



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

**ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS
RECURSOS HÍDRICOS DE CUENCAS EN RÉGIMEN NATURAL
UBICADAS EN LA ZONA ALTA DEL RÍO MATAQUITO.
COMPARACIÓN ENTRE LOS ESCENARIOS RCP 8.5 Y RCP 4.5**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FABIÁN PATRICIO LEMA GONZÁLEZ

PROFESORA GUÍA:
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
NICOLÁS VÁSQUEZ PLACENCIA
MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA

SANTIAGO DE CHILE
2021

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil
POR: Fabián Patricio Lema González
FECHA: mayo de 2021
PROFESORA GUÍA: Ximena Vargas Mesa

**ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS RECURSOS
HÍDRICOS DE CUENCAS EN RÉGIMEN NATURAL UBICADAS EN LA ZONA ALTA
DEL RÍO MATAQUITO. COMPARACIÓN ENTRE LOS ESCENARIOS RCP 8.5 Y 4.5**

En las últimas décadas se han evidenciado algunos efectos del cambio climático sobre cuencas de la zona Central de Chile, destacándose un aumento en la temperatura media anual de 0,25 °C y un déficit en las precipitaciones superior a los 60 mm por cada década desde 1970. Estos efectos podrían tener consecuencias directas sobre la disponibilidad de los recursos hídricos, impactando a diversas actividades económicas y sociales.

Dado este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo principal estimar la disponibilidad futura de recursos hídricos de tres cuencas en régimen natural en la zona alta del Río Mataquito, durante el período 2030-2060, considerando los escenarios de cambio climático RCP 8.5 y RCP 4.5 (ambos definidos por el IPCC en el proyecto CMIP5).

Para este propósito, se caracterizó y recopiló información hidrometeorológica de la zona de estudio, la cual fue utilizada en conjunto a simulaciones de cuatro Modelos de Circulación Global (GCMs), seleccionados previamente en el proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional, para recrear series de forzantes meteorológicas durante los períodos histórico y futuro. En este proceso se implementó el método Quantile Delta Mapping, el cual corresponde a una técnica de escalamiento estadístico (*downscaling*), para ajustar la resolución espacial de cada GCM, desde una escala global a una escala de cuenca. Finalmente, se calibraron e implementaron los modelos hidrológicos GR4J y VIC para reproducir la hidrología durante el período histórico y realizar proyecciones en el período 2030-2060 para cada una de las cuencas estudiadas.

Los resultados más relevantes de este trabajo muestran importantes cambios futuros en las variables meteorológicas de la zona de estudio, incluyendo proyecciones de descenso en la precipitación media anual de entre un 5% y 9% y aumentos de temperatura máxima y mínima en un rango de entre 1 °C y 2,6 °C bajo el escenario RCP 4.5.

Asimismo, también se proyectan significativos cambios en la hidrología de las cuencas estudiadas, los cuales involucran disminuciones de los caudales medios diarios de hasta 49% en el caso más extremo, un aumento en la frecuencia de los caudales más bajos y cambios en la estacionalidad del régimen hidrológico, siendo el más evidente el adelantamiento de hasta dos meses en la ocurrencia de los caudales de deshielo. También se constataron diferencias promedio en torno a un 20% en la escurrentía media entre los dos escenarios de emisiones, aunque ambos señalan un descenso en la disponibilidad futura de recursos hídricos.

*A mis padres y familia,
por su apoyo incondicional y preocupación durante tantos años*

Agradecimientos

Primero que todo quisiera comenzar con darle las gracias a mi mamá por su amor, dedicación y preocupación incondicional a lo largo de mi vida. A mi papá, quién con mucho esfuerzo y trabajo siempre ha luchado por darnos una mejor vida a mí y a mi hermano. También a mi hermana, a mis tías y primos, que a pesar de la distancia sé que puedo contar con ellos.

En especial quisiera agradecer a mi tía Pilar y a mi tío Nino, quienes desde siempre han sido un apoyo fundamental en mi vida. Hoy están pasando por un momento difícil pero estoy seguro de que saldrán adelante victoriosos de esta situación como tantas otras veces antes.

Quisiera agradecer a mi profesora guía Ximena Vargas, por la gran ayuda, apoyo y orientación que me ha brindado durante todo este último proceso de la carrera y por transmitir siempre sus conocimientos y pasión por la hidrología. A los profesores de mi comisión: Nicolás Vásquez y Miguel Lagos, que con mucha paciencia revisaron mi trabajo y aportaron con valiosos comentarios y consejos. Y también a Eduardo Muñoz, quién pasó varias jornadas ayudándome con la programación en R, en momentos en los que estaba muy perdido.

Mi paso por Beauchef durante estos largos años de universidad no fue siempre fácil y muchas veces estuvo invadido de dudas y dificultades, desde replantearme más de alguna vez si había elegido bien la carrera hasta días donde simplemente nada salía como esperaba. Sin embargo, durante todo este proceso nunca estuve solo y fue fundamental la compañía de grandes amigos y amigas: Jorquera, Zelada, Karen, Jajá, Carlete, Piccolis, Pincheira, Topa y tantas otras grandes personas. A pesar de que la vida nos ha puesto una gran distancia en estos últimos años, tengo la convicción de que pronto vendrán mejores momentos y ya habrá tiempo de compartir nuevamente. Y desde luego también agradecer a cada persona que en estos años hizo mucho más amigable mi paso por este lugar, ya sea con una simple conversación de pasillo, una anécdota o una sincera sonrisa.

También agradecer a cada uno de los compañeros con los que compartí en mi paso por Civil e Hidráulica: Mati, Ale, Gonzalo, Mario, al team docente de Topo, entre tantos otros, por su amistad y apañe en las largas jornadas de estudio, haciendo estos últimos años mucho más llevaderos.

Al Preuniversitario Popular José Carrasco Tapia, a los Trabajos Voluntarios Fech y todas las instancias de trabajo colectivo en las que he tenido la oportunidad de participar (y a las grandes personas que tuve la oportunidad de conocer en esos espacios), los cuales también han sido importante en mi formación como profesional y persona. Porque no todo en mi paso por la u fueron los ramos y controles.

Por último, no puedo dejar de agradecer a cada profesor y profesora que ha sido parte de mi formación como persona, desde los primeros años de educación básica y media hasta estos últimos años de universidad. He tenido la fortuna de haber tenido excelente docentes a lo largo de mi vida, que siempre enseñaron con una pasión y vocación admirables. Sin duda que en parte es gracias a ellos que hoy estoy escribiendo estas líneas.

Tabla de contenido

Capítulo 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 Informe	3
Capítulo 2: Revisión Bibliográfica	4
2.1. Cambio Climático	4
2.2. Modelos de Circulación Global (GCM)	7
2.3 Escalamiento espacial (<i>Downscaling</i>)	8
2.4. Modelos Hidrológicos.....	11
2.4.1. Modelo VIC.....	12
2.4.2. Modelo GR4J	14
2.4.3. Índices de eficiencia de modelos.....	15
2.5. Estudios anteriores y antecedentes de modelación hidrológica en Chile	16
Capítulo 3: Metodología.....	18
3.1. Descarga de datos y caracterización de la zona de estudio.....	18
3.2. Chequeo de consistencia y validación de datos de CR2MET	19
3.3. <i>Downscaling</i> de GCMs y corrección de sesgo	19
3.4. Calibración e Implementación de Modelos Hidrológicos	21
3.5. Simulación de escenarios y análisis de resultados.....	23
Capítulo 4: Caracterización de la Zona de Estudio	24
4.1. Antecedentes Generales.....	24
4.2. Información Hidrometeorológica Disponible	28
4.3. Hidrología	29
4.4. Climatología.....	33
4.5. Producto grillado CR2MET.....	34
4.5.1. Distribución de píxeles de CR2MET en cada cuenca	12
4.5.1. Validación producto grillado CR2MET en zona de estudio	12
Capítulo 5: Resultados del <i>Downscaling</i> de forzantes climáticas en el escenario RCP 4.5..	36
5.1. Precipitación	36
5.1.1. Resultados Período histórico (1985 – 2015).	36
5.1.2. Resultados Proyección futura en escenario RCP 4.5	40
5.2. Temperatura máxima	42
5.2.1. Resultados Período histórico (1985 – 2015).	42
5.2.2. Resultados Proyección futura en escenario RCP 4.5	44
5.3. Temperatura mínima.....	47

5.3.1. Resultados Período histórico (1985 – 2015)	47
5.3.2. Resultados Proyección futura en escenario RCP 4.5	49
5.4. Discusión	52
Capítulo 6: Resultados Modelación Hidrológica	53
6.1. Calibración del Modelo GR4J con módulo CemaNeige	53
6.2. Modelación hidrológica en cuenca del Río Claro en los Queñes	59
6.2.1. Resultados Período histórico.....	59
6.2.2. Resultados Período de proyección futura.....	61
6.3. Modelación hidrológica en cuenca del Río Colorado en junta con Palos	63
6.3.1. Resultados Período histórico.....	63
6.3.2. Resultados Período de proyección futura.....	65
6.4. Modelación hidrológica en cuenca del Río Palos en junta con Colorado	67
6.4.1. Resultados Período histórico.....	67
6.4.2. Resultados Período de proyección futura.....	69
Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones	71
7.1. Conclusiones	71
7.2. Recomendaciones	73
Bibliografía.....	75
Anexo A: Validación producto CR2MET	80
Anexo B: Series anuales de GCMs durante el período histórico	113
Anexo C: Downscaling desagregado a nivel de píxel	915
Anexo D: Resultados de proyecciones futuras de escorrentía.....	113
Anexo E: Anexo Digital.....	120

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Características y comportamiento de cada escenario de emisión RCP.....	5
Tabla 2.2: Modelos de Circulación Global seleccionados en DGA (2017).	8
Tabla 3.1: Descripción y rango de valores de los parámetros del modelo hidrológico GR4J.....	21
Tabla 3.2: Descripción y rango de valores de los parámetros del módulo de nieves CemaNeige.	22
Tabla 4.1: Atributos y parámetros geomorfológicos e hidrológicos de las cuencas estudiadas....	24
Tabla 4.2: Ubicación y período de registro de las estaciones fluviométricas en la zona de estudio.	28
Tabla 4.3: Ubicación y período de registro de las estaciones meteorológicas en la zona de estudio.	28
Tabla 5.1: Ubicación de los píxeles seleccionados como representativos de las zonas de valle y cordillera.	36
Tabla 5.2: Principales estadísticos de las series anuales de precipitación simuladas por los cuatro GCMs, durante el período 2030 – 2060.....	40
Tabla 5.3: Principales estadísticos de las series anuales de temperatura máxima simuladas por los cuatro GCMs, durante el período 2030 – 2060.....	45
Tabla 5.4: Principales estadísticos de las series anuales de temperatura mínima simuladas por los cuatro GCMs, durante el período 2030 – 2060.....	50
Tabla 6.1: Valor de los Parámetros del modelo GR4J y CemaNeige obtenidos en la calibración de las tres cuencas estudiadas.	53
Tabla 6.2: Valor de las métricas de comparación obtenidas en las calibraciones de cada cuenca durante el período de Calibración (1985/86 – 2005/06). Modelo GR4J y CemaNeige.....	54
Tabla 6.3: Valor de las métricas de comparación obtenidas en las calibraciones de cada cuenca durante el período de Validación (2006/07 – 2014/15). Modelo GR4J y CemaNeige.....	54
Tabla 6.4: Valor de las métricas de comparación obtenidas en las calibraciones de cada cuenca durante el período de Calibración + Validación (1985/86 – 2014/15). Modelo GR4J y CemaNeige.....	55
Tabla 6.5: Principales estadísticos de las series de escorrentía diaria observada y simuladas por los modelos hidrológicos GR4J y VIC durante el período base en la cuenca del Río Claro en los Queñes.	59
Tabla 6.7: Estadísticos de las series de escorrentía diaria simuladas por los modelos GR4J y VIC durante el período 2030-2060 en la cuenca del Río Claro en los Queñes, bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.....	61
Tabla 6.8: Principales estadísticos de las series de escorrentía diaria observada y simuladas por los modelos hidrológicos GR4J y VIC durante el período base en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos.	63
Tabla 6.9: Estadísticos de las series de escorrentía media diaria simuladas por los modelos GR4J y VIC durante el período 2030-2060 en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos, bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5.	65
Tabla 6.10: Principales estadísticos de las series de escorrentía media diaria observada y simuladas por los modelos hidrológicos GR4J y VIC durante el período base en la cuenca del Río Palos en junta con Colorado.....	67

Tabla 6.11: Estadísticos de las series de esorrentía media diaria simuladas por los modelos GR4J y VIC durante el período 2030-2060 en la cuenca del Río Palos en junta con Colorado, bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5.	69
Tabla B.1: Principales estadísticos de las series anuales de precipitación simuladas por el producto grillado CR2MET y los cuatro GCMs escalados, durante el período 1985 – 2015.	89
Tabla B.2: Principales estadísticos de las series anuales de temperatura máxima simuladas por el producto grillado CR2MET y los cuatro GCMs escalados, durante el período 1985 – 2015. .	91
Tabla B.3: Principales estadísticos de las series anuales de temperatura mínima simuladas por el producto grillado CR2MET y los cuatro GCMs escalados, durante el período 1985 – 2015. .	93

Índice de Figuras

Figura 2.1: Esquema explicativo de los escenarios SRES.	5
Figura 2.2: Trayectoria de emisiones de CO2 en los escenarios RCP.	6
Figura 2.3: Proceso de downscaling entre GCM y resoluciones menores	9
Figura 2.4: Esquema del método Quantile Delta Mapping.	10
Figura 2.5: Comparación entre las distintas técnicas de downscaling para una distribución de frecuencia de una variable.	11
Figura 2.6: Estructura del modelo hidrológico VIC.	13
Figura 2.7: Estructura del modelo GR4J.	14
Figura 3.1: Esquema de la metodología general empleada en el presente trabajo.	18
Figura 3.2: Esquema de la metodología de desagregación a nivel tri-horario utilizada en la temp. media.	22
Figura 3.3: Esquema de la metodología de desagregación a nivel tri-horario utilizada en la precipitación.	23
Figura 4.1: Mapa con la ubicación geográfica de las cuencas Río Claro en los Queñes, Río Colorado en junta con Palos y Río Palos en junta con Colorado.	25
Figura 4.2: Curvas hipsométricas de las cuencas Río Claro en los Queñes, Río Colorado en junta con Palos y Río Palos en junta con Colorado.	26
Figura 4.3: Elevación en las cuencas Río Claro en los Queñes (a), Río Colorado en junta con Palos (b) y Río Palos en junta con Colorado (c).	18
Figura 4.4: Cobertura de suelo en las cuencas Río Claro en los Queñes (a), Río Colorado en junta con Palos (b) y Río Palos en junta con Colorado (c).	27
Figura 4.5: Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas y fluviométricas en la zona de estudio.	29
Figura 4.6: Serie diaria de esorrentía en las tres cuencas estudiadas, durante el período 1985 – 2015.	30
Figura 4.7: Curvas de duración de caudales en las tres cuencas estudiadas, en el período 1985 – 2015.	31
Figura 4.8: Curva de variación estacional de caudales en la cuenca Claro en los Queñes, durante el período 1985 – 2015.	31
Figura 4.9: Curva de variación estacional de caudales en la cuenca Río Colorado en junta con Palos, durante el período 1985 – 2015.	32
Figura 4.10: Curva de variación estacional de caudales en la cuenca Río Palos en junta con Colorado, durante el período 1985 – 2015.	32
Figura 4.11: Climogramas de las cuencas Río Claro en los Queñes (a), Río Colorado en junta con Palos (b) y Río Palos en junta con Colorado (c)	33
Figura 4.12: Píxeles de la grilla de CR2MET asociados a las cuencas Río Claro en los Queñes (a), Río Colorado en junta con Palos (b) y Río Palos en junta con Colorado (c).	34
Figura 5.1: Boxplots de las series anuales de precipitación simuladas por el producto grillado CR2MET y los cuatro GCMs, durante el período histórico.	37
Figura 5.2: Comparación de las curvas de duración entre la precipitación diaria simulada por CR2MET y la simulada por cada uno de los cuatro GCMs escalados, durante el período histórico.	38

Figura 5.3: Comparación de las curvas de variación estacional entre la precipitación diaria simulada por CR2MET y la simulada por cada uno de los cuatro GCMs, durante el período histórico.	39
Figura 5.4: Diferencia en el n° de días promedio al año con precipitación mayor a 0,5 mm, respecto a CR2MET y a nivel de píxel, de algunos GCMs en Río Claro durante el período histórico.	39
Figura 5.5: Series anuales de precipitación simuladas por cada uno de los cuatro GCMs escalados, entre los años 1979 – 2060.	41
Figura 5.6: Boxplots de las series anuales de temperatura máxima simuladas por el producto grillado CR2MET y los cuatro GCMs, durante el período histórico.	42
Figura 5.7: Comparación de las curvas de duración entre la temperatura máxima diaria simulada por CR2MET y la simulada por cada uno de los cuatro GCMs escalados, durante el período histórico.	43
Figura 5.8: Comparación de las curvas de variación estacional entre la temperatura máxima simulada por CR2MET y la simulada por cada uno de los cuatro GCMs, durante el período histórico.	44
Figura 5.9: Series anuales de temperatura máxima simuladas por cada uno de los cuatro GCMs escalados, entre los años 1979 – 2060.	46
Figura 5.10: Boxplots de las series anuales de temperatura mínima simuladas por el producto grillado CR2MET y los cuatro GCMs, durante el período histórico.	47
Figura 5.11: Comparación de las curvas de duración entre la temperatura mínima diaria simulada por CR2MET y la simulada por cada uno de los cuatro GCMs escalados, durante el período histórico.	48
Figura 5.12: Comparación de las curvas de variación estacional entre la temperatura mínima simulada por CR2MET y la simulada por cada uno de los cuatro GCMs, durante el período histórico.	49
Figura 5.13: Series anuales de temperatura mínima simuladas por cada uno de los cuatro GCMs escalados, entre los años 1979 – 2060.	51
Figura 6.1: Curvas de duración observada en cada cuenca y comparación con las simulaciones asociadas a las funciones objetivo empleadas en calibración.	56
Figura 6.2: Curvas de variación estacional observada en cada cuenca y comparación con las simulaciones asociadas a las funciones objetivo empleadas en calibración. Modelo GR4J y CemaNeige.	57
Figura 6.3: Comparación entre serie de caudales observados y simulados con la mejor calibración (izquierda), y evolución temporal del almacenamiento de los estanques de producción (centro) y ruteo (derecha) en cada simulación escogida.	58
Figura 6.4: Series de escorrentía anual durante el período base en la cuenca del Río Claro en los Queñes, comparación entre modelos hidrológicos GR4J y VIC.	60
Figura 6.5: Curvas de duración de escorrentía diaria durante el período base en la cuenca del Río Claro en los Queñes, comparación entre modelos hidrológicos GR4J y VIC.	60
Figura 6.6: Curvas de variación estacional de escorrentía promedio mensual durante el período base en la cuenca del Río Claro en los Queñes, comparación entre modelos hidrológicos GR4J y VIC.	61
Figura 6.7: Serie anual y curvas de duración y variación estacional de la simulación de caudales del modelo climático IPSL en la cuenca del Río Claro en los Queñes.	62
Figura 6.8: Series de escorrentía anual durante el período base en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos, comparación entre modelos hidrológicos GR4J y VIC.	64

