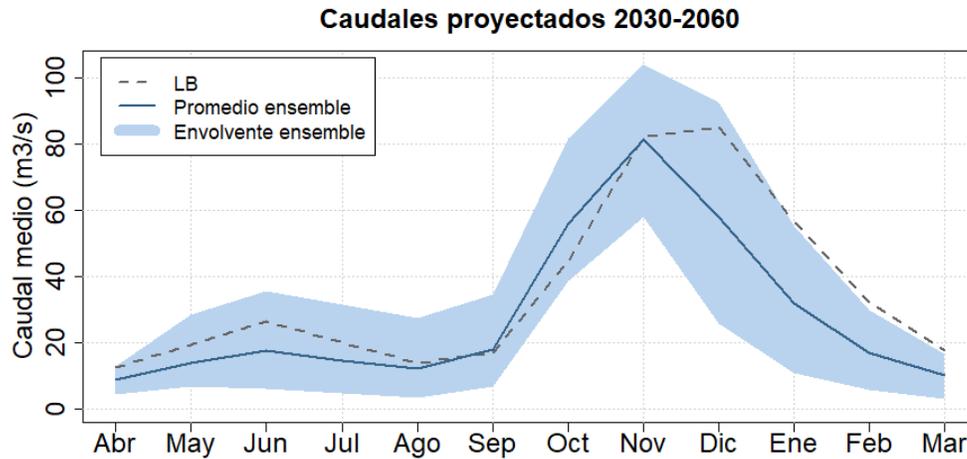


Figura 5-23 Curva de variación estacional para los caudales proyectados según todos los modelos utilizados.

En el caso de la curva de duración (Figura 5-24) se observa que para todos los modelos los caudales con probabilidad de excedencia mayor a 20% son menores que para el caso base.

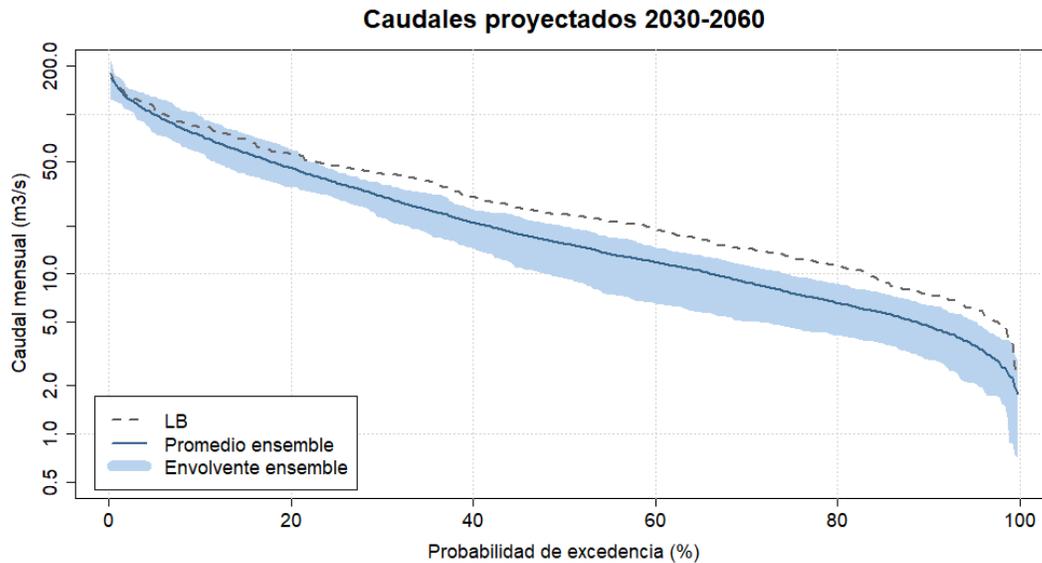


Figura 5-24 Curva de duración para los caudales medios mensuales proyectados según todos los modelos utilizados.

Finalmente, para realizar un último análisis de la incertidumbre, se calculó la desviación estándar de los índices hidrológicos para todas las combinaciones posibles a partir del universo de modelos disponible, creando subgrupos aleatorios con distintas cantidades de miembros. Con ello se obtienen los boxplots de la Figura 5-25.

En general, todos los índices hidrológicos poseen un comportamiento similar teniendo una mayor amplitud en los valores de desviación estándar al utilizar grupos más pequeños de modelos. Por una parte, se observa que no ocurren grandes variaciones en el valor medio de la desviación estándar al aumentar el número de modelos considerados. Pero, por otro lado, se observa que a partir de los grupos de 6 modelos los valores comienzan a estabilizarse para la mayoría de los índices.