Figura 6.9: Curvas de duración de escorrentía diaria durante el período base en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos, comparación entre modelos hidrológicos GR4J y VIC.	64
Figura 6.10: Curvas de variación estacional de escorrentía mensual promedio durante el período base en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos, comparación entre modelos hidrológicos GR4J y VIC.	65
Figura 6.11: Serie de caudal medio anual, curvas de duración de caudal medio diario y variación estacional promedio de la simulación de caudales del modelo climático CSIRO en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos.....	66
Figura 6.12: Series de escorrentía anual durante el período base en la cuenca del Río Palos en junta con Colorado, comparación entre modelos hidrológicos GR4J y VIC.....	68
Figura 6.13: Curvas de duración de caudal medio diario durante el período base en la cuenca del Río Palos en junta con Colorado; comparación entre modelos hidrológicos GR4J y VIC.	68
Figura 6.14: Curvas de variación estacional de escorrentía durante el período base en la cuenca del Río Palos en junta con Colorado, comparación entre modelos hidrológicos GR4J y VIC.	69
Figura 6.15: Serie de caudales medios anuales, curvas de duración de caudales medios diarios y variación estacional promedio de la simulación de caudales del modelo climático MIROC en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos.....	70
Figura A.1: Gráficos de dispersión entre la temperatura máxima observada en las estaciones meteorológicas de la zona de estudio y la precipitación simulada por CR2MET en los respectivas pixeles de cada estación.	70
Figura A.2: Curvas de variación estacional de temperatura máxima en estación Curicó.	80
Figura A.3: Curvas de variación estacional de temperatura máxima en estación Potrero Grande.	81
Figura A.4: Gráficos de dispersión entre la temperatura mínima observada en las estaciones meteorológicas de la zona de estudio y la precipitación simulada por CR2MET en los respectivas pixeles de cada estación.....	81
Figura A.5: Curvas de variación estacional de temperatura mínima en estación Curicó.	82
Figura A.6: Curvas de variación estacional de temperatura mínima en estación Potrero Grande.	82
Figura A.7: Gráficos de dispersión, línea 1:1 y valor de R^2 entre la precipitación en las estaciones meteorológicas de la zona de estudio y la precipitación simulada por CR2MET en los respectivas pixeles de cada estación.	83
Figura A.8: Curvas de variación estacional de precipitación en estación El Manzano.....	84
Figura A.9: Curvas de variación estacional de precipitación en estación Fundo el Radal.....	84
Figura A.10: Curvas de variación estacional de precipitación en estación Monte Oscuro.	85
Figura A.11: Curvas de variación estacional de precipitación en estación Potrero Grande.....	85
Figura A.12: Curvas de variación estacional de precipitación en estación Agua Fría.	86
Figura A.13: Distribución mensual de los valores máximos anuales de precipitación observados y simulados por CR2MET en estación El Manzano, durante el período 1985 - 2015.	86
Figura A.14: Distribución mensual de los valores máximos anuales de precipitación observados y simulados por CR2MET en estación Fundo el Radal, durante el período 1993 - 2015.	87
Figura A.15: Distribución mensual de los valores máximos anuales de precipitación observados y simulados por CR2MET en estación Monte Oscuro, durante el período 1995 - 2015.....	87
Figura A.16: Distribución mensual de los valores máximos anuales de precipitación observados y simulados por CR2MET en estación Potrero Grande, durante el período 1985 - 2015.	88
Figura A.17: Distribución mensual de los valores máximos anuales de precipitación observados y simulados por CR2MET en estación Agua Fría, durante el período 1993 - 2015.....	88

Figura B.1: Series anuales de precipitación simulada por el producto grillado CR2MET y por cada uno de los cuatro GCMs escalados, durante el período 1985 – 2015.....	90
Figura B.2: Series anuales de temperatura máxima simulada por el producto grillado CR2MET y por cada uno de los cuatro GCMs escalados, durante el período 1985 – 2015.	92
Figura B.3: Series anuales de temperatura mínima simulada por el producto grillado CR2MET y por cada uno de los cuatro GCMs escalados, durante el período 1985 – 2015.	94
Figura C.1: Mediana del número de días con precipitación mayor a 0,5 mm al año en cada píxel de la cuenca del Río Claro en los Queñes.	95
Figura C.2: Mediana del número de días con precipitación mayor a 0,5 mm al año en cada píxel de la cuenca del Río Colorado en junta con Palos.....	96
Figura C.3: Mediana del número de días con precipitación mayor a 0,5 mm al año en cada píxel de la cuenca del Río Palos en junta con Colorado.....	97
Figura C.4: Mediana de temperatura máxima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Claro en los Queñes.	98
Figura C.5: Mediana de temperatura máxima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Colorado en junta con Palos.	99
Figura C.6: Mediana de temperatura máxima diaria en cada píxel de la cuenca del Palos en junta con Colorado.....	100
Figura C.7: Mediana de temperatura mínima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Claro en los Queñes.	101
Figura C.8: Mediana de temperatura mínima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Colorado en junta con Palos.	102
Figura C.9: Mediana de temperatura mínima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Palos en junta con Colorado.....	103
Figura C.10: Mediana del número de días con precipitación mayor a 0,5 mm al año en cada píxel de la cuenca del Río Claro en los Queñes.....	104
Figura C.11: Mediana del número de días con precipitación mayor a 0,5 mm al año en cada píxel de la cuenca del Río Colorado en junta con Palos.....	105
Figura C.12: Mediana del número de días con precipitación mayor a 0,5 mm al año en cada píxel de la cuenca del Río Palos en junta con Colorado.....	106
Figura C.13: Mediana de temperatura máxima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Claro en los Queñes.....	107
Figura C.14: Mediana de temperatura máxima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Colorado en junta con Palos.	108
Figura C.15: Mediana de temperatura máxima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Palos en junta con Colorado.....	109
Figura C.16: Mediana de temperatura mínima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Claro en los Queñes.....	110
Figura C.17: Mediana de temperatura mínima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Colorado en junta con Palos.	111
Figura C.18: Mediana de temperatura mínima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Palos en junta con Colorado.....	112
Figura D.1: Curvas de duración de escorrentía asociadas a cada GCM en la cuenca del Río Claro en los Queñes, comparación período base y proyecciones de RCP 4.5 y RCP 8.5.	113

Figura D.2: Curvas de duración de escorrentía asociadas a cada GCM en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos, comparación período base y proyecciones de RCP 4.5 y RCP 8.5.	114
Figura D.3: Curvas de duración de escorrentía asociadas a cada GCM en la cuenca del Río Palos en junta con Colorado, comparación período base y proyecciones de RCP 4.5 y RCP 8.5... ..	114
Figura D.4: Curvas de variación estacional de escorrentía asociadas a cada GCM en la cuenca del Río Claro en los Queñes, comparación período base y proyecciones de RCP 4.5 y RCP 8.5.	115
Figura D.5: Curvas de variación estacional de escorrentía asociadas a cada GCM en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos, comparación período base y proyecciones de RCP 4.5 y RCP 8.5.	115
Figura D.6: Curvas de variación estacional de escorrentía asociadas a cada GCM en la cuenca del Río Palos en junta con Colorado, comparación período base y proyecciones de RCP 4.5 y RCP 8.5.	116
Figura D.7: Series anuales completas de escorrentía asociadas a cada GCM en la cuenca del Río Claro en los Queñes, se muestran resultados por modelo hidrológico y escenario proyectado.	117
Figura D.8: Series anuales completas de escorrentía asociadas a cada GCM en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos, se muestran resultados por modelo hidrológico y escenario proyectado.....	118
Figura D.9: Series anuales completas de escorrentía asociadas a cada GCM en la cuenca del Río Palos en junta con Colorado, se muestran resultados por modelo hidrológico y escenario proyectado.....	119

Capítulo 1: Introducción

1.1. Motivación

El cambio climático se puede entender como una variación estadística importante en el estado del clima que persiste durante un largo periodo, el cual se puede deber tanto a procesos naturales internos o a forzantes externas (IPCC, 2014). En las últimas décadas se han evidenciado importantes variaciones en el clima de Chile Central, tales como disminución de precipitaciones y aumentos de temperatura, eventos que se han visto relacionadas con el incremento en la emisión de gases de efectos invernadero (GEI). En ese contexto, es que el Panel Internacional de Cambio Climático (IPCC), dentro de su quinto informe (AR5, 2013), elaboró distintos escenarios asociados al comportamiento futuro del clima, los cuales son conocidos como Trayectorias Representativas de Concentración (o RCP, por sus siglas en inglés) y que han sido ampliamente utilizados en estudios científicos del tema.

Los recursos hídricos son especialmente susceptibles a los efectos que puede producir el cambio climático. Para estudiar este impacto, se utilizan Modelos de Circulación Global (o GCM), los cuales simulan variables meteorológicas en una grilla global. Sin embargo, debido a que cada celda de la grilla tiene dimensiones que resultan demasiado extensas para el estudio a nivel de cuenca (~ 100-250 km), muchas veces se requiere aplicar técnicas de escalamiento espacial, conocidas en la literatura científica como *downscaling*. Los resultados escalados de estos modelos sirven de entrada para alimentar a modelos hidrológicos, los cuales permiten proyectar a corto, mediano y largo plazo la respuesta hidrológica futura de las cuencas y, por lo tanto, se convierten en una importante herramienta para la toma de decisiones en el uso y gestión del recurso hídrico.

Los primeros estudios de cambio climático en el país datan de finales del siglo pasado, destacándose los estudios de King (1970) y D’Arcangeli (1997), en los cuales se estudiaba la tendencia de variables meteorológicas como temperatura y precipitaciones en los registros de estaciones de Chile Central. Posteriormente, los estudios de López (2001) y CONAMA (2006), entre otros, serían los primeros en realizar proyecciones a futuro de variables hidro-meteorológicas y en analizar el efecto de estos cambios sobre la disponibilidad de recursos hídricos. Siguiendo esta línea, Figueroa (2008) y Mena (2009) estudiaron el impacto que tendría el cambio climático sobre cuencas de Chile Central, incorporando en su trabajo a los escenarios climáticos definidos por el informe SRES del IPCC y utilizando modelos de circulación global (GCM), como el HadCM3, y modelos hidrológicos como WEAP.

Más recientemente, y luego de que el IPCC definiera nuevos escenarios de cambio climático, se han desarrollado diversos estudios que actualizan las forzantes meteorológicas empleadas e incorporan nuevas técnicas de escalamiento espacial y modelos hidrológicos. Entre ellos destacan los trabajos de Gómez (2013), DGA (2017) y Ricchetti (2018), el cual además considera el efecto de la no estacionariedad en series hidro-meteorológicas y la corrección de sesgo estadístico, por medio del método Quantile Delta Mapping (Cannon *et al.*, 2015).

Los impactos que el cambio climático podría tener sobre los recursos hídricos de las zonas Norte y Centro de Chile son diversos y algunos de ellos ya han comenzado a manifestarse. Una evidencia

de ello son el aumento de la temperatura media anual de 0,25 °C por década (Falvey & Garreaud, 2009) y el sostenido déficit de precipitaciones de hasta 65 mm por década experimentados en los valles interiores de Chile Central, de los cuales se tiene registro desde la década de 1970 (Boiser *et al.*, 2016). Debido a esto, es que resulta de gran interés y relevancia contar con proyecciones sobre los posibles efectos que el cambio climático tendría sobre los recursos hídricos de las cuencas de esta zona.

Dentro de las cuencas hidrográficas que podrían verse mayormente afectadas en el país debido al cambio climático, destaca la del Río Mataquito y sus afluentes, en la cual el proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) proyecta cambios negativos en los valores de precipitación anual promedio, descensos significativos en la escorrentía y un incremento en la evapotranspiración. Además, recientemente se han registrado mínimos históricos de escorrentía en esta cuenca, como lo ocurrido durante las primeras semanas de enero de 2020, donde el caudal llegó a un 0,4% de sus valor promedio (Radio Cooperativa, 2020).

Finalmente, debe notarse que una disminución, tanto en las precipitaciones como en los caudales de las subcuencas asociadas a este río, afectarían a un gran número de comunidades, ecosistemas y sectores de la economía que dependen fuertemente del agua, como es el caso de la agricultura, la producción de agua potable y la industria forestal, actividades que tienen un importante desarrollo en esta zona de la región del Maule.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General:

El objetivo principal de este trabajo consiste en estimar la disponibilidad futura de recursos hídricos en tres cuencas en régimen natural ubicadas en la zona alta de la cuenca del río Mataquito, bajo los escenarios de emisión RCP 8.5 y RCP 4.5 y mediante la implementación de dos modelos hidrológicos.

1.2.2. Objetivos Específicos:

- Realizar un escalamiento espacial y no estacionario de las forzantes meteorológicas en la cuenca del Río Mataquito para los escenarios de emisiones RCP 8.5 y RCP 4.5.
- Calibrar e implementar los modelos de simulación hidrológica GR4J y VIC en las cuencas en régimen natural del Alto Mataquito que cuenten con información disponible.
- Analizar el impacto que tiene la utilización de una determinada resolución espacial de las forzantes sobre el proceso de modelación hidrológica.
- Comparar los resultados que se obtienen al considerar dos escenarios diferentes de emisiones y dos modelos hidrológicos que presentan diferentes conceptualizaciones de los procesos físicos en las cuencas.

1.3. Estructura del Informe

El presente documento se encuentra organizado en capítulos, descritos brevemente a continuación:

- En el Capítulo 2 se realiza una revisión de antecedentes bibliográficos, con el fin de introducir el estado del arte en las temáticas abordadas en la memoria. Entre los temas abordados se considera: Cambio Climático, Modelos de Circulación Global, metodologías de *downscaling* estadístico, modelos hidrológicos y estudios previos relevantes.
- En el Capítulo 3 se describe la metodología empleada en las distintas etapas que involucró el desarrollo de la presente memoria, con énfasis en la implementación del método Quantile Delta Mapping (QDM) y en la calibración y simulación de los modelos hidrológicos GR4J y VIC.
- En el Capítulo 4 se realiza una caracterización de la zona de estudio, considerando aspectos geográficos, topográficos, climáticos e hidrológicos. Además, se presenta y caracteriza la información hidrometeorológica y pluviométrica disponible desde estaciones cercanas.
- En el Capítulo 5 se presentan los principales resultados obtenidos en el proceso de escalamiento espacial de forzantes climáticas, tanto para el período histórico de calibración (1979 – 2015), como en el período de proyección futura (2030 – 2060).
- En el Capítulo 6 se muestran los resultados obtenidos durante el proceso de calibración y simulación de escenarios de los modelos hidrológicos GR4J y VIC en las tres cuencas consideradas en el presente trabajo.
- En el Capítulo 7 se mencionan las principales conclusiones obtenidas a partir de los resultados del trabajo realizado, además de presentar recomendaciones para futuros trabajos de investigación.

Capítulo 2: Revisión Bibliográfica

En este capítulo se realiza una discusión del estado del arte en materia de modelación hidrológica bajo escenarios de emisiones, con un especial énfasis en publicaciones e investigaciones nacionales. En particular, los aspectos abordados son:

- La problemática del Cambio Climático y escenarios proyectados hasta la fecha.
- Modelos de Circulación Global y la necesidad de aplicar un escalamiento espacial.
- Modelos hidrológicos: definición, clasificación, evaluación y algunos ejemplos.
- Revisión de estudios de modelación hidrológica recientes en Chile.

2.1. Cambio Climático

Si bien existen numerosas definiciones de uso común del concepto de clima, la Organización Meteorológica Mundial lo considera como un estado promedio del tiempo atmosférico en determinado lugar, por un periodo de tiempo que generalmente comprende 30 años (WMO, 2016). En vista de que el clima es un promedio estadístico, está sujeto a importantes variaciones espaciales y temporales, siendo estas últimas las que dan cuenta del fenómeno de cambio climático. En ese sentido, el cambio climático podría considerarse como un proceso que ha ocurrido anteriormente de forma natural dentro del sistema climático del planeta.

Sin embargo, desde hace algunas décadas diversos estudios científicos han dado cuenta de que la actividad antrópica ha contribuido a acelerar significativamente este proceso, por medio de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), ligada a la quema de combustibles fósiles, y a los cambios en el uso de suelo. Estas actividades han tenido un gran incremento a nivel mundial desde la segunda revolución industrial, a mediados del siglo XIX (IPCC, 2014).

Un aumento importante de las concentraciones de GEI en la atmósfera ha traído como consecuencia una alteración en su composición química, cambiando su capacidad de absorción de la radiación de onda larga proveniente desde la superficie, lo que se traduce en un desbalance energético positivo y en un acentuamiento del Efecto Invernadero. La intensificación de este último fenómeno trae como consecuencia un aumento en la temperatura media del planeta y, por lo tanto, diversos impactos sobre el clima y el ciclo hidrológico a nivel global; como por ejemplo cambios en regímenes hidrológicos de las cuencas, aumento del nivel del mar, disminución de la masa de hielo en las áreas polares, alteraciones en las precipitaciones, entre otras (Gómez, 2015).

Frente a esta situación, desde la primera década del siglo XXI la Organización de las Naciones Unidas, a través del Panel Internacional de Cambio Climático (IPCC), ha realizado esfuerzos con el fin de caracterizar apropiadamente las proyecciones de cambio climático. Muestra de ello han sido los Informes de Cambio Climático elaborados por el IPCC, en los cuales se desarrollan distintos escenarios de proyección de emisiones atmosféricas.

En particular, para la elaboración del cuarto informe de cambio climático (AR4, 2007) el IPCC incorporó diferentes proyecciones de aumento demográfico, tecnológico y económico, las cuales fueron finalmente resumidas en cuatro escenarios conocidos como “Reporte Especial sobre Escenarios de Emisiones” (o escenarios SRES, por sus siglas en inglés). En la Figura 2.1 se muestra un esquema de estos escenarios.

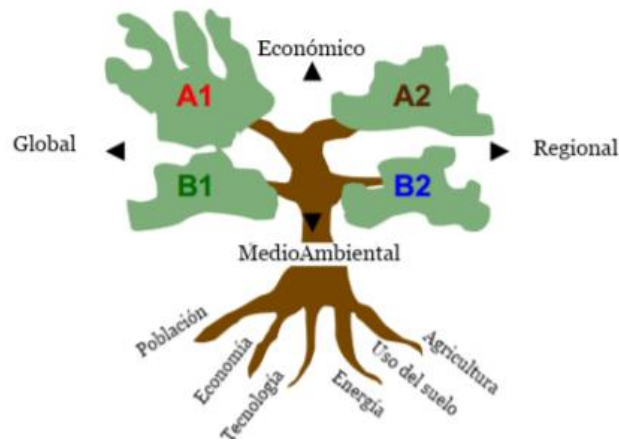


Figura 2.1: Esquema explicativo de los escenarios SRES. Fuente: Gómez (2013).

Más recientemente, en el contexto del quinto informe de cambio climático (AR5, 2013), se consideraron nuevos escenarios, los cuales ya no se centran en la definición de proyecciones sociales y económicas, sino que ponen el énfasis en los efectos prácticos que tendrán las emisiones sobre el sistema climático, tomando como base el incremento de la forzante radiativa en la atmósfera. En particular, se crean cuatro escenarios de emisión denominados “Trayectorias Representativas de Concentración” o RCP, en donde cada escenario va acompañado de un número que indica el aumento de la forzante de radiación en $[W/m^2]$. Estos escenarios incorporan una mayor cantidad de información, considerando la interacción con la vegetación, el ciclo del carbono y una mejor representación de la química atmosférica (Taylor *et al.*, 2012). En la Tabla 2.1 se muestra en forma resumida las principales características de cada escenario, mientras que en la Figura 2.2 se presenta la trayectoria anual de emisiones atmosféricas de CO_2 que considera cada escenario RCP.

Tabla 2.1: Características y comportamiento de cada escenario de emisión RCP. Fuente: IPCC (2014).

Escenario	Forzante Radiativa [W/m^2]	Concentración CO_2 [ppm]	Comportamiento
RCP 2.6	3 en el <i>peak</i> , luego descenso	490 en <i>peak</i> , luego descenso	<i>Peak</i> y luego disminución
RCP 4.5	~ 4,5 hacia el año 2100	~ 650 hacia el año 2100.	Estabilización sin <i>peak</i>
RCP 6.0	~ 6 hacia el año 2100.	~ 850 hacia el año 2100.	Estabilización sin <i>peak</i>
RCP 8.5	> 8,5 hacia el año 2100	> 1370 en 2100	Creciente

El aumento en la forzante radiativa de cada escenario RCP va asociado a un aumento en la temperatura global promedio del planeta y a un grado de perturbación diferente en otras variables meteorológicas, como la ocurrencia e intensidad de precipitaciones. Es así como en el escenario RCP 2.6 se proyecta un incremento de la temperatura global de $1^\circ C$ hacia el año 2100, mientras que en el escenario RCP 8.5 se pronostican aumentos de hasta $4^\circ C$ en la temperatura global en el mismo período (IPCC, 2013).

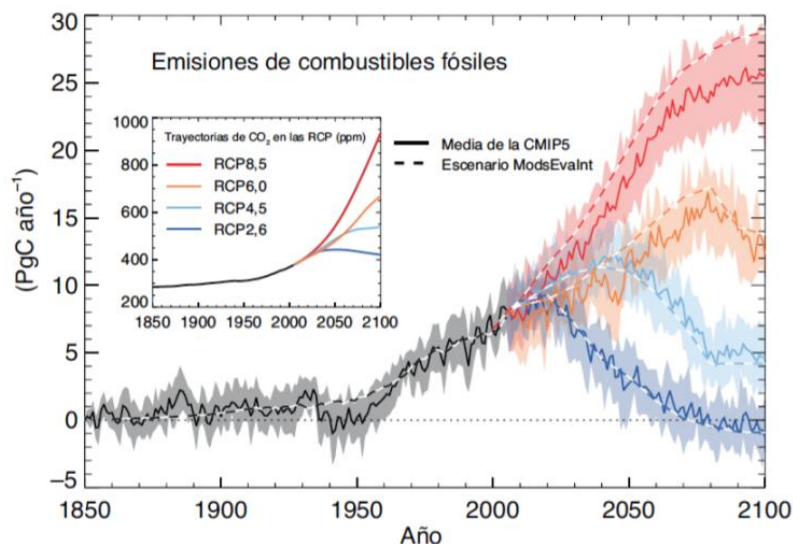


Figura 2.2: Trayectoria de emisiones de CO₂ en los escenarios RCP. Fuente: IPCC (2014).

Por otra parte, independiente del escenario futuro proyectado, se ha mostrado que existe una relación entre el incremento en la concentración de GEI y la intensificación del ciclo hidrológico a una escala global, como respuesta al aumento de temperatura, humedad e intensidad de precipitaciones (DGA, 2018).

A pesar de esto, los cambios en precipitaciones no son uniformes en todo el planeta y existen numerosas regiones que presentan tendencia hacia un clima más seco. La mayoría de ellas se encuentran en zonas subtropicales, como es el caso de las zonas Norte y Centro de Chile, las cuales hoy en día ya presentan limitados recursos hídricos y, por lo tanto, son vulnerables a los efectos que pueda tener el cambio climático. Muestra de esta situación han sido los impactos socio-económicos y ecológicos provocados por la prolongada sequía que ha afectado a numerosas cuencas entre las regiones de Coquimbo y la Araucanía desde el año 2010, con déficits de precipitación anual cercanos al 30% (CR2, 2015).

Algunos estudios recientes han evidenciado cambios importantes en la temperatura y precipitación promedio de las últimas décadas en Chile, vinculando dichos cambios con señales de Cambio Climático. En particular, en Falvey & Garreaud (2009) se muestra que, contrario a la tendencia global, ha existido una disminución en la temperatura media de 0,2 °C/década en los sectores costeros del Norte de Chile, mientras que en los valles interiores y zonas precordilleranas de Chile central registran aumentos de temperatura de 0,25 °C/década. En la misma línea, en Boisier *et al.* (2016) se identifica que las causas de la tendencia negativa en precipitaciones de Chile central tienen un origen tanto natural como antrópico, atribuyéndose a este último aproximadamente un tercio de la señal total de cambio. Por otra parte, en Garreaud (2011) se generan proyecciones de precipitaciones en las cumbres andinas, las cuales evidencian un contraste entre la ladera oriental (Argentina), en donde se espera un incremento de precipitaciones, y la ladera occidental (Chile continental y Océano Pacífico), donde se proyectan disminuciones que incluso pueden llegar a valores entre la mitad y un cuarto del valor actual.

2.2. Modelos de Circulación Global (GCM)

Un Modelo de Circulación Global tiene como fin simular el clima de la Tierra mediante la resolución de ecuaciones matemáticas que describen la dinámica de los procesos atmosféricos (USAID, 2014). Dichas ecuaciones, entre otras, corresponden a un balance de masa, momentum y energía. Cada una de ellas se resuelve para cada una de las celdas de una grilla, las cuales poseen una cierta resolución horizontal, en un nivel de presión (altitudinal) dado, cubriendo la totalidad de la superficie terrestre. Los GCMs pueden describir la climatología pasada y presente, así como proyectar cambios hacia el futuro considerando a los diferentes escenarios de emisión RCP. La resolución temporal de estos modelos es bastante variable, abarcando desde modelaciones anuales hasta a nivel subdiario; asimismo, la resolución horizontal también puede variar desde 500 km hasta 100 km, aproximadamente.

Actualmente se han desarrollado más de treinta GCMs a nivel mundial. Debido a la alta capacidad computacional requerida al trabajar con todos ellos conjuntamente, es común que en la mayoría de los estudios de cambio climático solo se considere un subconjunto de GCMs del total disponible. Para efectuar dicha selección, se deben establecer criterios que permitan comparar y clasificar las simulaciones históricas de cada modelo con respecto a los datos observados en las estaciones. Los criterios comúnmente considerados son: representación de la estacionalidad de variables climáticas, representación de la variabilidad y el grado de representatividad del modelo al compararse respecto a un ensamble de simulaciones de todos los GCMs evaluados (ERIDANUS, 2016).

Desde la última década, el uso de GCMs para las proyecciones futuras de forzantes meteorológicas ha sido de amplia consideración en estudios de recursos hídricos en Chile. Muestra de ello es el uso del modelo global HadCM3 y el modelo regional PRECIS en los trabajos de CONAMA (2006), Figueroa (2008) y Morales (2012). De manera más reciente, destaca la metodología utilizada por DGA (2017) en donde se seleccionó un conjunto GCMs considerando los siguientes tres criterios:

1. Respuesta regional a modos globales de variabilidad climática: se evaluó la capacidad de reproducir fenómenos climáticos como El Nilo/Oscilación Sur (ENSO) de cada modelo considerado.
2. Sensibilidad climática: hace referencia a la respuesta de todo el sistema climático ante una perturbación de una forzante externa, como el aumento de la concentración de GEI. Los modelos se clasificaron en sensibilidades bajas, medias y altas.
3. Cambios regionales: se evaluaron los cambios proyectados en temperatura y precipitación en Chile para el período 2030 – 2060 en cada modelo considerado.

En base a los criterios previamente mencionados se seleccionaron cuatro GCMs, los cuales son presentados en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Modelos de Circulación Global seleccionados en DGA (2017).

Nombre Modelo	Institución	País	Sensibilidad Climática
CCSM4	National Center for Atmospheric Research	EE. UU.	Baja Moderada
CSIRO-MK3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization	Australia	Baja Extrema
MIROC-ESM	Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute.	Japón	Alta Moderada
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace	Francia	Alta Extrema

2.3 Escalamiento espacial (*Downscaling*)

A escalas globales, hemisféricas o continentales los GCM son capaces de generar simulaciones bastante precisas y confiables. Sin embargo, a un nivel más detallado de representación, como lo es una escala de cuenca o subcuenca, sus resultados tienden a ser erróneos y/o poco representativos del área de estudio. Esto último se acentúa si hay presencia de accidentes geográficos como cordilleras o grandes cuerpos de agua. Debido a esto, se debe tener un especial cuidado a la hora de trabajar con estos modelos, especialmente en el área de la hidrología (Gómez, 2013).

Es en base a esta necesidad que se han desarrollado diversos métodos para refinar la información entregada por los GCM. Este proceso recibe el nombre de escalamiento o *downscaling* y su objetivo es llevar las series de tiempo descritas en el modelo a una escala que sirva en la modelación de cuencas e incluso, en estaciones. Un esquema de este proceso se muestra en la Figura 2.3.

Existen dos tipos de escalamiento: dinámicos y estadísticos. El escalamiento dinámico se basa en la construcción de modelos climáticos regionales (RCMs), donde se utilizan como condición de borde las simulaciones de los GCMs. Estos modelos tienen la ventaja de modelar de forma completa la dinámica de la atmósfera, sin embargo, tienen un costo computacional elevado. Por otra parte, el escalamiento estadístico permite adecuar la información proveniente de los GCM utilizando como base a las observaciones de una red de estaciones hidrometeorológicas o un producto observacional grillado, ajustando completamente las distribuciones estadísticas de éstas (Hamlet *et al.*, 2010). A diferencia del *downscaling* dinámico, este último método resulta ser de una implementación mucho más sencilla y práctica.

En la aplicación del *downscaling* estadístico sobre una grilla en el espacio, es común otorgar más peso a aquellos nodos del modelo global que se encuentren más próximos y, por lo tanto, un menor peso a los nodos más lejanos. Para efectuar este proceso, existen varios enfoques, como por ejemplo la ponderación por el inverso de la distancia (*IDW*, *Inverse Distance Weight*) o la interpolación bilineal. Adicionalmente, desde el punto de vista estadístico, también es importante ajustar las variables simuladas por los GCM a la escala local simulada. Esto es posible de realizar mediante

diversas metodologías, entre las que se encuentra la Corrección de Sesgo (*Bias Correction*), que consiste en comparar los datos observados en estaciones y los obtenidos de la simulación histórica de los GCMs. Basado en esta comparación, el objetivo buscado es lograr que la distribución de probabilidad acumulada de los datos modelados sea similar a la observada en las estaciones.

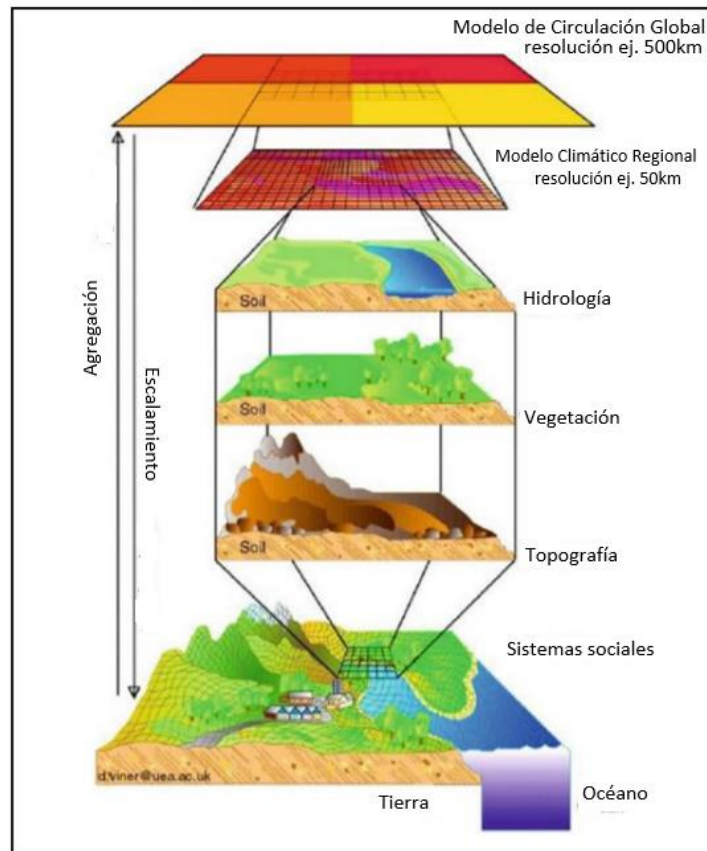


Figura 2.3: Proceso de downscaling entre GCM y resoluciones menores (Adaptado de Trzaska & Schnarr, 2014).

Existen diferentes enfoques para abordar el problema de escalamiento estadístico (los cuales pueden incorporar o no a la corrección de sesgo), entre los que se pueden encontrar métodos basados en “generadores de clima” o *weather generators* (cadenas de Markov, modelos estocásticos, etc) y otros basados en relaciones tipo regresión utilizando a variables atmosféricas o climáticas como predictor (redes neuronales, regresiones lineales generalizadas, análisis de correlación, etc.) (Wilby *et al.*, 2004). En el contexto nacional, se han implementado con éxito diversos métodos de escalamiento estadístico en estudios de cambio climático sobre recursos hídricos (Gómez, 2013; Cepeda, 2017; Ricchetti, 2018), entre los cuales es posible destacar a los siguientes:

1. Método Delta: introduce de manera directa cambios absolutos en temperatura y porcentuales en precipitación, entre la variable de referencia y la proyección futura. Es uno de los métodos más simples de escalamiento estadístico y se basa únicamente en un análisis de sensibilidad climática, sin considerar los cambios temporales en aspectos como la varianza y los extremos de la distribución de frecuencia de la variable evaluada. Sin embargo, en algunos casos sus resultados permiten generar una aproximación razonable (Ramírez y Jarvis, 2010).

2. Quantile Mapping (QM): es un método estadístico no paramétrico que se basa en el ajuste de la función de distribución acumulada de las observaciones históricas de una variable y en el uso de funciones de transferencia. A diferencia del método anterior, esta técnica considera los cambios temporales en los cuantiles de toda la distribución de probabilidad de la variable evaluada, por lo que es efectiva en remover y corregir sesgos asociados a las observaciones, pero tiene el inconveniente de amplificar o atenuar de manera significativa los cambios futuros de los valores más extremos. Además, a esto debe sumarse que al ser un método esencialmente estadístico de post-procesamiento, considera que el clima se comporta de manera estacionaria, es decir, que las características propias del período históricas persistirán en el futuro (Cannon *et al.*, 2015). Este enfoque ha sido aplicado con éxito en algunos estudios en Chile, entre los que se puede destacar a ERIDANUS (2016) y Ricchetti & Vargas (2017).

3. Quantile Delta Mapping (QDM): método alternativo que supera algunas de las falencias del método QM. Fue propuesto por Cannon *et al.* (2015) y se caracteriza por preservar los cambios absolutos (temperatura) o relativos (precipitación) en cada cuartil de la distribución acumulada, mientras simultáneamente corrige sistemáticamente los sesgos en la distribución de frecuencia de la variable simulada, respecto a la variable de referencia. La Figura 2.4 ilustra la metodología de esta técnica, en la cual primeramente se construyen las funciones de distribución acumulada asociadas a la referencia o datos observados (curva azul) y las simulaciones del modelo climático, tanto para el período presente (curva verde) como futuro (curva roja). Luego, por medio de funciones de transferencia y para cada cuantil de probabilidad acumulada, se obtiene una distancia d entre las curvas simulada y la de referencia, la cual será utilizada para desplazar la curva futura de la proyección, obteniendo finalmente la corrección (línea segmentada).

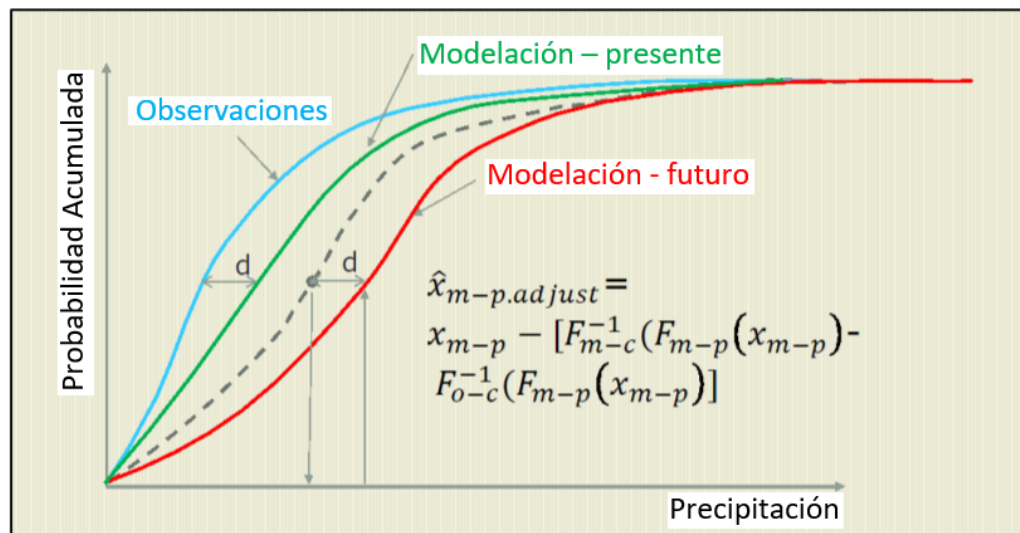


Figura 2.4: Esquema del método Quantile Delta Mapping (Adaptado de Salas & Obeysekera, 2016).