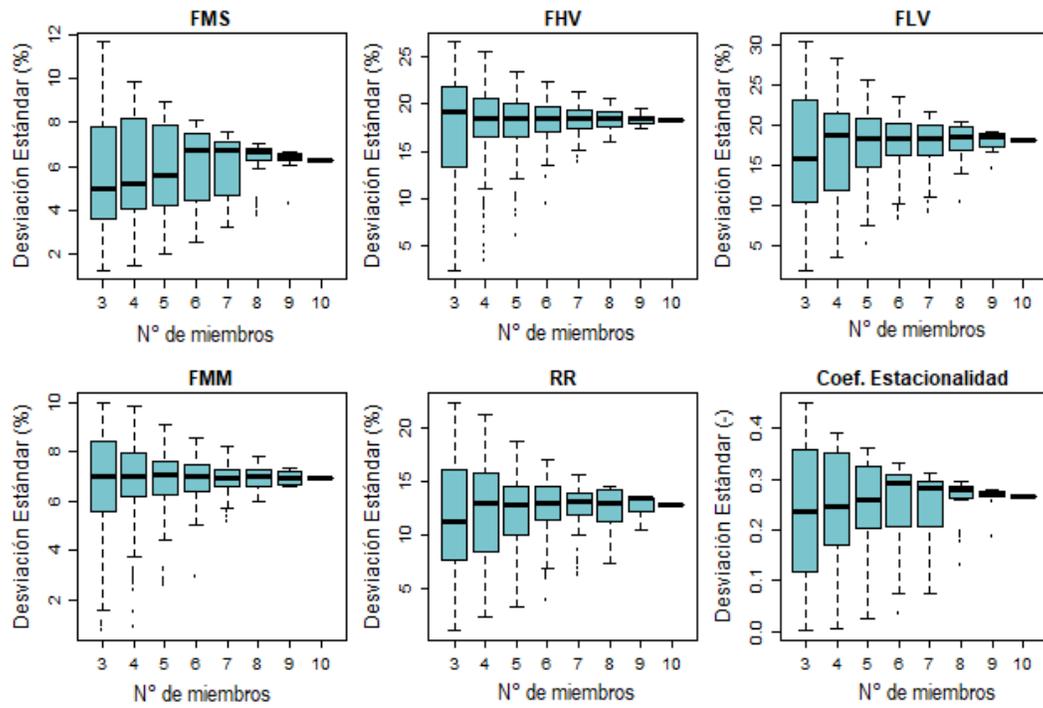


Figura 5-25 Boxplot de los valores de desviación estándar de los índices hidrológicos calculados al considerar distinta cantidad de GCM.

6 CONCLUSIONES

En CAMELS-CL, se indica que el área glaciar de la cuenca es de alrededor de 8%. Dado que VIC no incluye un módulo glaciar, sería interesante realizar este mismo ejercicio con una metodología que sí incluya la parte glaciar, debido a la fragilidad de estas masas de hielo frente al cambio climático y a su importancia como reserva de agua dulce. Otro análisis que se recomienda para este trabajo es considerar las diferencias entre resultados a nivel espacial, en la escala de los píxeles del modelo VIC.

Respecto del procesamiento de datos, en la primera parte del capítulo 5 se presentaron los resultados asociados al caso base utilizado y al escalamiento de las forzantes meteorológicas. A partir de ello, se concluye que la simulación del caso base está dentro de los valores de NSE y KGE esperables al comparar con los valores de la calibración realizada en el BH, las diferencias encontradas entre los índices hidrológicos de la simulación del BH con forzantes del CR2MET y la realizada pueden deberse a que los valores presentados en el BH corresponden al periodo de calibración, mientras que los valores calculados en este estudio corresponden a todo el periodo analizado. Otra posible explicación es la versión de CR2MET utilizada, dado que la versión del producto de precipitación utilizada en el BH ya no se encontraba disponible en línea al realizar la recopilación de datos para esta memoria. Esta diferencia en las series de precipitación utilizadas para realizar la simulación base y el escalamiento de los GCM es una fuente de incertidumbre que debe ser analizada con detención si se desea ocupar los análisis realizados respecto de la comparación entre escenarios climáticos, pero no debiera afectar mayormente al análisis realizado respecto de los métodos de escalamiento para modelos de un mismo escenario ya que existe la certeza de que fueron desarrollados utilizando el mismo set de datos como caso base.

En cuanto a los cambios a nivel climático proyectados para el periodo 2030-2059, todos los GCM coinciden en un aumento de la temperatura media entre 0-2°C y en una disminución de la precipitación entre 6-36%, coincidentes con los resultados reportados por otros autores (Bozkurt et al, 2018; Araya-Osses et al, 2020).

Al comparar las proyecciones de caudales obtenidas con distintos escenarios climáticos, es posible concluir que los dos escenarios analizados indican reducción de los caudales, especialmente al considerar los índices hidrológicos asociados a la mediana de los caudales y al balance general. Ambos escenarios coinciden en que existirá un cambio en la temporalidad de la escorrentía máxima hacia fechas más tempranas, siendo este cambio más severo en cuanto a temporalidad y magnitud para los modelos del escenario RCP, donde este cambio en la temporalidad es de aproximadamente un mes con una reducción de hasta 38% en los caudales medios mensuales de primavera, estos cambios en la estacionalidad se ven reflejados también en el coeficiente de estacionalidad, el cual entrega valores mayores para los caudales futuros del escenario RCP. Estos resultados respecto de la temporalidad coinciden con los resultados de Bozkurt et al. (2018), donde se menciona que un adelanto de aproximadamente 5 semanas en la fecha de la escorrentía máxima.

Comparando los resultados de los caudales obtenidos para el periodo histórico de los GCM respecto del caso base, se observa que a medida que aumenta la probabilidad de excedencia

el error de los caudales simulados aumenta así como también aumenta la dispersión de los errores.

El único modelo que está presente en ambos escenarios en este estudio corresponde a MIROC, por lo que se realizó una comparación entre sus dos versiones. En cuanto a las diferencias proyectadas para caudales con probabilidad de excedencia mayor a 50%, MIROC6 indica un escenario menos pesimista que MIROC5. Estas diferencias en las proyecciones pueden ser atribuidas tanto a la definición de los escenarios climáticos como a los ajustes realizados al GCM por parte de sus desarrolladores.