En la Figura 2.5 se ejemplifican los resultados del uso de las técnicas de escalamiento descritas, para un caso hipotético de simulación de temperaturas en un período presente o histórico (curva azul) y uno futuro (curva roja), respecto a un conjunto de referencia (curva negra). Se puede observar que el método Delta genera distribuciones irreales de la variable simulada. Por otra parte, el método QM logra realizar un buen ajuste en la distribución de la variable, pero amplifica los cambios temporales en la media entre un período y otro. Finalmente, es posible apreciar que el

método QDM es capaz de lograr un buen ajuste entre la variable simulada y la distribución de referencia y, simultáneamente, mantener los cambios en el tiempo en cada uno de los cuantiles de la distribución.

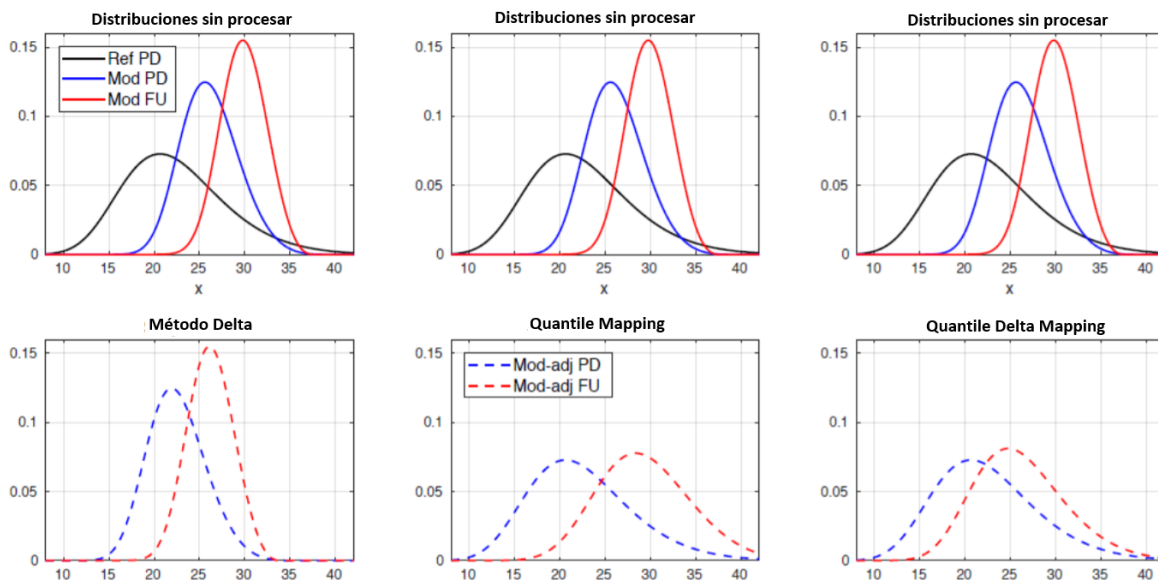


Figura 2.5: Comparación entre las distintas técnicas de downscaling para una distribución de frecuencia de una variable. La curva negra representa la variable de referencia (observaciones), mientras que las curvas azules y rojas representan las variables modeladas a ajustar en tiempo presente y futuro, respectivamente. Fuente: DGA (2017).

2.4. Modelos Hidrológicos

Un modelo corresponde a una representación de algún fenómeno, por medio de herramientas físicas, matemáticas, conceptuales, estadísticas, entre otras. En el área de la ingeniería civil, los modelos son ampliamente usados en diversas aplicaciones, como el análisis estructural y la hidrología.

Los modelos hidrológicos, generalmente, tienen como finalidad simular y representar los diversos procesos de transporte y acumulación de agua al interior de una cuenca o unidad de respuesta hidrológica, utilizando ecuaciones de base física o relaciones empíricas. En la actualidad existe un gran número de estos modelos que han sido desarrollados por universidades o instituciones científicas y que han sido aplicados en regiones de todo el mundo. En el caso particular de las cuencas de Chile Central, destaca el uso de los modelos WEAP, VIC, GR4J y CHRM (Figuroa, 2008; Marino, 2017; DGA, 2018; Vásquez, 2018).

Por otra parte, en la literatura existen numerosos criterios que permiten clasificar a los modelos hidrológicos, dentro de los cuales se destaca la taxonomía propuesta por Hrachowitz & Clark (2017), que clasifica a estos modelos utilizando los siguientes cuatro criterios:

1. De acuerdo con la simplificación espacial:
 - a. Espacialmente distribuido: el sistema representa explícitamente la heterogeneidad espacial en el dominio de estudio por medio de una grilla en la que cada unidad tiene características

- geomorfológicas propias. Los modelos pueden ser totalmente distribuidos o semidistribuidos.
- b. Concentrados: el sistema corresponde a una única entidad, considerando homogéneas todas las características geomorfológicas al interior de ella, así como las forzantes y los parámetros del modelo.
2. De acuerdo con la simplificación del sistema:
 - a. De base física: intentan representar explícitamente la mayor cantidad posible de procesos hidrológicos en la cuenca por medio de leyes físicas conocidas.
 - b. Conceptuales: utilizan una representación matemática simplificada de los procesos hidrológicos, estudiándolos desde la macroescala.
 3. De acuerdo con la arquitectura que emplea el modelo:
 - a. De base continua: utiliza ecuaciones que son desarrolladas en la microescala y aplicados directamente en los elementos individuales del sistema. Debido a esto, son modelos que necesariamente deben estar espacialmente distribuidos
 - b. Tipo estanque: conciben al sistema como uno o más elementos contenedores, que es capaz de recibir y entregar agua. Los modelos concentrados son generalmente de este tipo.
 4. De acuerdo con la estrategia de escalamiento:
 - a. Enfoque *top-down* (o deductivo): busca progresivamente testear y refinar la escala en que en que se conciben y entienden los procesos hidrológicos, comenzando desde la macroescala.
 - b. Enfoque *bottom-up* (o inductivo): buscan generar entendimiento por medio de la agregación de elementos individuales del sistema, comenzando desde la microescala.

Entre los modelos espacialmente distribuidos y concentrados que han sido implementados con anterioridad a cuencas de Chile Central destacan, respectivamente, los modelos VIC y GR4J, los cuales se describen detalladamente a continuación.

2.4.1. Modelo VIC

El modelo *Variable Infiltration Capacity* (VIC) es un modelo hidrológico semidistribuido, de macro-escala y con base física, que fue desarrollado por Xu Liang (Liang *et al.*, 1994) en la Universidad de Washington. Resuelve ecuaciones de balance de agua y energía en celdas, considerando un paso temporal diario o subdiario. Es un modelo unidimensional, que considera flujos de masa y energía solo en la dirección vertical, despreciando los flujos horizontales entre celdas. Por lo tanto, cada una de ellas es simulada independientemente, teniendo como único flujo másico de entrada el proveniente desde la atmósfera (precipitación).

El modelo requiere como variables de entrada a series meteorológicas, tales como precipitación, temperatura del aire, velocidad del viento, humedad relativa, radiación de onda corta y radiación de onda larga. Estas series pueden ser ingresadas a una resolución temporal diaria o subdiaria (por ejemplo, a nivel tri-horario). Por otra parte, las variables de estado corresponden a humedad del suelo, SWE e intercepción en el follaje.

La estructura del modelo consiste en una superficie de follaje y tres capas de suelo. La superficie de follaje modela procesos asociados a la vegetación, como intercepción y evapotranspiración, mientras que las capas de suelo modelan escorrentía superficial, flujo base, evaporación del suelo

y drenaje entre capas. Además, el modelo permite simular la precipitación sólida que se acumula en un manto nival, el cual, según el balance de energía, puede sublimar o derretir (Durán, 2009).

Un aspecto característico del modelo VIC es que permite definir hasta $N+1$ clases diferentes de cobertura en la superficie de follaje, en donde los primeros N términos corresponden a diferentes tipos de vegetación y el término $N+1$ representa al suelo descubierto. No existen restricciones respecto al número máximo de tipos de vegetación, aunque generalmente se recomienda definir un valor de N menor a 10, con el fin de conservar la parsimonia del modelo (Neumann, 2019). Cada una de las clases de vegetación debe presentar parámetros característicos (índice de área foliar, rugosidad de la superficie, etc), los cuales se especifican en los archivos de entrada. Debido a esta razón, los balances energéticos e hidrológicos son calculados de manera independiente para cada tipo de vegetación.

En la Figura 2.6 se presenta un esquema con la estructura del modelo, en la cual se muestra cada uno de los flujos involucrados en el balance hídrico y de energía que se simula en cada una de las celdas, los cuales son los siguientes: precipitación (P), evaporación desde el suelo desnudo (E), evaporación desde capas de suelo (E_i), evaporación de agua interceptada en follaje (E_c), transpiración (L), sublimación (S), radiación de onda larga (R_L), radiación de onda corta (R_s), conducción térmica desde superficie (τG), escorrentía producto del exceso de precipitación (R), flujo base (B), agua infiltrada (i) y traspaso de agua entre capas de suelo (Q).

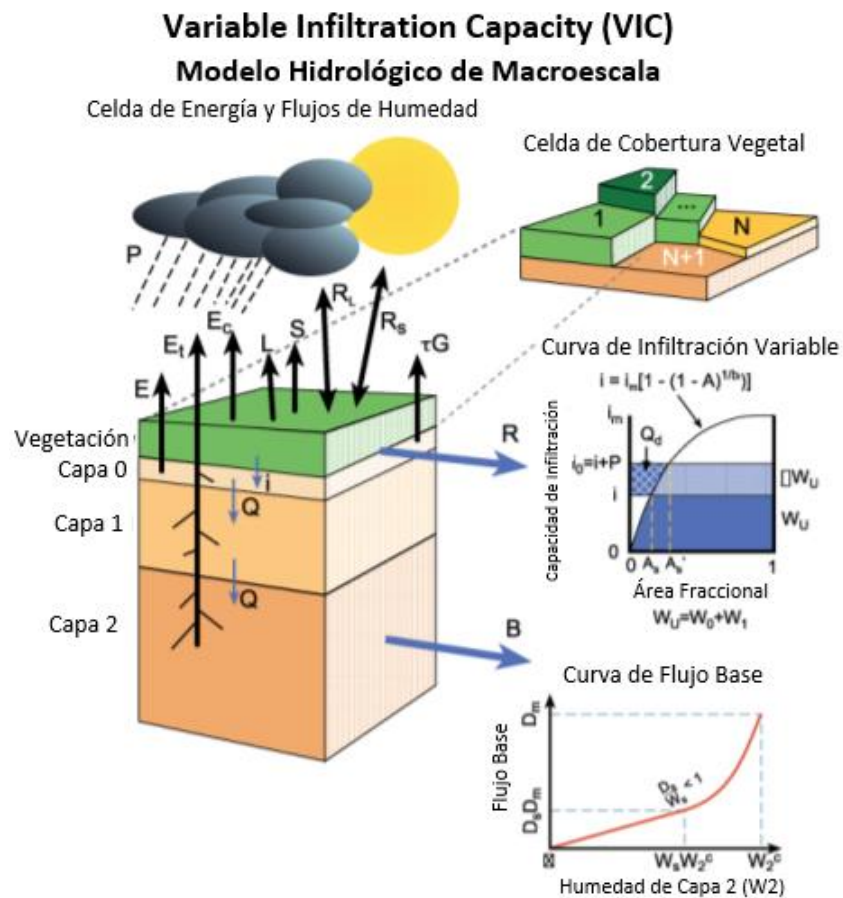


Figura 2.6: Estructura del modelo hidrológico VIC (Adaptado de Gao et al., 2010).

2.4.2. Modelo GR4J

El modelo GR4J fue desarrollado por Perrin *et al.* (2003), y corresponde a un modelo conceptual, concentrado y de tipo estanque que permite simular diariamente y de forma agregada los procesos de precipitación y escorrentía asociada, utilizando cuatro parámetros y dos variables de entrada: precipitación y evapotranspiración potencial. El modelo intenta reproducir los caudales medios diarios de una cuenca de régimen pluvial basándose en una representación simplificada del sistema, para lo cual conceptualiza los siguientes procesos hidrológicos: infiltración, evaporación, flujo superficial y flujo subterráneo (Marino, 2017).

En la Figura 2.7 se presenta la estructura del modelo, incluyendo una descripción de sus parámetros y un esquema de su funcionamiento, el cual involucra la interacción entre dos estanques ficticios (estanques de producción y distribución o ruteo) en los cuales se efectúa un balance hídrico, en donde todos los flujos son expresados en milímetros. Debe notarse que el modelo distribuye la precipitación neta (P_n) ingresada entre los estanques y la salida del sistema por medio de hidrogramas unitarios (UH1 y UH2), los cuales determinan el tiempo de desfase entre el evento de precipitación y la escorrentía resultante (Q). Además, durante el proceso también se consideran pérdidas por percolación (P_{erc}) en el estanque de producción.

Adicionalmente, este modelo puede ser complementado con la introducción del módulo de nieves CemaNeige, el cual, utilizando dos parámetros adicionales y la curva hipsométrica de la cuenca, es capaz de simular la componente nival en los procesos simulados, agregando flujos como precipitación sólida y derretimiento del manto nival.

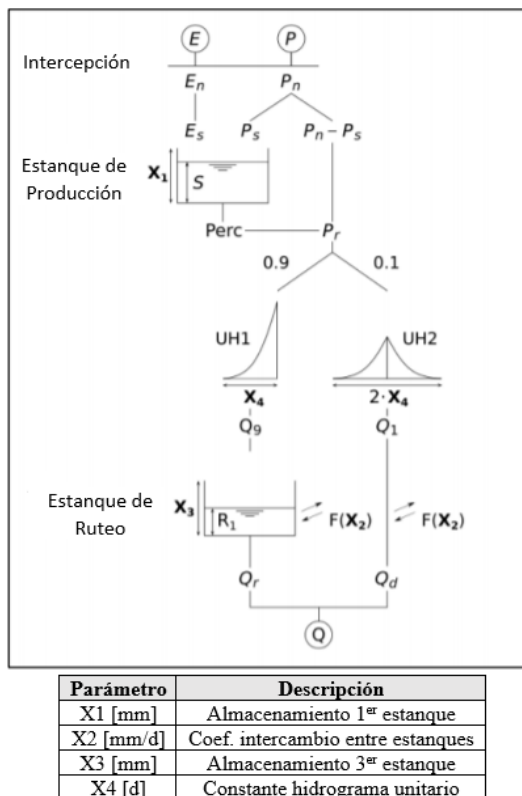


Figura 2.7: Estructura del modelo GR4J (Adaptado de Perrin *et al.*, 2003).

2.4.3. Índices de eficiencia de modelos

Considerando que el objetivo principal de la modelación es recrear adecuadamente las series observadas de alguna variable de interés, es que en la literatura se suelen considerar los denominados “índices de eficiencia”, los cuales tienen como fin evaluar la calidad del ajuste de los resultados de una modelación hidrológica respecto a los valores observados. Adicionalmente, el análisis de estos índices resulta fundamental durante el proceso de calibración de parámetros en modelos hidrológicos.

Uno de los índices comúnmente usados es el criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el cual considera las diferencias entre los caudales modelados y observados, siendo 1 el valor de un ajuste perfecto (Nash & Sutcliffe, 1970). El cálculo de este índice se indica en la ecuación (2.1).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_t^{sim} - Q_t^{obs})^2}{\sum_{t=1}^N (Q_{obs}^{mean} - Q_t^{obs})^2} \quad (2.1)$$

Donde:

$Q_t^{sim} \left[\frac{m^3}{s} \right]$: valor simulado de caudal en el tiempo t.

$Q_t^{obs} \left[\frac{m^3}{s} \right]$: valor observado de caudal en el tiempo t.

$Q_{obs}^{mean} \left[\frac{m^3}{s} \right]$: media de los valores observados de caudal.

En algunos contextos, el criterio de eficiencia NSE puede no reflejar adecuadamente el ajuste logrado en los valores más bajos de caudal, puesto que en su ecuación los valores altos tienen una mayor preponderancia al estar elevados al cuadrado. Frente a esto, una alternativa es emplear una transformación logarítmica de este índice, lo cual permite reducir la dispersión existente entre valores altos y bajos. A esta transformación se le denomina logNSE y su cálculo es presentado en la ecuación (2.2).

$$\logNSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (\log(Q_t^{sim}) - \log(Q_t^{obs}))^2}{\sum_{t=1}^N (\log(Q_{obs}^{mean}) - \log(Q_t^{obs}))^2} \quad (2.2)$$

Sin embargo, algunos autores han alertado sobre algunos contextos en los que el uso de esta métrica no resultaría adecuado. Por ejemplo, el hecho de considerar únicamente a los valores medios observados como referencia puede llevar a una sobreestimación de caudales en cuencas con un régimen hidrológico altamente estacional, como es el caso de cuencas nivales (Knoben *et al.*, 2019). Adicionalmente, dada su construcción, el criterio NSE impide incorporar a otros objetivos en el proceso de calibración, como es el caso de la varianza.

Como alternativa, otro indicador propuesto es el índice de eficiencia de Kling-Gupta o KGE (Gupta *et al.*, 2009), el cual es una métrica multi-objetivo que está basada en una descomposición del

criterio NSE en tres componentes: correlación temporal (r), la variabilidad respecto a flujos medios o volumen (α) y variabilidad respecto a la dispersión (β). El cálculo del índice KGE se señala en la Ecuación (2.3), mientras que en las ecuaciones (2.4), (2.5) y (2.6) se detalla el cálculo de cada una de sus componentes.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (2.3)$$

$$r = \frac{Cov_{Qsim,Qobs}}{\sigma_{Qsim} \cdot \sigma_{Qobs}} \quad (2.4)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_{Qsim}}{\sigma_{Qobs}} \quad (2.5)$$

$$\beta = \frac{\mu_{Qsim}}{\mu_{Qobs}} \quad (2.6)$$

Donde:

$Cov_{Qsim,Qobs}$ [-]: covarianza entre los caudales simulados y observados.

σ_{Qsim} [-]: desviación estándar de los caudales simulados por el modelo hidrológico.

σ_{Qobs} [-]: desviación estándar de los caudales observados.

μ_{Qsim} [-]: media de los caudales simulados por el modelo hidrológico.

μ_{Qobs} [-]: media de los caudales observados.

2.5. Estudios anteriores y antecedentes de modelación hidrológica en Chile

En esta subsección se presenta una breve revisión de algunas publicaciones recientes de interés, en las cuales se realizaron modelaciones hidrológicas en cuencas de la zona Central de Chile y proyecciones futuras considerando diferentes escenarios de cambio climático.

Uno de los primeros estudios que consideró proyecciones futuras en la modelación hidrológica en Chile fue el trabajo de Figueroa (2008), en el cual se evaluó el impacto que tendría el cambio climático sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos en la cuenca del Cachapoal (región de O'Higgins, Chile Central) considerando los escenarios SRES del IPCC y el uso del GCM HadCM3 escalado espacialmente. Los resultados obtenidos indicaron aumentos de los valores promedio de caudales medios mensuales en el período de deshielo y una disminución en los valores del período invernal.

Posteriormente, se pueden citar los trabajos de Gómez (2013), Díaz (2015) y Cepeda (2017), en donde se realizan modelaciones hidrológicas considerando los escenarios RCP del quinto informe de cambio climático del IPCC.

Particularmente, en Gómez (2013) se utilizó el escenario de emisión RCP 6.0 para escalar espacialmente a variables meteorológicas desde los modelos de circulación global MK3.6 y ECHAM5, las cuales sirvieron de entrada para la implementación del modelo hidrológico WEAP calibrado en cuencas del Alto Cachapoal. Se obtuvo como resultados aumentos de temperatura entre 2 °C a 4 °C, cambios en el régimen hidrológico y reducciones tanto en las precipitaciones anuales (en torno a un 20%), como en los caudales medios anuales (entre un 20% y 40%). Por otra parte, en Díaz (2015) se modelaron los hidrogramas de crecidas futuras en una cuenca de la región del Bío-Bío considerando el escenario RCP 8.5 e implementando el GCM MK3.6 y el modelo hidrológico HEC-HMS, obteniendo también reducciones en las precipitaciones, entre valores del 10% y 20%, además de observar aumentos en los caudales máximos instantáneos del orden de 30%. De manera similar, en Cepeda (2017) se utilizan el escenario RCP 8.5, cinco diferentes GCMs y los modelos hidrológicos WEAP y DHSVM para estudiar los caudales nivo-glaciares históricos de la cuenca del Río Olivares, obteniendo aumentos de temperatura media anual entre 1,3 °C y 3 °C, reducción en la precipitación anual entre 33 mm y 93 mm y reducciones en el caudal medio anual entre un 15% y un 46%.

Más recientemente, se encuentran los trabajos de Ricchetti (2018) y DGA (2018), quienes, además de realizar modelaciones hidrológicas considerando escenarios de cambio climático, incorporan el efecto de no estacionariedad en las series hidrometeorológicas simuladas. Específicamente, en Ricchetti (2018) se realiza una comparación entre los resultados obtenidos al considerar estacionariedad, obteniendo diferencias de hasta 1,5 °C y 20% en la serie de temperatura y precipitaciones, respectivamente, lo que da cuenta de la importancia de considerar dicho efecto en las futuras modelaciones.

Es de especial interés considerar el trabajo realizado en el contexto del proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Macrozonas Norte y Centro (DGA, 2018), en el cual se empleó el producto grillado CR2MET, el cual provee forzantes climáticas distribuidas espacialmente en todo el territorio continental del país, para escalar estadísticamente a un conjunto de cuatro GCMs bajo el escenario climático RCP 8.5. Los modelos climáticos escalados fueron utilizados para realizar simulaciones de variables hidrológicas en el modelo VIC, calibrado mediante el algoritmo de optimización global *Shuffled Complex Evolution*, en 43 cuencas en régimen natural de las zonas Norte y Centro del país. Estas simulaciones consideraron a un período histórico (1985-2015) y otro de proyección futura (2030-2060). Adicionalmente, en dicho estudio se consideraron las demandas por riego en zonas agrícolas, el aporte de recursos hídricos de origen glaciar y se realizó una regionalización de parámetros para transferir información a las cuencas no calibradas. Los resultados obtenidos en este trabajo dan cuenta de la oferta hídrica natural que debiesen tener actualmente y en el futuro los principales ríos del territorio nacional, entre los cuales se encuentran aquellos pertenecientes a la cuenca del Río Mataquito.

Dado el contexto brindado por este último trabajo, estudios recientes se han centrado en evaluar las componentes que en mayor medida afectan a los resultados del proceso de modelación hidrológica. Por ejemplo, en Neumann (2019) se analizó el efecto producido al desagregar la precipitación en una escala temporal horaria, en comparación a una escala tri-horaria, en la modelación hidrológica de dos cuencas de la región del Maule en Chile, obteniendo que dicho efecto fue mínimo sobre los hidrogramas simulados.

Capítulo 3: Metodología

La metodología empleada para dar cumplimiento a los objetivos propuestos en el presente trabajo puede agruparse en 5 etapas distintas, esquematizadas en la Figura 3.1.

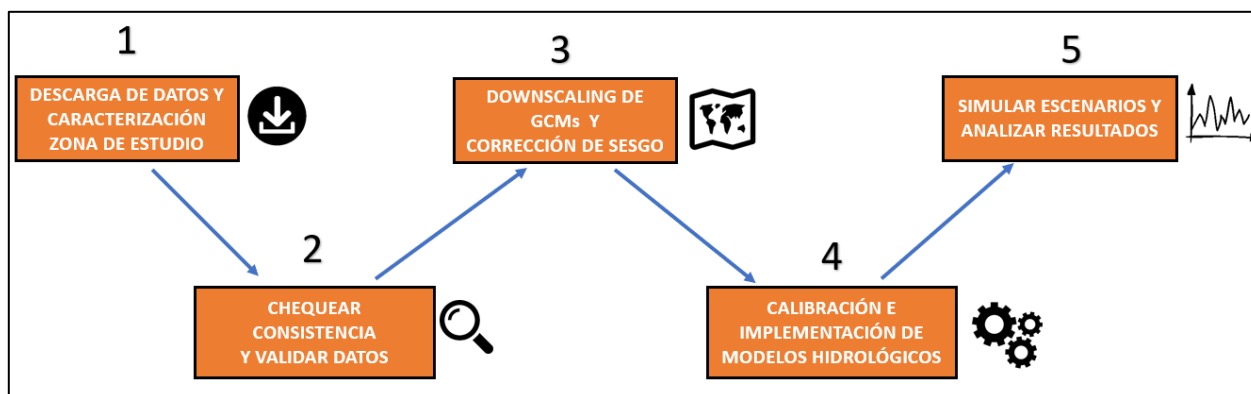


Figura 3.1: Esquema de la metodología general empleada en el presente trabajo.

A continuación, se describe en detalle cada uno de los pasos que compone la metodología:

3.1. Descarga de datos y caracterización de la zona de estudio

Se comienza descargando las forzantes climáticas de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, para cada uno de los cuatro GCMs considerados en la presente memoria: CCSM4, CSIRO-MK3-6-0, IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM¹. En cada caso se descargan las simulaciones históricas y proyectadas en el escenario de emisiones RCP 4.5, desde la plataforma web Copernicus Climate Data Store (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>), la cual cuenta con una base de datos que agrupa las distintas simulaciones efectuadas por GCMs en el contexto del proyecto CMIP5.

De forma simultánea, se descargan las forzantes climáticas provenientes desde el producto grillado CR2MET, en sus versiones 1.4.2 de precipitaciones y 1.3 de temperaturas extremas. Este producto fue elaborado por el Centro del Clima y la Resiliencia (CR)2 de la Universidad de Chile como parte del trabajo realizado en el contexto del proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017). CR2MET se caracteriza por generar una grilla de 800 x 220 celdas entre las latitudes 17°S – 57°S y las longitudes 66°O – 77°O, la cual contienen a la totalidad del territorio de Chile Continental. Cada celda tiene dimensiones de 0,05° x 0,05°, que equivalen a aproximadamente a un área de 5 km x 5 km al ser proyectadas en la zona de estudio de este trabajo (latitud 35° S).

Por otra parte, en esta etapa también se realiza una caracterización de los principales aspectos geográficos, geomorfológicos, hidrológicos y climáticos de las tres cuencas estudiadas. Para esto, se recopila información hidrometeorológica proveniente de observaciones de estaciones meteorológicas y fluviométricas de la DGA y de las plataformas Explorador Climático y CAMELS-CL, ambas desarrolladas por el CR2.

¹ Desde esta sección en adelante, y con el fin de simplificar la notación, solo se utilizarán los prefijos para referirse a cada GCM (CCSM, CSIRO, IPSL y MIROC, respectivamente).

3.2. Chequeo de consistencia y validación de datos de CR2MET

De manera previa a la utilización de la información provista por CR2MET, se realiza un chequeo de consistencia con el fin de contrastar y validar el desempeño de este producto en la representación la climatología de la zona de estudio. Esto se ejecuta comparando directamente los datos de precipitación y temperaturas extremas obtenidos por un grupo de seis estaciones meteorológicas de la DGA, cercanas a las cuencas estudiadas, con sus respectivos pixeles de CR2MET coincidentes.

En el Anexo A se presentan los resultados obtenidos en este proceso, en el cual se hicieron tres tipos de comparaciones:

- Gráficos de dispersión, línea 1:1 y valor del coeficiente de determinación (R^2) entre los valores acumulados de precipitación y las medias de temperatura por cada año, según el período de registro de cada estación.
- Curvas de variación estacional, las cuales reportan los valores medios de precipitación y temperatura por cada mes del año, según el período de registro de cada estación.
- Comparación a nivel mensual entre la fecha de los valores máximos anuales registrados por la estación y los simulados por CR2MET.

Un aspecto que se debió considerar en estas comparaciones es que los centroides de los pixeles no necesariamente presentan la misma cota que las estaciones respectivas. Debido a esto, en los análisis efectuados tuvo que considerarse la representatividad de los resultados en aquellos casos en los que existen discrepancias mayores a los 100 m.s.n.m.

3.3. *Downscaling* de GCMs y corrección de sesgo

Previo a la aplicación del *downscaling* estadístico a cada GCM, se debe realizar un pre-procesamiento a los datos de estos últimos, debido a que las resoluciones espaciales con las que trabajan son demasiado amplias para los objetivos de este trabajo, teniendo celdas con dimensiones entre los 100 km y 500 km por lado. Para esto resulta fundamental la aplicación de un escalamiento espacial entre los datos locales de referencia y la grilla de cada GCM.

Dado que en el presente trabajo la referencia consiste en un producto grillado (CR2MET), el escalamiento se realiza de manera individualizada para cada uno de los pixeles en los cuales las cuencas consideradas poseen alguna fracción de superficie.

Para realizar el escalamiento espacial, se les otorga más peso a aquellos nodos (celdas) del GCM que se encuentren más próximos al píxel de CR2MET considerado y, por lo tanto, un menor peso a los nodos más lejanos. Para efectuar este proceso, en cada píxel de CR2MET se consideran los cuatro nodos más cercanos y, en cada uno de ellos, se realiza una ponderación por el inverso de la distancia (*IDW*, *Inverse Distance Weigth*), mediante las Ecuaciones (3.1) y (3.2).

$$X_n = \sum_{j=1}^4 \omega_j \cdot X_{j,n} \quad (3.1)$$

Con:

$$\omega_j = \frac{\frac{1}{d_j}}{\sum_{j=1}^4 \frac{1}{d_j}} \quad (3.2)$$

Donde:

X_n [mm/°C]: Serie de tiempo de precipitación/temperatura ponderada de manera inversa a la distancia en el píxel considerado.

$X_{j,n}$ [mm/°C]: Serie de tiempo de la precipitación/temperatura observada en el nodo j del GCM.

ω_j [-]: Ponderador asociado al nodo j del GCM.

d_j [m]: Distancia entre el centroide del píxel del CR2MET y el centroide del nodo j del GCM.

Una vez finalizado el escalamiento espacial para cada GCM en cada uno de los 121 píxeles de CR2MET considerados, se procede a implementar la metodología Quantile Delta Mapping (QDM) de *downscaling* estadístico, con el objetivo de escalar y corregir sesgos en las proyecciones de precipitación y temperaturas extremas bajo el escenario RCP 4.5. Cabe destacar que las proyecciones efectuadas bajo escenario RCP 8.5 ya se realizaron como parte del trabajo realizado en el proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) y fueron utilizadas para el desarrollo de la presente memoria.

La metodología QDM se implementa de forma separada para cada uno de los doce meses del año. Esto se realiza con el fin de preservar las tendencias observadas y proyectadas en cada mes, ya que al considerar conjuntamente períodos de baja precipitación y altas temperaturas (ej. enero y febrero) con aquellos de alta precipitación y bajas temperaturas (ej. junio y julio), se corre el riesgo de perder o subestimar las tendencias que son propias de cada estación del año.

El período histórico de calibración considerado en la ejecución de la metodología fue el comprendido entre los años 1979 – 2015 (36 años), debido a la disponibilidad de datos de CR2MET en las versiones utilizadas. En cuanto al período futuro de proyecciones, se consideró a aquel comprendido por los años 2016 – 2060 (44 años). Como existe una disparidad entre la cantidad de años entre ambos períodos, el método es ejecutado reiteradas veces, considerando cada vez un intervalo distinto del período futuro y con diferencias de 5 años entre cada uno.

En base a las consideraciones anteriores, el método QDM es implementado por medio del paquete “MBC” del software *RStudio* (<https://cran.r-project.org/web/packages/MBC/MBC.pdf>), el cual provee de funciones que permiten realizar de forma automatizada el proceso, necesitando únicamente las siguientes variables de entrada, obtenidas en etapas previas:

- Serie de precipitación/temperatura observada en cada píxel de CR2MET, durante todos los días de un mismo mes en el período histórico de calibración (1979 – 2015).
- Serie de precipitación/temperatura simulada y escalada espacialmente por el GCM, durante todos los días de un mismo mes en el período histórico de calibración (1979 – 2015).
- Serie de precipitación/temperatura simulada y escalada espacialmente por el GCM, durante todos los días de un mismo mes en el período futuro proyectado (2015 – 2060).

- Valor de precipitación traza de la serie de GCM histórica escalada, por cada píxel y mes, el cual establece un umbral de precipitación nula al realizar una equivalencia con los valores de precipitación 0 mm en la serie observada (solo en el caso de la precipitación).

3.4. Calibración e Implementación de Modelos Hidrológicos

Las modelaciones hidrológicas efectuadas en el presente trabajo se realizan utilizando los modelos hidrológicos GR4J y VIC. Ambos modelos requieren una etapa de calibración de parámetros previa, con el objetivo de mejorar su desempeño en la modelación del comportamiento dinámico de las cuencas. Sin embargo, para esta memoria solo se considera la calibración del modelo GR4J, debido a que se utilizan los resultados obtenidos en el proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018), en donde se calibraron 14 parámetros del modelo VIC en 43 cuencas de régimen natural de Chile Norte y Central, entre las cuales se encuentran las tres cuencas estudiadas.

En la calibración del modelo hidrológico GR4J y el complemento de nieves CemaNeige se consideran tres funciones objetivo: el criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE, ver Ecuación 2.1), el índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE, ver Ecuación 2.3) y la función NSE con transformación logarítmica (NSE_{\log} , ver ecuación 2.2). El algoritmo de optimización utilizado en todos los casos fue *Calibration Michel*, el cual combina los enfoques de calibración local y global en un proceso iterativo (Michel, 1991).

Se calibraron un total de seis parámetros, cuatro de ellos provenientes del modelo GR4J y dos del módulo de nieves CemaNeige. El período de calibración consistió en el comprendido entre los años hidrológicos 1985/86 – 2005/06, considerando además un período de calentamiento o *spin-up* entre los años hidrológicos 1979/80 – 1984/85 y un período de validación entre los años hidrológicos 2006/07 – 2014/15. En las Tablas 3.1 y 3.2 se presenta la descripción, unidad de medida y el rango de valores de cada uno de los parámetros, estos últimos fueron considerados como el intervalo de confianza del 80% obtenido tras implementar el modelo en un amplio set de cuencas (Perrin *et al.*, 2003).

Tabla 3.1: Descripción y rango de valores de los parámetros del modelo hidrológico GR4J.

Parámetro	Descripción	Unidad de medida	Límite inferior	Límite superior
GR4J X1	Capacidad de almacenamiento del estanque de producción	mm	100	2000
GR4J X2	Coefficiente de intercambio entre los 2 estanques	mm/día	-5	5
GR4J X3	Capacidad de almacenamiento del estanque de ruteo	mm	20	300
GR4J X4	Constante de tiempo del hidrograma unitario	día	0,5	3

Tabla 3.2: Descripción y rango de valores de los parámetros del módulo de nieves CemaNeige.

Parámetro	Descripción	Unidad de medida	Límite inferior	Límite superior
CemaNeige X1	Coefficiente de ponderación del estado térmico del manto de nieve	-	0	1
CemaNeige X2	Coefficiente de derretimiento en grados-día	mm/°C/día	2	6

Si bien, en su implementación, el modelo VIC no requirió una calibración de parámetros, si fue necesario realizar un preprocesamiento de los datos de entrada previo a su uso. Esto se debe a que el módulo de balance de energía del modelo requiere que las forzantes climáticas (precipitación, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa) se encuentren ingresadas en una resolución temporal tri-horaria. Dado que los datos con los que se cuenta tras el escalamiento poseen una resolución diaria, fue necesario implementar metodologías de desagregación temporal de forzantes.

Para el caso de la temperatura media, dado que se cuenta con el valor de las temperaturas extremas de cada día, se decidió adaptar la metodología de desagregación temporal utilizada en Mendoza (2010), considerando el supuesto de que todos los valores máximos ocurren a las 15:00 hrs., mientras que los valores mínimos lo harían a las 6:00 hrs. Para poder completar los valores faltantes de temperatura en el resto de las horas de cada día, se realizó una interpolación lineal entre los valores extremos. En la Figura 3.2 se ejemplifica esta metodología para un caso idealizado en el que el valor máximo diario de temperatura fue de 20 °C y el valor mínimo de 5 °C.