Los modelos del escenario RCP proyectan una disminución de caudales para todo el periodo de entre 11 a 21%, mientras que los modelos del escenario SSP proyectan una reducción de entre un 1 a un 36%. Estos resultados indican que las diferencias entre modelos climáticos para un mismo escenario son mayores en SSP que en RCP.

Al analizar los modelos del escenario SSP según los índices hidrológicos asociados a la curva de duración, indican cierto nivel de acuerdo en las tendencias a la baja en la mediana de los caudales (FMM, rango entre -17 y -2%) y el coeficiente de escorrentía (RR, rango entre -40 y -1%) y un alza en la pendiente de la curva (FMS, rango entre -2 y 9%), pero entregan resultados poco concluyentes en cuanto a los extremos de la curva, presentando tendencias opuestas entre modelos para los caudales altos (FHV, rango entre -23 a 16%) y en los caudales bajos (FLV), donde cada modelo presenta resultados contrarios según el método de escalamiento.

Otro resultado importante obtenido es que fue posible determinar que las diferencias entre los caudales obtenidos con forzantes escaladas con los dos métodos utilizados son menores al 1% en el periodo histórico y menores al 7% en el periodo futuro.

Considerando todo lo anterior, se concluye que, para el conjunto de escenarios, GCMs y métodos de escalamiento considerados en este estudio, la elección del escenario climático y del modelo de circulación general aportan mayores fuentes de incertidumbre que los métodos de escalamiento utilizados, sin embargo, se recomienda utilizar más de un método para validar el escalamiento realizado. Además, hay otras fuentes de incertidumbre relevantes para las métricas analizadas que fueron excluidas del diseño experimental, como la elección de la estructura del modelo, los parámetros o la variabilidad natural. Dado que no existen dos modelos que entreguen el mismo resultado, se confirma la relevancia de utilizar un enfoque de conjuntos o ensemble, y escoger un número no menor a 6 sets de datos debido a las diferencias en la desviación estándar de los índices hidrológicos obtenidos al analizar conjuntos de modelos de distintos tamaños, y una correcta reproducción de la desviación estándar del conjunto de modelos disminuye la incertidumbre al considerar un rango más cercano a al universo de futuros posibles.

Para tener un mayor manejo de la incertidumbre, una recomendación sería utilizar un conjunto de simulaciones más grande. Este conjunto puede aumentarse mediante:

- La utilización de más modelos GCM del CMIP6 (es posible que desde la fecha de inicio de este estudio hayan sido publicados más modelos climáticos utilizando el escenario SSP5-8.5).

- Considerar más de un modelo hidrológico y/o más de una calibración.
- Considerar otro escenario SSP. Siguiendo con la línea de este estudio, se recomendaría utilizar el SSP3-7.0, dado que corresponde al segundo escenario más pesimista después del SSP5-8.5.

Finalmente, un ejercicio interesante sería analizar los escenarios de menores emisiones de GEI de los escenarios SSP para evaluar su impacto a nivel local, dados los buenos resultados que entregan las proyecciones a nivel global respecto de una limitación del cambio climático. La existencia de impactos positivos a corto o mediano plazo a escala local podría ser una motivación para la aplicación de políticas medioambientales que aporten a reducir las emisiones y así frenar o, en el mejor de los casos, revertir el cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

Addor, N., Rössler, O., Köplin, N., Huss, M., Weingartner, R., & Seibert, J. (2014). Robust changes and sources of uncertainty in the projected hydrological regimes of Swiss catchments. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1002/2014WR015549>

Araya-Osses, D., Casanueva, A., Román-Figueroa, C. *et al.* Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Clim Dyn* **54**, 4309–4330 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05231-4>

Baede, A.P.M., Ahlonsou, E., Ding, Y., Schimel D. (2001). The Climate System, An Overview; Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Pres.*

Burrough, P. A., McDonnell, R., McDonnell, R. A., & Lloyd, C. D. (2015). Principles of geographical information systems. *Oxford university press.*

Boisier, JP, Alvarez-Garretón, C, Cordero, RR, Damiani, A, Gallardo, L, Garreaud, RD, Lambert, F, Ramallo, C, Rojas, M and Rondanelli, R. (2018). Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. *Elem Sci Anth*, 6: 74. DOI: <https://doi.org/10.1525/elementa.328>

Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P., & Valdivieso, J. (2018). Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. *Climatic change*, 150(3-4), 131-147.

Cannon, A.J. (2018). Multivariate Bias Correction of Climate Model Outputs. R package version 0.10-4.

Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28(17), 6938-6959.

Casper, M. C., Grigoryan, G., Gronz, O., Gutjahr, O., Heinemann, G., Ley, R., & Rock, A. (2012). Analysis of projected hydrological behavior of catchments based on signature indices. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(2), 409-421.