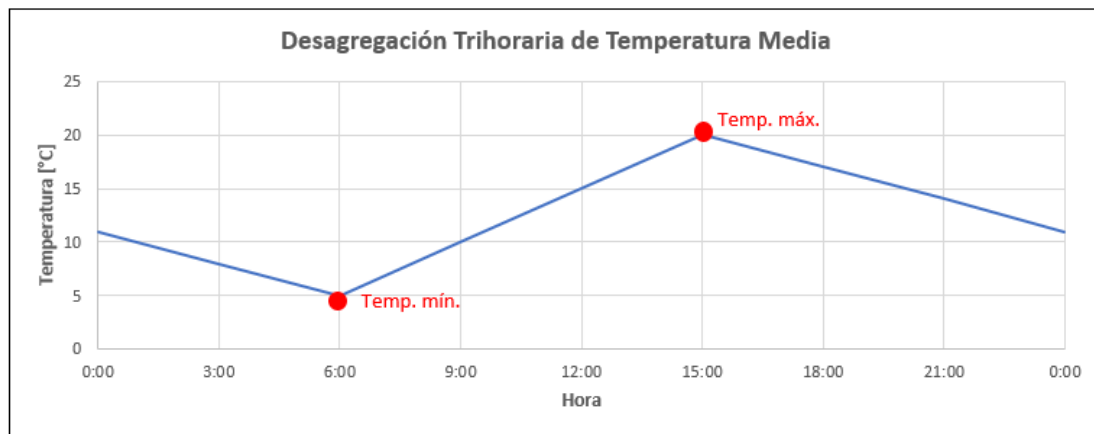


Figura 3.2: Esquema de la metodología de desagregación a nivel tri-horario utilizada en la temp. media

Por otra parte, para realizar la desagregación temporal de las precipitaciones, se seleccionaron píxeles representativos de cada cuenca estudiada. En cada uno de ellos, y de forma aleatoria, se consideraron cinco distribuciones horarias de precipitación acumulada obtenidas desde las forzantes de entrada del modelo VIC calibrado en DGA (2018), las cuales se derivan a partir del reanálisis ERA 5. Luego, para cada uno de los días de las series escaladas en que existe precipitación, esta última se desagrega a nivel tri-horario mediante la asignación, de manera equiprobable, de una de las cinco distribuciones obtenidas previamente. Un ejemplo de la

aplicación de esta metodología se ilustra en la Figura 3.3, en la cual se presentan las distribuciones acumuladas de precipitación seleccionadas para una cuenca.

Finalmente, cabe mencionar que las series de velocidad de viento y humedad relativa utilizadas en cada píxel fueron las mismas que se emplearon en la modelación hidrológica de VIC realizada en el proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018).

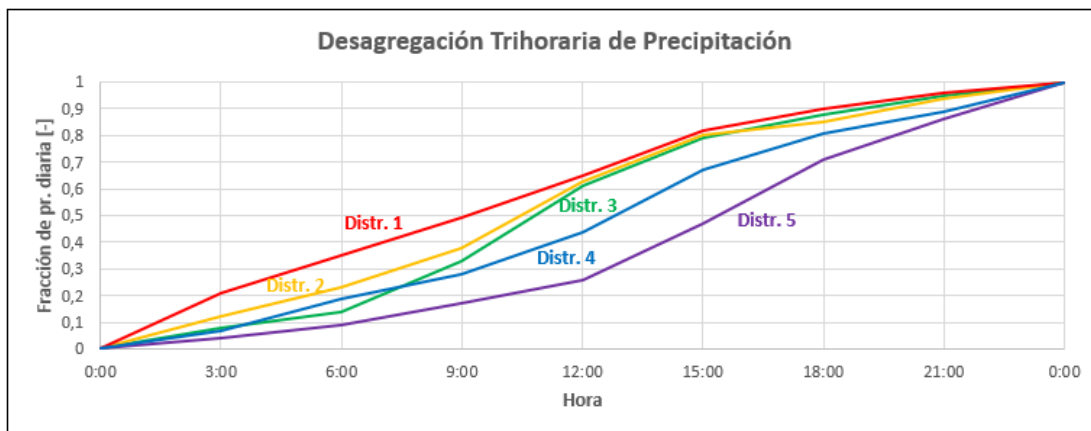


Figura 3.3: Esquema de la metodología de desagregación a nivel tri-horario utilizada en la precipitación.

3.5. Simulación de escenarios y análisis de resultados

En cada modelo hidrológico se realiza un total de ocho simulaciones de caudales futuros proyectados, de las cuales cuatro corresponden al escenario climático RCP 4.5 y cuatro al escenario RCP 8.5, y en donde cada simulación utiliza como forzantes de entrada a las series meteorológicas escaladas de cada GCM .

Una vez obtenidos las series de caudales simuladas por modelo, estas son evaluadas según su desempeño para reproducir el comportamiento hidrológico de cada cuenca durante un período base, el cual considera a todos los años hidrológicos comprendidos entre 1985/86 y 2014/15.

Por último, se analizan las proyecciones futuras de caudales simuladas por cada modelo hidrológico y GCM, mediante la obtención de series anuales, estadísticos y curvas de duración y variación estacional. En particular, se comparan los resultados obtenidos entre el período base y un período futuro definido por los años hidrológicos comprendidos entre 2030/31 y 2059/60, al igual que estudios anteriores de cambio hidrológico en Chile Central, como es el caso de DGA (2018).

Capítulo 4: Caracterización de la Zona de Estudio

4.1. Antecedentes Generales

La zona de estudio corresponde a las cuencas Río Claro en los Queñes (Cód. BNA 7103001), Río Colorado en junta con Palos (Cód. BNA 7112001) y Río Palos en junta con Colorado (Cód. BNA 7115001), las cuales son contiguas entre sí y se localizan entre las latitudes 35°00'S – 35°40'S y las longitudes 70°20'O – 71°00'O. Su ubicación corresponde a un sector de carácter precordillerano y de alta montaña en la Región del Maule, a aproximadamente 40 km al sureste de la ciudad de Curicó (Figura 4.1). Estas cuencas se caracterizan por presentar un grado de intervención² menor al 5%, no existiendo en ellas embalses de ningún tipo, por lo que es posible considerarlas como cuencas en régimen natural. Adicionalmente, en todas ellas los glaciares representan una cobertura superficial inferior al 2%³ y sus cursos de agua son tributarios a los ríos Teno y Lontué, los cuales son los principales afluentes del río Mataquito.

En la Tabla 4.1 se presentan algunos de los principales atributos geomorfológicos e hidrológicos de las cuencas estudiadas, la mayoría de los cuales fueron obtenidos desde la base de datos de la plataforma CAMELS-CL (<http://camels.cr2.cl/>) (Alvarez-Garretón *et al.*, 2018), mientras que la longitud del cauce fue medida utilizando el software QGIS y los tiempos de concentración fueron calculados utilizando las fórmulas de *California Highways and Public Works* (1960) y Témez (1991). Se observa que la cuenca del Río Colorado en junta con Palos es la que presenta mayor área, longitud de cauce y tiempo de concentración. Por otra parte, la elevación media de las tres cuencas se ubica entre los 1000 – 3000 m.s.n.m. y sus pendientes medias son altas, en torno al 20%.

Tabla 4.1: Atributos y parámetros geomorfológicos e hidrológicos de las cuencas estudiadas.

Atributo de cuenca	Unidad	Río Claro en los Queñes	Río Colorado en junta con Palos	Río Palos en junta con Colorado
Área	km ²	354,4	877,9	490
Cota mínima	m.s.n.m.	666	616	616
Cota máxima	m.s.n.m.	4077	4074	3282
Cota media	m.s.n.m.	1857	2288	1973
Pendiente media	%	25,62	19,6	19,9
Índice de aridez	-	0,6	0,5	0,5
Longitud del cauce	km	41,21	83,8	53,71
Tiempo de Concentración (California)	horas	3,04	7,14	4,54
Tiempo de concentración (Témez)	horas	3,28	6,49	4,41

² El grado de intervención de una cuenca se define como la razón entre el caudal medio anual de los derechos de agua superficiales consuntivos otorgados y el caudal medio anual de la cuenca.

³ Específicamente, representan 1,07% (Río Claro), 0,72% (Río Colorado) y 0,02% (Río Palos).

CUENCAS DEL RÍO CLARO, RÍO COLORADO Y RÍO PALOS
Delimitación del Área de Estudio según Aster DEM y SRTM
Región del Maule - Chile

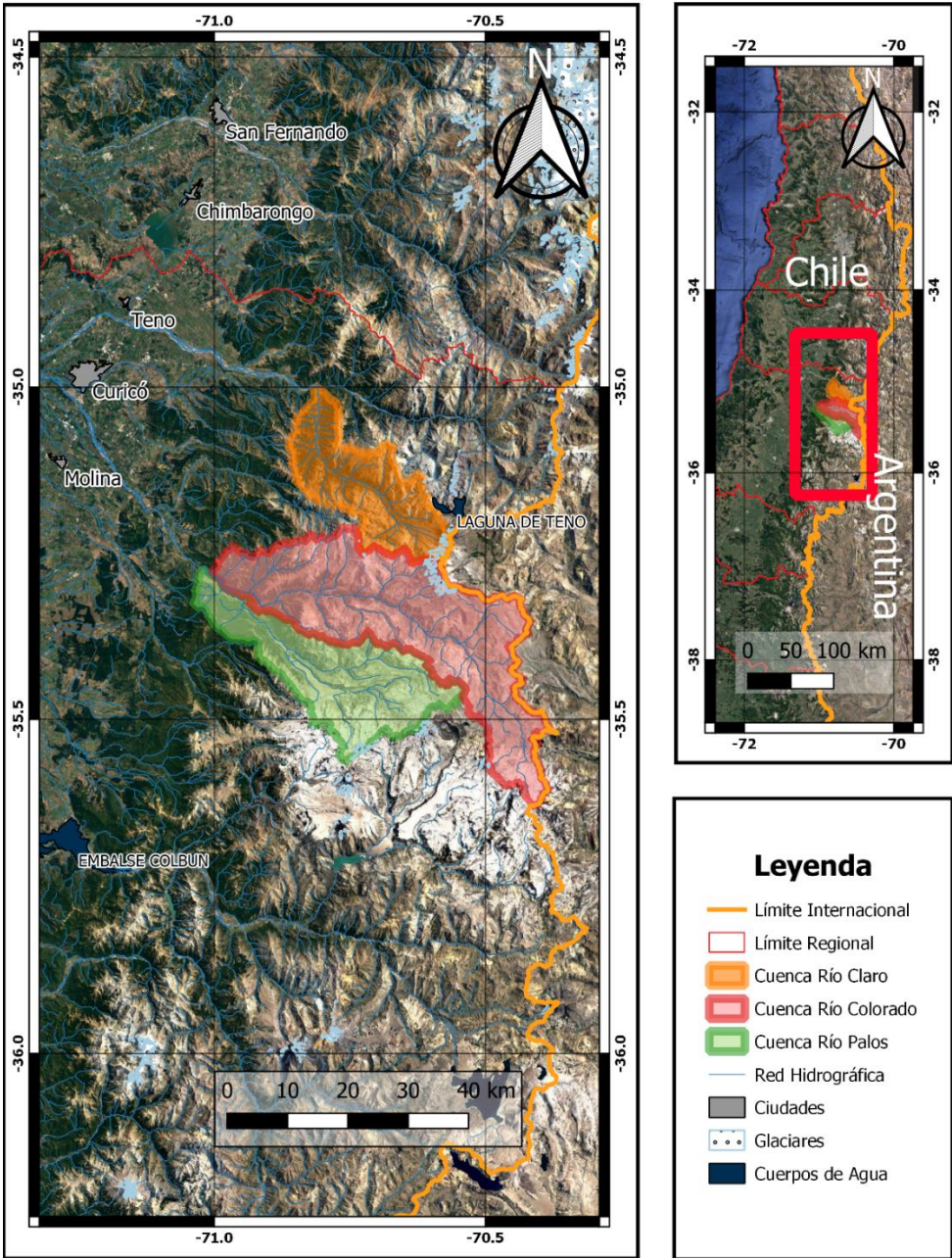


Figura 4.1: Mapa con la ubicación geográfica de las cuencas Río Claro en los Queñes, Río Colorado en junta con Palos y Río Palos en junta con Colorado. Las coordenadas se encuentran en grados (°).

En la Figura 4.2 se presentan las curvas hipsométricas asociadas a las tres cuencas estudiadas, las cuales fueron procesadas mediante el software GRASS GIS. En base a la clasificación de Strahler (1964), se observa que las cuencas del Río Colorado en junta con Palos y Río Palos en junta con Colorado se encuentran en fase de juventud, lo que indicaría que poseen un gran potencial erosivo futuro. Por otra parte, la cuenca del Río Claro en los Queñes refleja un comportamiento más equilibrado, por lo que es posible considerarla en etapa de madurez.

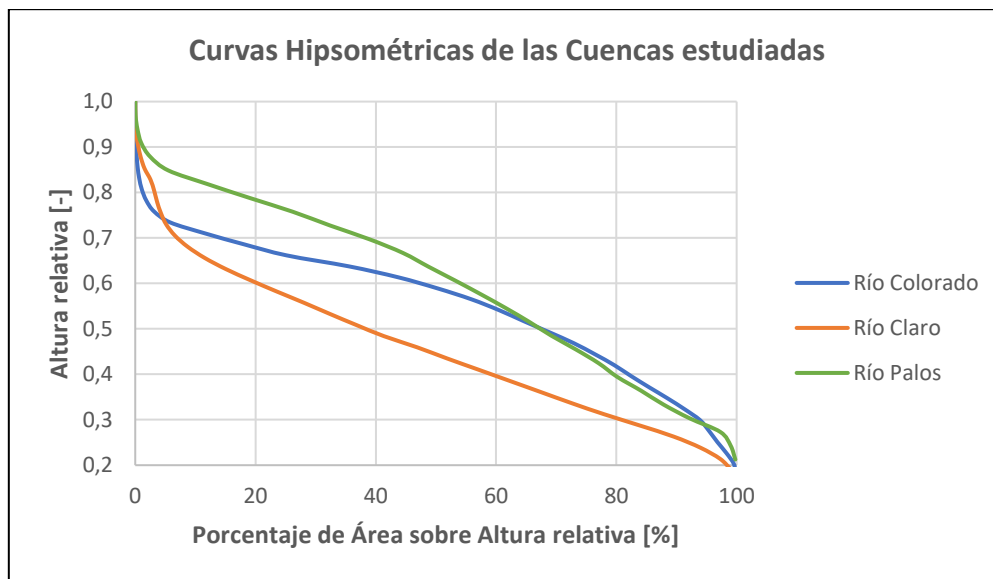


Figura 4.2: Curvas hipsométricas de las cuencas Río Claro en los Queñes, Río Colorado en junta con Palos y Río Palos en junta con Colorado.

En cuanto a la geomorfología de las cuencas, es posible considerar que todas ellas presentan características propias de zonas precordilleranas y de alta montaña, con un rango de elevaciones aproximado entre los 600 y 4000 m.s.n.m. En la Figura 4.3 se muestra en detalle la distribución espacial elevación en cada una de las tres cuencas estudiadas, la cual fue obtenida a partir de un modelo de elevación digital (DEM) de la región del Maule.

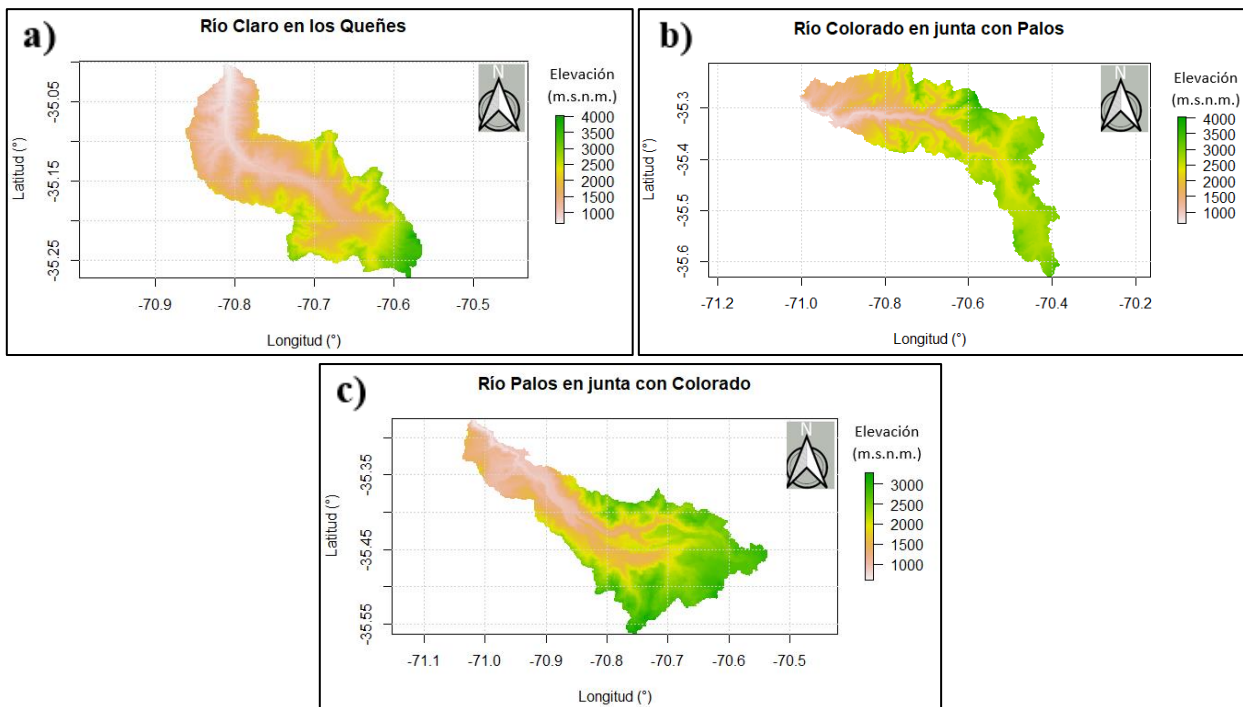


Figura 4.3: Elevación en las cuencas Río Claro en los Queñes (a), Río Colorado en junta con Palos (b) y Río Palos en junta con Colorado (c).

Los tipos de coberturas presentes en el suelo de las cuencas se extraen desde el producto elaborado por Zhao *et al.* (2016) a partir del procesamiento de imágenes satelitales Landsat⁴, en el cual se clasifica la cobertura de suelo de todo el territorio de Chile Continental a partir de un mapa grillado con celdas de resolución espacial de 30 m. En la Figura 4.4 se presenta la cobertura de suelo en cada una de las cuencas. Es posible observar que en las zonas de menor elevación (zona precordillerana) predominan las coberturas de bosque nativo y matorrales, mientras que en las zonas con elevaciones mayores a 2000 m.s.n.m. gran parte de la superficie corresponde a suelo rocoso y, en menor medida, a pastizales. Por otra parte, las coberturas asociadas a cultivos y suelos impermeables no representan una fracción significativa, lo que da cuenta del régimen natural y escasa intervención humana que presentan.

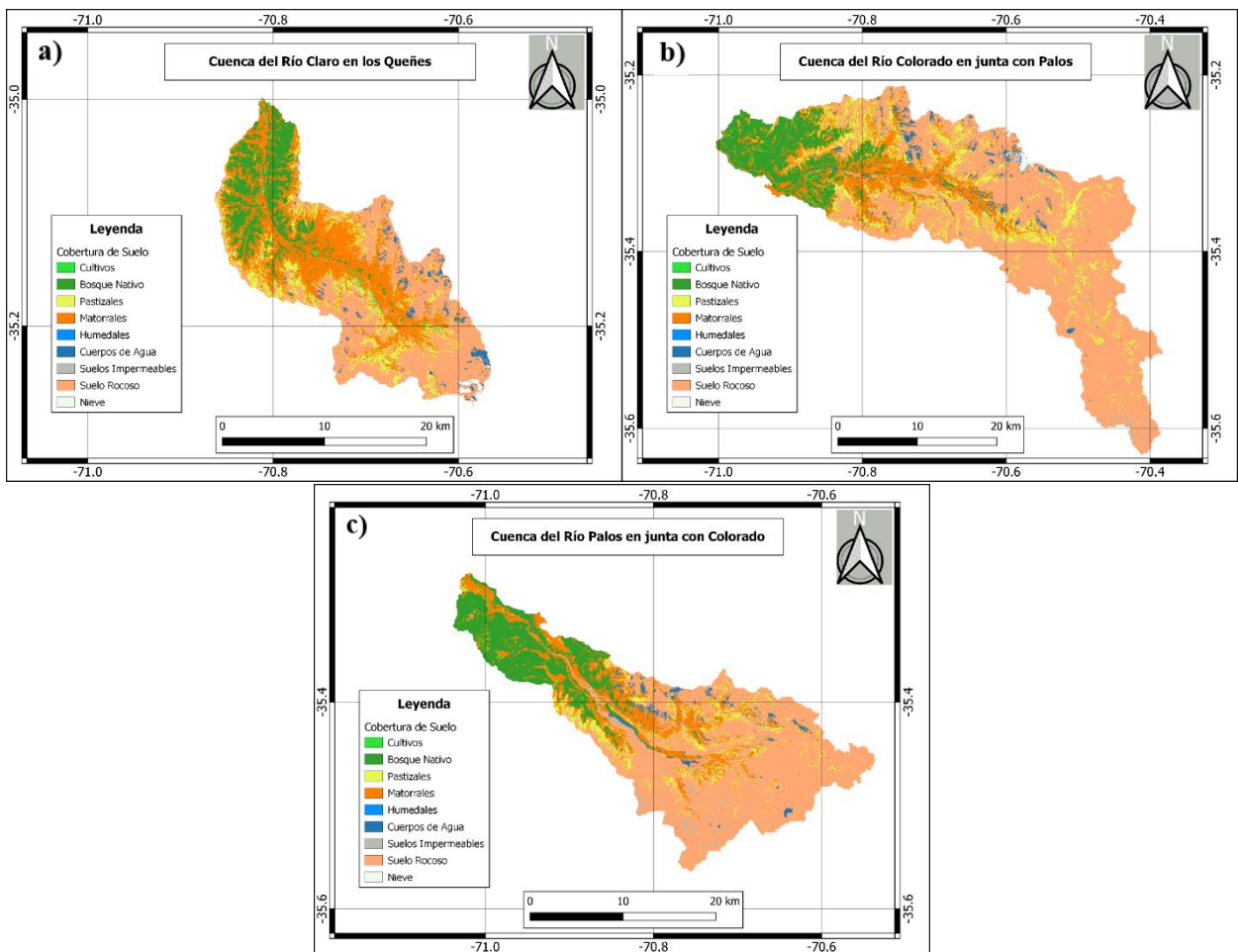


Figura 4.4: Cobertura de suelo en las cuencas Río Claro en los Queñes (a), Río Colorado en junta con Palos (b) y Río Palos en junta con Colorado (c).

⁴ http://www.gep.uchile.cl/Landcover_CHILE.html

4.2. Información Hidrometeorológica Disponible

En la Tabla 4.2 se presenta el nombre, código, ubicación, elevación y período de registro disponible de las estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA) asociadas a cada una de las tres cuencas consideradas. De la misma forma, en la Tabla 4.3 se presenta la ubicación, tipo de medición (Precipitación y/o Temperatura) y período de registro de las estaciones meteorológicas de la DGA más cercanas a la zona de estudio. Por otra parte, en la Figura 4.5 se muestra la ubicación espacial de cada una de estas estaciones respecto a las cuencas estudiadas.

La información de precipitaciones y temperaturas extremas provista por las estaciones meteorológicas fue contrastada con el producto grillado CR2MET, comparando de forma diferenciada cada estación con su celda asociada en este último. Los resultados de este proceso se presentan en forma detallada en el Anexo A del presente informe.

Tabla 4.2: Ubicación y período de registro de las estaciones fluviométricas en la zona de estudio.

Nombre Estación	Código DGA	Latitud [°]	Longitud [°]	Elevación [m]	Período de registro
Río Claro en los Queñes	7103001	-34,998	-70,809	666	1930 – 2020
Río Colorado en junta con Palos	7112001	-35,278	-71,003	616	1968 – 2020
Río Palos en junta con Colorado	7115001	-35,274	-71,015	616	1968 – 2020

Tabla 4.3: Ubicación y período de registro de las estaciones meteorológicas en la zona de estudio.

Nombre Estación	Código DGA	Latitud [°]	Longitud [°]	Elevación [m]	Tipo de medición	Período de registro
El Manzano	7104005	-34,963	-70,918	574	Prec.	1976 – 2020
Monte Oscuro	7116004	-35,124	-70,975	632	Prec.	1994 – 2020
Curicó	7118003	-34,981	-71,236	195	Prec./Temp.	1972 – 2020
Potrero Grande	7116005	-35,183	-71,098	445	Prec./Temp.	1972 – 2020
Agua Fría	7371002	-35,313	-71,098	560	Prec.	1993 – 2020
Fundo el Radal	7370001	-35,419	-71,043	685	Prec.	1993 – 2020

**Ubicación de las Estaciones Meteorológicas y Fluviométricas de la DGA en la Zona de Estudio
Región del Maule - Chile**

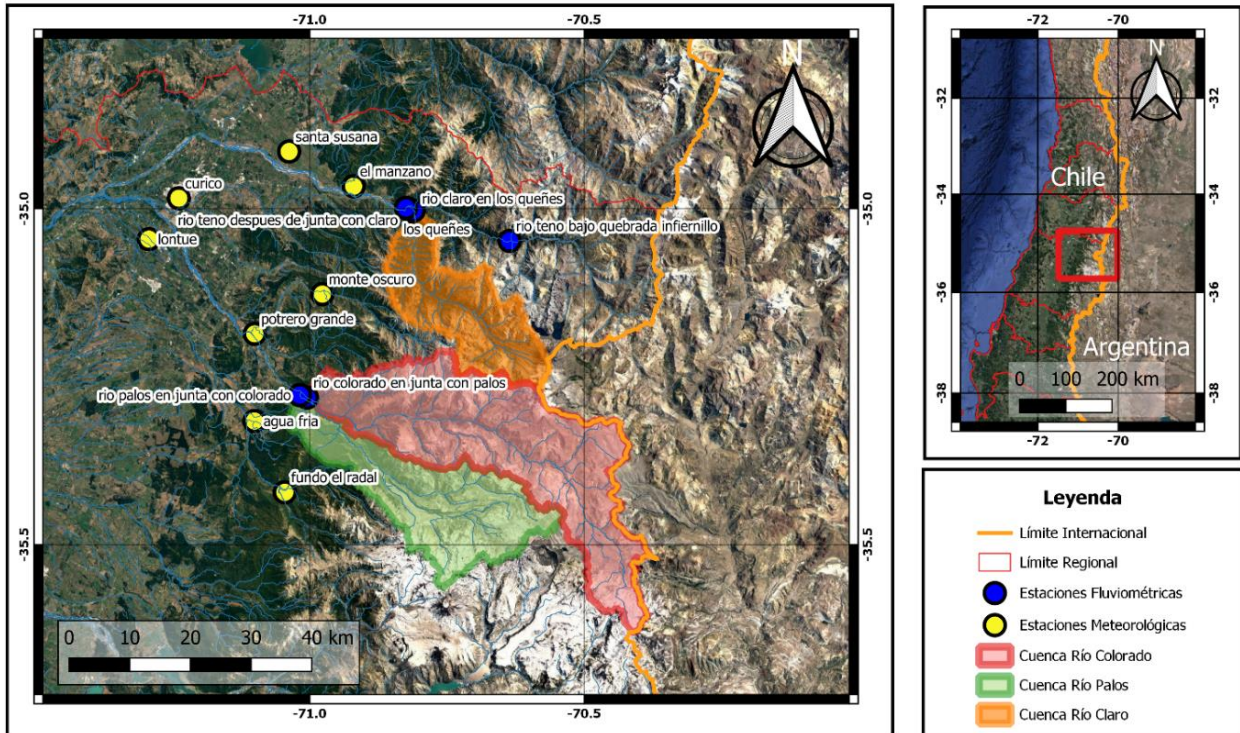


Figura 4.5: Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas y fluviométricas en la zona de estudio.

4.3. Hidrología

A partir de la base de datos de la plataforma CAMELS-CL se obtienen las series de caudales medios diarios observados en las estaciones fluviométricas correspondiente a cada cuenca. En la Figura 4.6 se presentan dichas series para el período comprendido entre los años hidrológicos 1985/86 – 2014/15, en las cuales se evidencia una marcada estacionalidad a nivel anual. Destaca la existencia de dos períodos sin registro durante los años hidrológicos 1986/87 y 2010/11 en las cuencas de los Ríos Colorado en junta con Palos y Palos en junta con Colorado, aunque en total la suma de los días sin registro durante el período completo es inferior a 500 en cada cuenca.

Además, se observa que en las tres cuencas los eventos de grandes crecidas son poco frecuentes, pero pueden alcanzar valores significativos, llegando a caudales en torno a los 350 m³/s en Río Claro en los Queñes y a valores superiores a los 400 m³/s en el caso de Río Colorado en junta con Palos y de Río Palos en junta con Colorado. Particularmente, destaca el evento registrado durante el año hidrológico 2008/09, en el cual se observó un caudal mayor a 1000 m³/s en Río Colorado y uno superior a 600 m³/s en Río Palos. Por el contrario, también existen períodos caracterizados por la presencia de caudales inferiores al promedio, los cuales coinciden con los años en que se ha registrado sequía meteorológica en Chile Central, tales como el año hidrológico 1988/89 y todos los años hidrológicos posteriores a 2010/11.

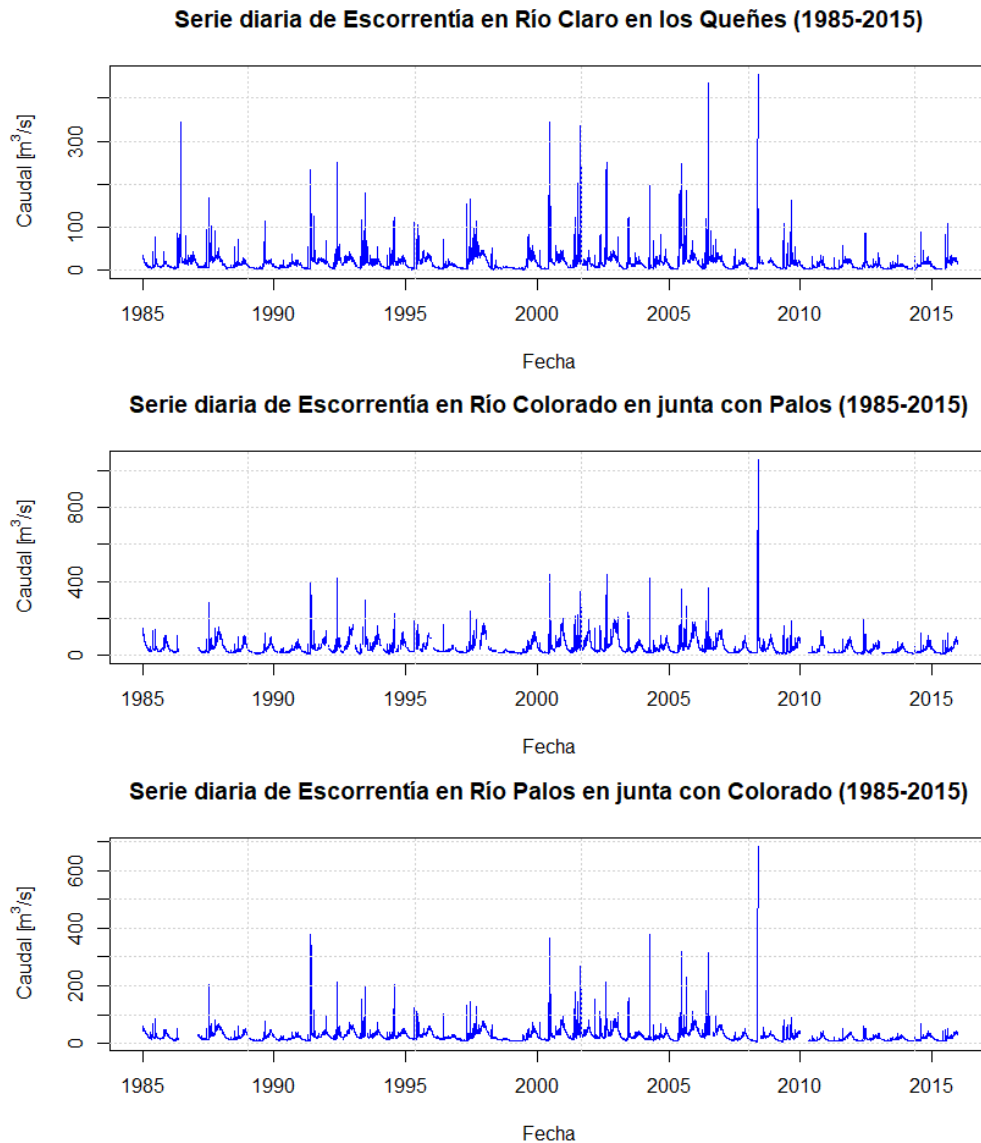


Figura 4.6: Serie diaria de escorrentía en las tres cuencas estudiadas, durante el período 1985 – 2015.

En la Figura 4.7 se presenta de forma conjunta la curva de duración de caudales de las tres cuencas, para el período de estudio 1985 – 2015. Se observa un comportamiento hidrológico similar en todas ellas, diferenciándose únicamente en la magnitud de los caudales, lo que es esperable debido a las distintas áreas que posee cada cuenca. Se destaca que todas ellas presentan caudales que el 80% del tiempo no exceden los $50 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que los valores extremos (probabilidad de excedencia menor al 1%) superan los $100 \text{ m}^3/\text{s}$ en todos los casos.

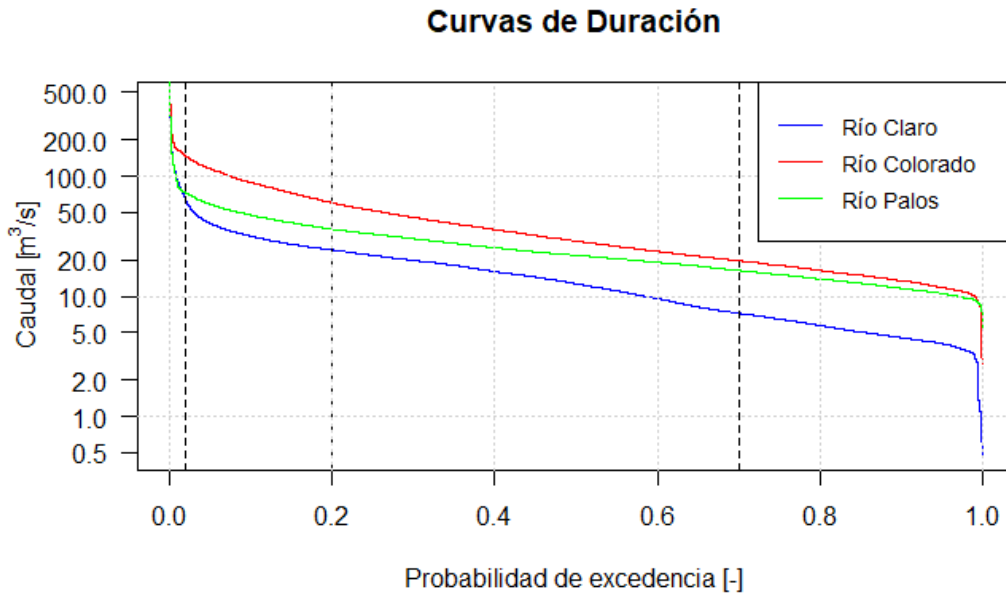


Figura 4.7: Curvas de duración de caudales en las tres cuencas estudiadas, en el período 1985 – 2015.

En las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10 se presentan además las curvas de variación estacional de caudales de cada cuenca, asociadas a distintas probabilidades de excedencia. La cuenca Río Claro en los Queñes exhibe un régimen mixto nivo-pluvial no muy marcado, mientras que las cuencas Río Colorado en junta con Palos y Río Palos en junta con Colorado presentan un marcado régimen nival, con valores *peak* de caudales durante el mes de noviembre. Sin embargo, al analizar las curvas asociadas a una probabilidad de excedencia inferior al 30 % el régimen hidrológico de las tres cuencas cambia, pasando a uno pluvio-nival en Río Claro en los Queñes y a uno nivo-pluvial en las otras dos cuencas, experimentando los valores *peak* de escorrentía en el mes de diciembre.