Chegwidden, O. S., Nijssen, B., Rupp, D. E., Arnold, J. R., Clark, M. P., Hamman, J. J., et al. (2019). How do modeling decisions affect the spread among hydrologic climate change projections? Exploring a large ensemble of simulations across a diversity of hydroclimates. *Earth's Future*, 7, 623–637. <https://doi.org/10.1029/2018EF001047>

Clark, M.P., Wilby, R.L., Gutmann, E.D., Vano, J.A., Gangopadhyay, S., Wood, A.W., Fowler, H. J., Prudhomme, C., Arnold, J. R. & Brekke, L. D. (2016). Characterizing Uncertainty of the Hydrologic Impacts of Climate Change. *Current Climate Change Reports* **2**, 55–64 <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0034-x>

Dettinger, M. D., Cayan, D. R., Meyer, M. K., & Jeton, A. E. (2004). Simulated hydrologic responses to climate variations and change in the Merced, Carson, and American River basins, Sierra Nevada, California, 1900–2099. *Climatic Change*, 62(1-3), 283-317.

DGA (2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N°417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.

DGA (2018). Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro, SIT N°435. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios Planificación, Santiago, Chile. Realizado por Fundación para la Transferencia Tecnológica y Pontificia Universidad Católica de Chile.

Gao, H., Tang, Q., Shi, X., Zhu, C., Bohn, T. J., Su, F., Sheffield, J., Pan, M., Lettenmaier, D. P. & Wood, E. F. (2010). Water Budget Record from Variable Infiltration Capacity (VIC) Model. In Algorithm Theoretical Basis Document for Terrestrial Water Cycle Data Records.

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., and Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377, 80–91, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.

IPCC (2013). Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2005). *Geographic information systems and science*. John Wiley & Sons.

Maurer, E., Hidalgo, G. (2008). Utility of daily vs. monthly large-scale climate data: an intercomparison of two statistical downscaling methods. *Hydrology and Earth System Sciences* 12, 551–563.

Mendoza, P. A., Mizukami, N., Ikeda, K., Clark, M. P., Gutmann, E. D., Arnold, J. R., ... & Rajagopalan, B. (2016). Effects of different regional climate model resolution and forcing scales on projected hydrologic changes. *Journal of Hydrology*, 541, 1003-1019.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756.

Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).

Pfannerstill, M., Guse, B., & Fohrer, N. (2014). Smart low flow signature metrics for an improved overall performance evaluation of hydrological models. *Journal of Hydrology*, 510, 447-458.

- Ragettli, S., Immerzeel, W. W., & Pellicciotti, F. (2016). Contrasting climate change impact on river flows from high-altitude catchments in the Himalayan and Andes Mountains. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(33), 9222-9227.
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S. *et al.* (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168.
- Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K. V., Luderer, G., Emmerling, J., Gernaat, D. *et al.* (2018). Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °C. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0091-3>
- Stoner, A. M., Hayhoe, K., Yang, X., & Wuebbles, D. J. (2013). An asynchronous regional regression model for statistical downscaling of daily climate variables. *International Journal of Climatology*, 33(11), 2473-2494.
- Tatebe, Hiroaki, Watanabe, Masahiro (2018). MIROC MIROC6 model output prepared for CMIP6 CMIP abrupt-4xCO2. Version YYYYMMDD. *Earth System Grid Federation*. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5411>
- Ulloa, Juan Pablo (2012). Calibración y uso del modelo VIC para el pronóstico de deshielo en la cuenca de Aconcagua en Chacabucuito. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Uribe, Felipe. Comparación de la cobertura nival e hidrogramas simulados a distintas escalas temporales en la cuenca alta del río Maipo, por distintas conceptualizaciones del proceso nival. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Wilby, R. L., & Dessai, S. (2010). Robust adaptation to climate change. *Weather*, 65(7), 180-185.
- Wilby RL, Dawson CW, Murphy C, O'Connor P, Hawkins E (2014) The Statistical DownScaling Model - Decision Centric (SDSM-DC): conceptual basis and applications. *Clim Res* 61:259-276. <https://doi.org/10.3354/cr01254>
- Yilmaz, K. K., H. V. Gupta, and T. Wageneger (2008), A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model, *Water Resources Research*, 44, W09417, doi: 10.1029/2007WR006716.
- van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M. *et al.* (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109, 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

ANEXOS

ANEXO A

Se incluyen en mayor detalle los escenarios climáticos SRES, RCP y SSP.

Tabla Anexo 1 Escenarios climáticos SRES, tabla comparativa de las narrativas.

	Riqueza material	Sostenibilidad y equidad
Globalización	A1 <i>Dominado por las fuerzas del mercado</i>	B1 <i>Desarrollo sostenible</i>
Regionalización	A2 <i>Choque de civilizaciones</i>	B2 <i>Bolsa verde, mezcla de realidades</i>

Tabla Anexo 2 Características principales de cada escenario RCP. Fuente: van Vuuren et al. (2011)

Escenario/ Componente	RCP2.6	RCP4.5	RCP6	RCP8.5
Emisiones de gases de efecto invernadero	Muy baja	Mitigación media- baja Línea base muy baja	Mitigación alta Línea base alta	Línea base alta
Área utilizada para agricultura	Media para tierras de cultivo y pastoreo	Muy baja tanto para cultivo como pastoreo	Media para cultivo, pero muy baja para pastoreo (en total baja)	Media para tierras de cultivo y pastoreo
Contaminación del aire	Media-baja	Media	Media	Media-alta

Tabla Anexo 3 Resumen de las narrativas de los escenarios SSP. Traducido de Riahi et al. (2017).

SSP1	<p>Sostenibilidad – Tomar el camino verde (Desafíos bajos para la mitigación y la adaptación)</p> <p>El mundo cambia gradualmente, pero de manera generalizada, hacia un camino más sostenible, enfatizando un desarrollo más inclusivo que respeta los límites ambientales percibidos. La gestión de los bienes comunes mundiales mejora lentamente, las inversiones en educación y salud aceleran la transición demográfica y el énfasis en el crecimiento económico se desplaza hacia un énfasis más amplio en el bienestar humano. Impulsado por un compromiso cada vez mayor con el logro de los objetivos de desarrollo, se reduce la desigualdad tanto entre los países como dentro de ellos. El consumo está orientado hacia un bajo crecimiento material y una menor intensidad de uso de recursos y energía.</p>
SSP2	<p>Al medio del camino (Desafíos medios para la mitigación y la adaptación)</p> <p>El mundo sigue un camino en el que las tendencias sociales, económicas y tecnológicas no se desvían marcadamente de los patrones históricos. El desarrollo y el crecimiento de los ingresos avanzan de manera desigual, con algunos países logrando un progreso relativamente bueno mientras que otros no están a la altura de las expectativas. Las instituciones mundiales y nacionales trabajan para lograr los objetivos de desarrollo sostenible, pero lo hacen lentamente. Los sistemas ambientales experimentan degradación, aunque hay algunas mejoras y, en general, la intensidad del uso de recursos y energía disminuye. El crecimiento de la población mundial es moderado y se estabiliza en la segunda mitad del siglo. La desigualdad de ingresos persiste o mejora solo lentamente y persisten los desafíos para reducir la vulnerabilidad a los cambios sociales y ambientales.</p>
SSP3	<p>Rivalidad Regional – Un camino rocoso (Grandes desafíos para la mitigación y la adaptación)</p> <p>El resurgimiento del nacionalismo, las preocupaciones sobre la competitividad y la seguridad y los conflictos regionales empujan a los países a centrarse cada vez más en cuestiones nacionales o, como mucho, regionales. Las políticas cambian con el tiempo para orientarse cada vez más hacia cuestiones de seguridad nacional y regional. Los países se centran en alcanzar los objetivos de seguridad energética y alimentaria dentro de sus propias regiones a expensas de un desarrollo de base más amplia. Disminuyen las inversiones en educación y desarrollo tecnológico. El desarrollo económico es lento, el consumo es intensivo en materiales y las desigualdades persisten o empeoran con el tiempo. El crecimiento de la población es bajo en los países industrializados y alto en los países en desarrollo. Existe una baja prioridad internacional para abordar las preocupaciones ambientales, lo que conduce a una fuerte degradación ambiental en algunas regiones.</p>
SSP4	<p>Desigualdad – Un camino dividido (Desafíos bajos para la mitigación, desafíos altos para la adaptación)</p> <p>Las inversiones sumamente desiguales en capital humano, combinadas con las crecientes disparidades en las oportunidades económicas y el poder político, conducen a un aumento de las desigualdades y la estratificación tanto entre los países como dentro de ellos. Con el tiempo, se ensancha una brecha entre una sociedad conectada internacionalmente que contribuye a los sectores de la economía mundial intensivos en conocimiento y capital, y una colección fragmentada de sociedades de bajos ingresos y con poca educación que trabajan en una economía de baja tecnología y con un uso intensivo de mano de obra. La cohesión social se degrada y los conflictos y los disturbios se vuelven cada vez más comunes. El desarrollo tecnológico es alto en la economía y los sectores de alta tecnología. El sector energético globalmente conectado se diversifica, con inversiones tanto en combustibles altos en carbono como el carbón y petróleo no convencional, como también en fuentes de energía bajas en carbono. Las políticas ambientales se enfocan en temas locales en áreas de ingresos medios y altos.</p>
SSP5	<p>Desarrollo impulsado por combustibles fósiles – Tomar la carretera (Grandes desafíos para la mitigación, Bajos desafíos para la adaptación)</p> <p>Este mundo confía cada vez más en los mercados competitivos, la innovación y las sociedades participativas para producir un rápido progreso tecnológico y el desarrollo del capital humano como camino hacia el desarrollo sostenible. Los mercados globales están cada vez más integrados. También hay fuertes inversiones en salud, educación e instituciones para mejorar el capital humano y social. Al mismo tiempo, el impulso por el desarrollo económico y social se combina con la explotación de abundantes recursos de combustibles fósiles y la adopción de estilos de vida con uso intensivo de recursos y energía en todo el mundo. Todos estos factores conducen a un rápido crecimiento de la economía mundial, mientras que la población mundial alcanza su punto máximo y disminuye en el siglo XXI. Los problemas ambientales locales como la contaminación del aire se gestionan con éxito. Existe fe en la capacidad de gestionar con eficacia los sistemas sociales y ecológicos, incluso mediante la geoingeniería si es necesario.</p>

ANEXO B

A continuación, se muestran las especificaciones de los modelos de circulación general utilizados en el Balance Hídrico, considerando el escenario RCP8.5.

Tabla Anexo 4 Especificaciones de los GCM del escenario RCP utilizados en el Balance Hídrico. Fuente: Lagos et al, 2018.

Centro de modelamiento	Modelo	Institución	Δ° Lat.	Δ° Lon.	Calendario
BCC	BCC- CSM1.1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	2,791	2,813	Año Juliano
CMCC	CMCC- CESM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	3,711	3,750	Año normal
	CMCC-CMS		1,865	1,875	Año normal
CSIRO- QCCCE	CSIRO- Mk3.6.0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence	1,865	1,875	Año Juliano
MPI-M	MPI-ESM- LR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	1,865	1,875	Año normal

ANEXO C

En esta sección se incluyen las diferencias entre el periodo futuro e histórico de las forzantes meteorológicas obtenidas de los modelos del escenario SSP.

Tabla Anexo 5 Diferencia entre la precipitación proyectada por los GCM en el periodo histórico y los datos observados.

CDF (%)	Modelo	Escalamiento	Diferencia entre modelo histórico y observación
10	CNRM	AR	23%
		QDM	29%
	MIROC	AR	-26%
		QDM	26%
	MPI	AR	64%
		QDM	67%
30	CNRM	AR	5%
		QDM	-9%
	MIROC	AR	-6%
		QDM	15%
	MPI	AR	7%
		QDM	19%
50	CNRM	AR	33%
		QDM	34%
	MIROC	AR	33%
		QDM	30%
	MPI	AR	49%
		QDM	55%
85	CNRM	AR	12%
		QDM	8%
	MIROC	AR	15%
		QDM	12%
	MPI	AR	17%
		QDM	17%
99	CNRM	AR	-2%
		QDM	-5%
	MIROC	AR	5%
		QDM	6%
	MPI	AR	-2%
		QDM	-4%

Tabla Anexo 6 Diferencia proyectada por los GCM para distintas probabilidades de excedencia.

CDF (%)	Modelo	Método de escalamiento	Diferencia (fut-hist)
10	CNRM	AR	-58%
		QDM	-50%
	MIROC	AR	-39%
		QDM	-7%
	MPI	AR	9%
		QDM	38%
30	CNRM	AR	0%
		QDM	11%
	MIROC	AR	-4%
		QDM	-15%
	MPI	AR	-11%
		QDM	-14%
50	CNRM	AR	-16%
		QDM	-16%
	MIROC	AR	-18%
		QDM	-11%
	MPI	AR	-25%
		QDM	-23%
85	CNRM	AR	6%
		QDM	6%
	MIROC	AR	-15%
		QDM	-11%
	MPI	AR	-39%
		QDM	-39%
99	CNRM	AR	-3%
		QDM	-2%
	MIROC	AR	-8%
		QDM	-11%
	MPI	AR	-40%
		QDM	-36%

ANEXO D

Se presentan gráficos y tablas complementarios a los resultados de la sección 5.2, incluyendo diferencias entre índices hidrológicos con respecto al caso base, índices hidrológicos del periodo futuro con respecto al periodo histórico y el valor medio de los índices hidrológicos al considerar distintos tamaños de conjuntos de modelos. Todos los resultados están agrupados según escenarios climáticos o métodos de escalamiento, al igual que en el resto del estudio.

Tabla Anexo 7 Índices hidrológicos para los periodos histórico y futuro con respecto a la línea base, según escenarios climáticos.

Escenario	Modelo	FMS (%)		FHV (%)		FLV (%)		FMM (%)		RR (%)	
		Histórico	Futuro								
RCP	CCSM4	15.4	3.0	22.0	-16.8	22.6	22.0	-10.7	-9.8	-10.5	-22.0
	CSIRO	1.6	12.2	11.9	-19.8	-19.1	-8.3	-6.1	-5.5	-11.9	-21.4
	IPSL	2.9	8.7	0.2	-22.5	-10.2	-10.4	-6.1	-11.4	-10.7	-29.1
	MIROC	10.6	17.1	1.8	-3.8	-7.0	-22.9	-9.1	-14.3	-12.1	-28.4
SSP	CNRM	18.5	22.4	0.7	13.3	27.5	31.0	-3.0	-6.8	0.1	-0.9
	MPI	44.6	45.9	20.1	0.9	37.1	27.7	-14.9	-28.5	0.6	-35.4
	MIROC	14.2	23.2	-9.6	4.6	44.9	24.2	-0.2	-15.1	-0.4	-12.9

Tabla Anexo 8 Índices hidrológicos para el periodo futuro con respecto al histórico, según escenarios climáticos.

Escenario	Modelo	FMS (%)	FHV (%)	FLV (%)	FMM (%)	RR (%)
RCP	CCSM4	-10.7	-31.8	-0.8	1.0	-12.8
	CSIRO	10.4	-28.4	9.1	0.6	-10.8
	IPSL	5.6	-22.7	-0.1	-5.7	-20.6
	MIROC5	5.9	-5.5	-14.9	-5.7	-18.6
SSP	CNRM	3.3	12.6	4.9	-3.9	-1.0
	MPI	1.0	-16.0	-15.0	-15.9	-35.8
	MIROC6	7.9	15.7	-37.7	-14.9	-12.5

Tabla Anexo 9 Índices hidrológicos para los periodos histórico y futuro con respecto a la línea base, según métodos de escalamiento.

Método de Escalamiento	Modelo	FMS (%)		FHV (%)		FLV (%)		FMM (%)		RR (%)	
		Histórico	Futuro								
AR	CNRM	22.5	22.2	5.1	13.2	25.1	22.3	-4.7	-7.1	1.0	-0.5
	MPI	44.3	41.5	20.3	-7.5	37.4	8.9	-15.2	-29.2	0.6	-39.5
	MIROC	15.6	25.5	-10.7	-2.1	44.0	32.7	-0.4	-14.7	-0.5	-16.9
QDM	CNRM	18.5	22.4	0.7	13.3	27.5	31.0	-3.0	-6.8	0.1	-0.9
	MPI	44.6	45.9	20.1	0.9	37.1	27.7	-14.9	-28.5	0.6	-35.4
	MIROC	14.2	23.2	-9.6	4.6	44.9	24.2	-0.2	-15.1	-0.4	-12.9

Tabla Anexo 10 Índices hidrológicos para el periodo futuro con respecto al histórico, según métodos de escalamiento.

Método de Escalamiento	Modelo	FMS (%)	FHV (%)	FLV (%)	FMM (%)	RR (%)
AR	CNRM	-0.2	7.8	-3.8	-2.5	-1.5
	MPI	-1.9	-23.1	-45.4	-16.5	-39.9
	MIROC	8.6	9.6	-20.1	-14.4	-16.5
QDM	CNRM	3.3	12.6	4.9	-3.9	-1.0
	MPI	1.0	-16.0	-15.0	-15.9	-35.8
	MIROC	7.9	15.7	-37.7	-14.9	-12.5

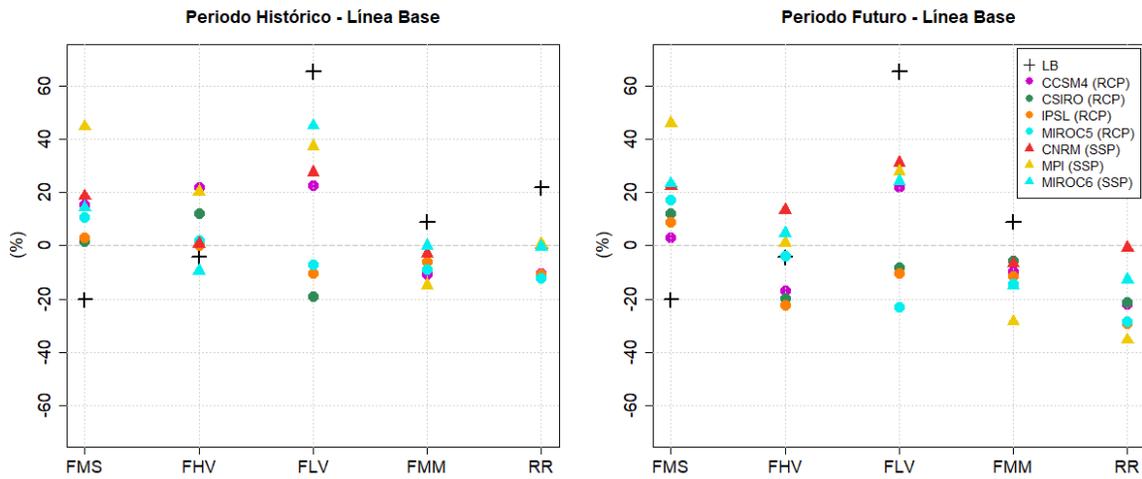


Figura Anexo 1 Valores de Índices hidrológicos comparando el periodo histórico con la línea base. El valor de la línea base corresponde a la calibración.

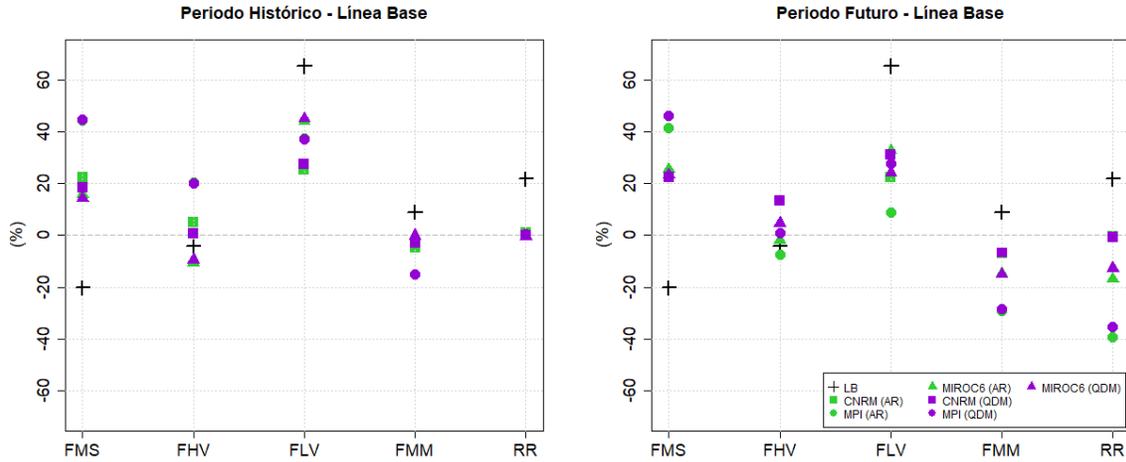


Figura Anexo 2 Valores de Índices hidrológicos según método de escalamiento para el periodo histórico y el periodo futuro en función de la Línea Base.

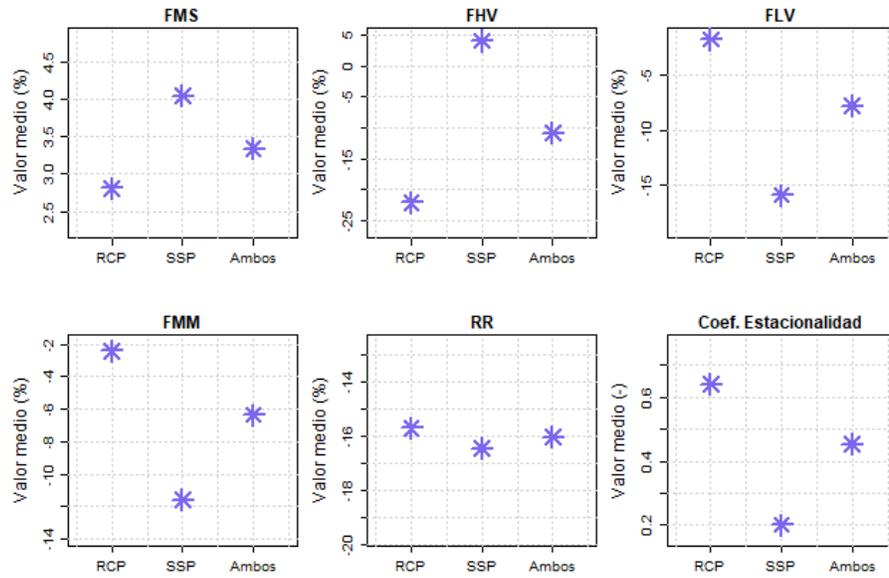


Figura Anexo 3 Valor medio de las Índices hidrológicos según escenario climático.

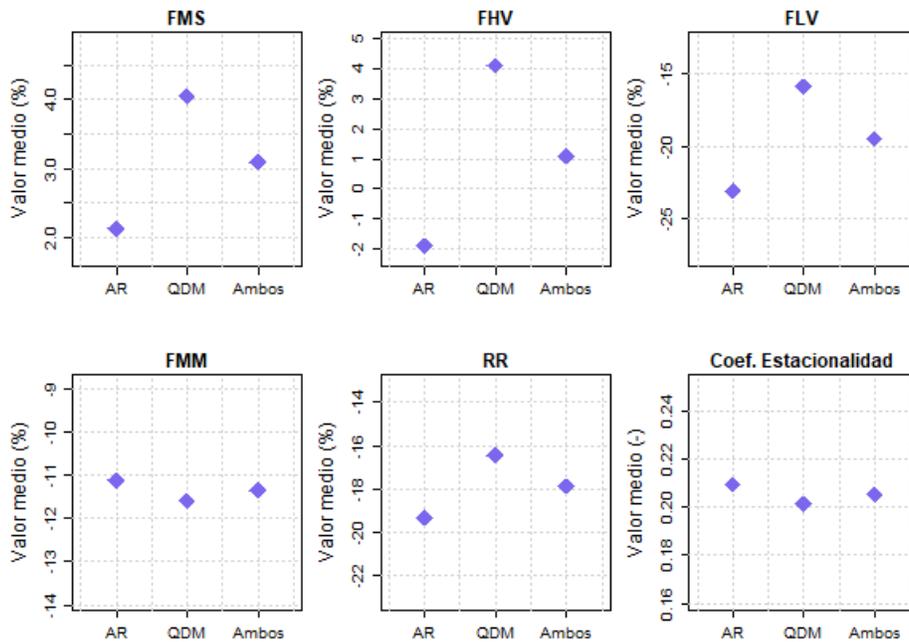


Figura Anexo 4 Valor medio de las Índices hidrológicos según método de escalamiento.

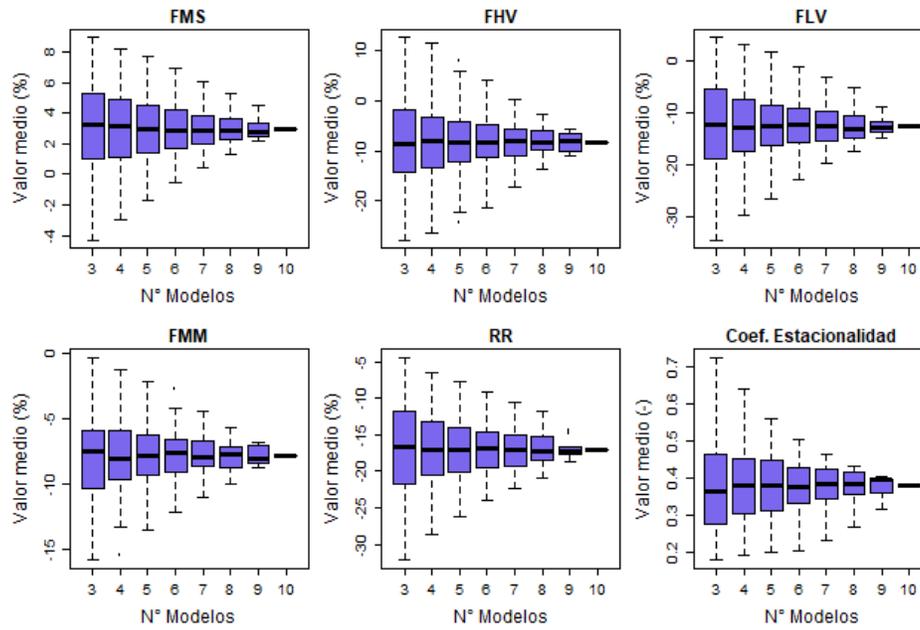


Figura Anexo 5 Valor medio de los Índices hidrológicos al agregar más modelos.