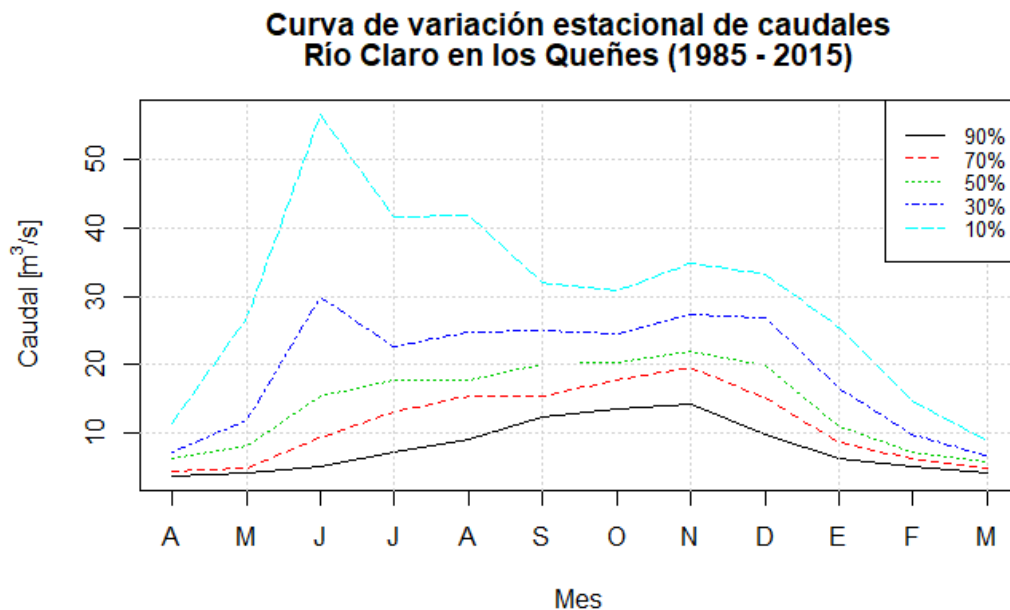


Figura 4.8: Curva de variación estacional de caudales en la cuenca Claro en los Queñes, durante el período 1985 – 2015.

**Curva de variación estacional de caudales
Río Colorado en junta con Palos (1985 - 2015)**

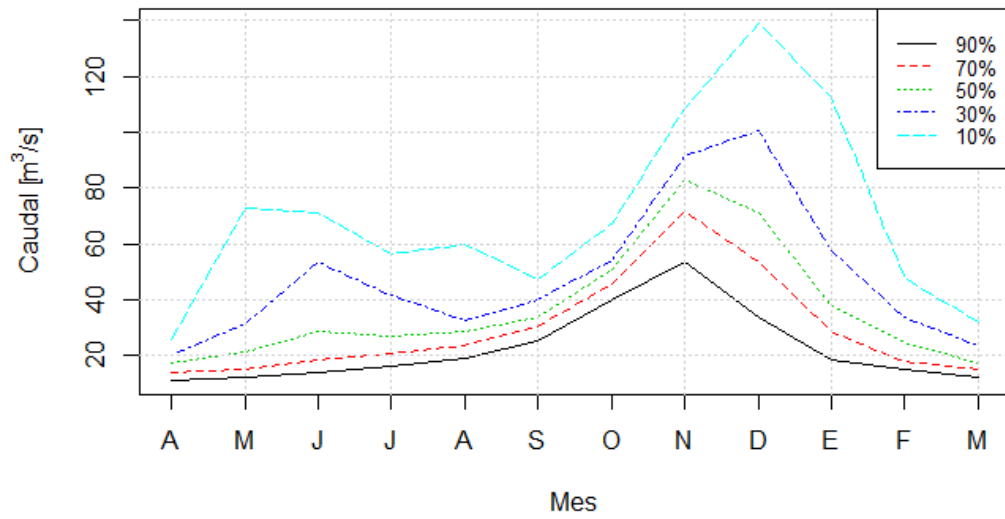


Figura 4.9: Curva de variación estacional de caudales en la cuenca Río Colorado en junta con Palos, durante el período 1985 – 2015.

**Curva de variación estacional de caudales
Río Palos en junta con Colorado (1985 - 2015)**

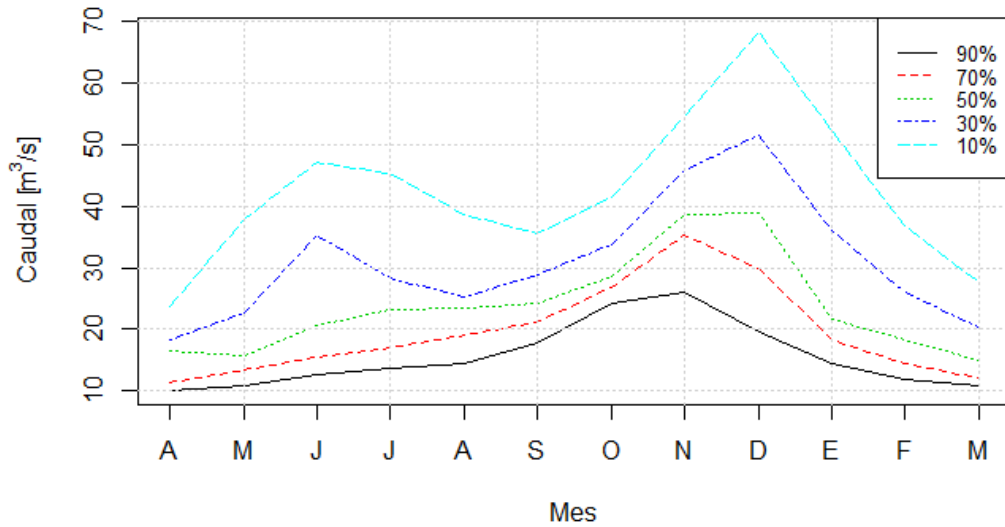


Figura 4.10: Curva de variación estacional de caudales en la cuenca Río Palos en junta con Colorado, durante el período 1985 – 2015.

4.4. Climatología

Debido a su ubicación en la zona Central de Chile, el clima de la zona de estudio se caracteriza por ser del tipo mediterráneo con estación seca prolongada (cuatro a cinco meses), por lo que presenta un fuerte contraste de temperaturas y precipitaciones entre cada estación del año. Esto se ve reflejado en los climogramas asociados a cada cuenca, presentados en las Figura 4.11, los cuales fueron construidos a partir de información provista por las celdas correspondiente a cada cuenca dentro del producto grillado CR2MET, durante el período 1985 – 2014.

Es posible evidenciar que, dada su proximidad espacial, las tres cuencas poseen un comportamiento climático similar. Existe un gran contraste en el régimen de precipitaciones entre cada estación del año, concentrándose la mayor parte de esta entre los meses de abril y octubre, alcanzando valores medios mensuales máximos entre los 370 mm y 420 mm durante el mes de junio. Por el contrario, las mínimas precipitaciones mensuales se registran entre los meses de noviembre y marzo, encontrándose los valores promedio más bajos en torno a los 10 mm durante el mes de enero.

En cuanto a las temperaturas extremas, tampoco se observan diferencias significativas entre las tres cuencas. Los valores promedio mensuales de temperatura oscilan entre máximos en torno a los 20 °C durante los meses del período estival (diciembre – febrero) y mínimos cercanos a los -2 °C durante los meses de invierno (junio – agosto).

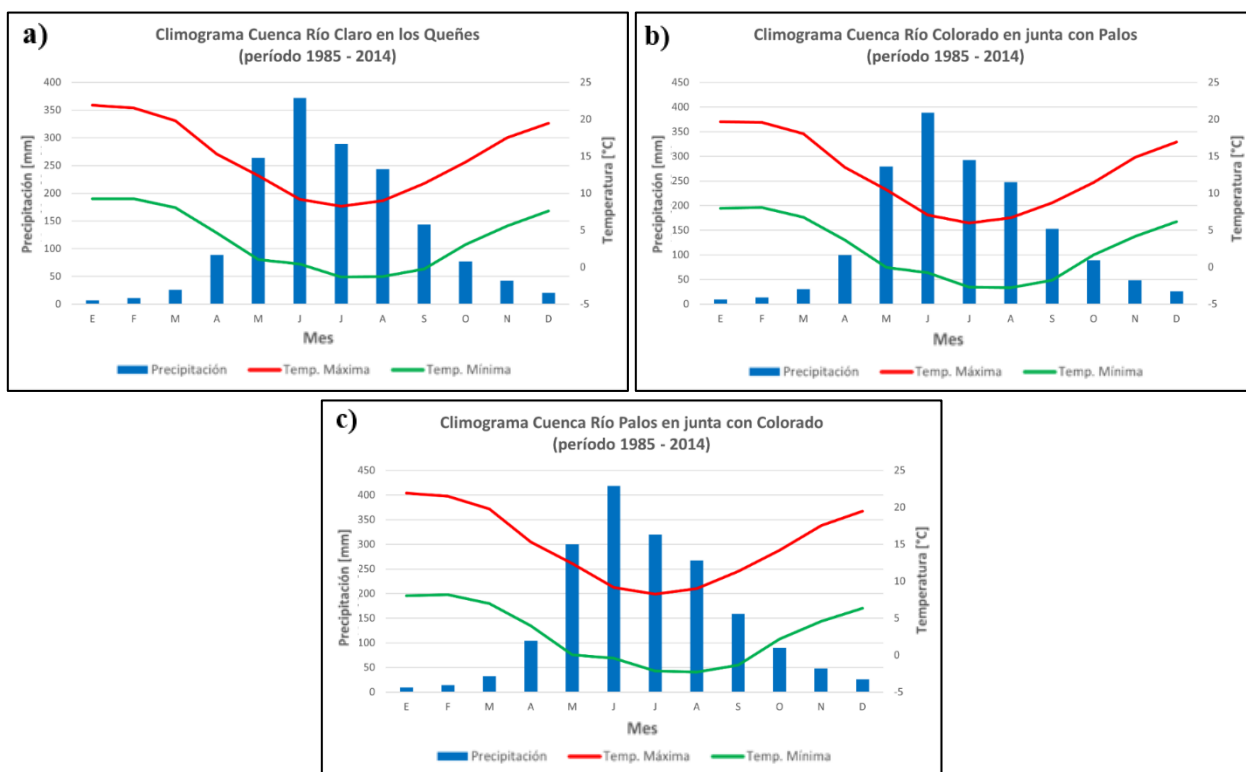


Figura 4.11: Climogramas de las cuencas Río Claro en los Queñes (a), Río Colorado en junta con Palos (b) y Río Palos en junta con Colorado (c). Todos fueron elaborados con los valores promedio de las variables climáticas durante el período 1985 - 2014.

4.5. Producto grillado CR2MET

4.5.1. Distribución de píxeles de CR2MET en cada cuenca.

A partir de la ubicación geográfica de la zona de estudio, fue posible identificar a todos los píxeles del producto grillado CR2MET en los cuales existen fracciones de área pertenecientes a alguna de las tres cuencas estudiadas. En particular, los píxeles considerados se distribuyen de la siguiente forma: 26 en la cuenca Río Claro en los Queñes, 56 en la cuenca Río Colorado en junta con Palos y 39 en la cuenca Río Palos en junta con Colorado (Figura 4.12).

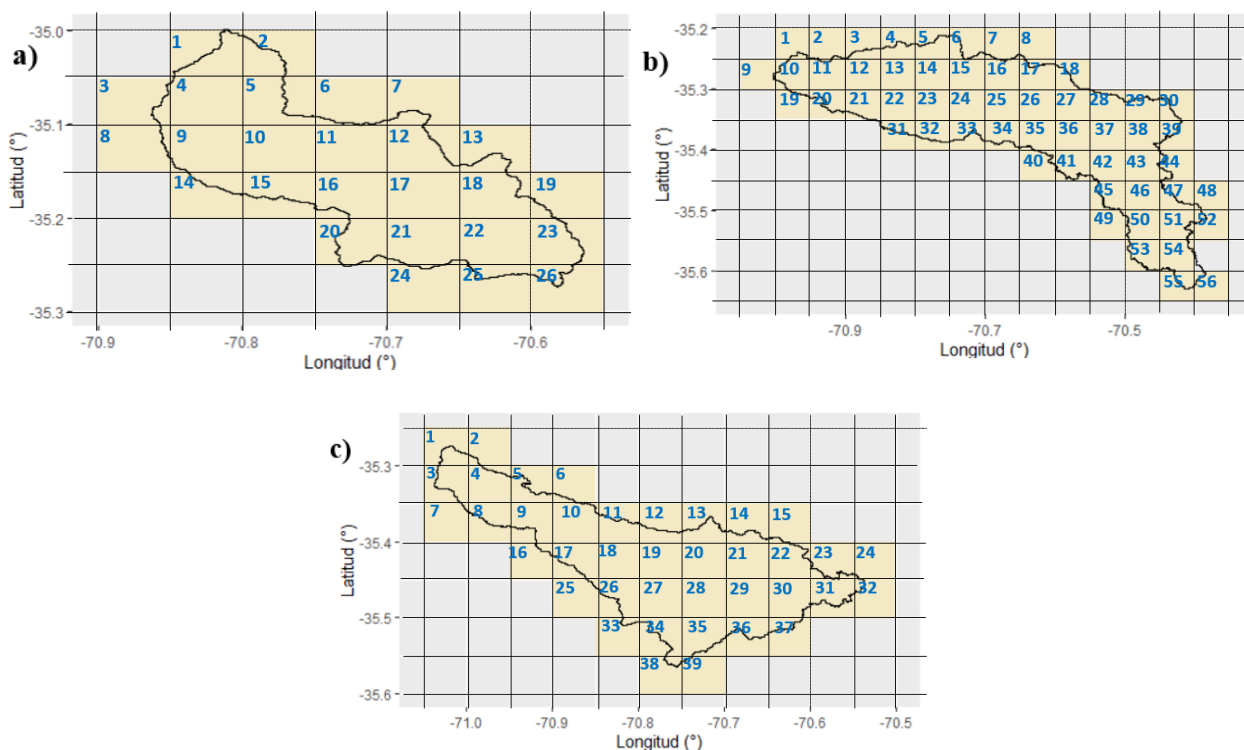


Figura 4.12: Píxeles de la grilla de CR2MET asociados a las cuencas Río Claro en los Queñes (a), Río Colorado en junta con Palos (b) y Río Palos en junta con Colorado (c).

4.5.2. Validación producto grillado CR2MET en zona de estudio

Se realizó un chequeo de consistencia con el fin de validar el desempeño del producto grillado CR2MET al reproducir la climatología local observada en la zona de estudio, particularmente analizando los datos de temperaturas extremas y precipitación. Los resultados obtenidos en este proceso se exponen el Anexo A del presente informe.

En cuanto al análisis de temperaturas, a nivel anual se observa un correcto ajuste estadístico con los datos observados, lo cual es ratificado por los valores de coeficiente de determinación obtenidos, los cuales son mayores a 0,98 en la estación Curicó y a 0,82 en la estación Potrero Grande. Sin embargo, en esta última estación es posible evidenciar un sesgo positivo en torno a los

1,5 °C en el ajuste de las temperaturas mínimas, lo cual podría explicarse en el hecho de que el centroide del píxel que contiene a esta estación se encuentra a una elevación 200 metros mayor que la estación⁵. Por otra parte, las curvas de variación estacional muestran una buena correspondencia en cuanto a la magnitud de valores en ambas estaciones.

En cuanto a la validación de la precipitación, se evidencia un adecuado ajuste anual en todas las estaciones, con valores de coeficiente de determinación mayores a 0,95. Sin embargo, en las estaciones Fundo el Radal y Monte Oscuro se presentan sesgos de hasta 200 mm en aquellos años en que ocurrió una precipitación mayor a 2000 mm. Las curvas de variación estacional exhiben una adecuada correspondencia temporal, reproduciendo una concentración de precipitaciones entre los meses de abril y septiembre, aunque existen subestimaciones entre 20 mm y 100 mm en los valores de precipitación durante los meses de invierno en las estaciones Agua Fría y Fundo el Radal.

Por otro lado, al evaluar la distribución mensual de los valores máximos anuales de precipitación (Figuras A.13 – A.17), se observa que CR2MET es capaz de reproducir adecuadamente la temporalidad y magnitud de estos eventos en las estaciones analizadas, aunque se evidencia una dificultad al representar eventos extremos ocurridos en el período seco del año. Esto último se evidencia claramente en las estaciones Fundo el Radal, Potrero Grande y Agua Fría, en donde existe un contraste en el desempeño mostrado en los eventos ocurridos entre los meses de junio y agosto, con una buena correspondencia, y los ocurridos entre marzo y mayo, los cuales son escasamente reproducidos por CR2MET.

Por último, un aspecto que tuvo que considerarse en este análisis fue que no existe ninguna estación meteorológica al interior de las cuencas estudiadas, por lo que la evaluación se realizó contrastando con las estaciones más cercanas, las cuales se ubican en los valles interiores o en zonas precordilleranas. Esto último cobra importancia si se tiene presente que más del 50% del área de las cuencas se ubica en alta montaña, por lo que los resultados obtenidos en este chequeo de consistencia podrían presentar una alta incertidumbre al ser aplicados directamente en la zona estudiada.

⁵ La estación meteorológica Potrero Grande se encuentra ubicada a una elevación de 445 m.s.n.m., mientras que el centroide del píxel de CR2MET que contiene a esta estación ubica a una elevación de 668 m.s.n.m.

Capítulo 5: Resultados del *Downscaling* de forzantes climáticas en el escenario RCP 4.5

En el presente capítulo se presentan los principales resultados obtenidos tras la implementación del proceso de *downscaling* espacial y corrección de sesgo de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, mediante la metodología Quantile Delta Mapping, en las tres cuencas estudiadas. Los resultados son presentados y ordenados según forzante climática escalada, comparando en cada caso los resultados obtenidos a nivel agregado en cada una de las tres cuencas y en dos píxeles representativos de las zonas de menor elevación (valle) y mayor elevación (cordillera o alta montaña) de la zona de estudio.

Cabe destacar que los resultados a nivel agregado de las cuencas fueron obtenidos por medio de un promedio ponderado entre la serie de forzantes y la fracción de área perteneciente a la cuenca de cada píxel. Por otra parte, en la Tabla 5.1 se presenta la ubicación y elevación de los píxeles representativos de la zona de valle y cordillera.

Tabla 5.1: Ubicación de los píxeles seleccionados como representativos de las zonas de valle y cordillera.

Zona	N° de Píxel	Latitud [°]	Longitud [°]	Elevación [m.s.n.m.]
Valle	Píxel 4 - Río Claro	-35,075	-70,825	1110
Cordillera	Píxel 34 - Río Palos	-35,525	-70,775	2668

En cuanto a los análisis de los resultados obtenidos, estos se realizan agrupando las series simuladas en dos períodos: uno histórico, que abarca los 30 años hidrológicos existentes entre abril de 1985 y marzo de 2015, y uno de proyección futura, que considera los 30 años hidrológicos entre abril de 2030 y marzo de 2060.

5.1. Precipitación

5.1.1. Resultados Período histórico (1985 – 2015).

En la Figura 5.1 se presentan, mediante un gráfico de *boxplot*, los principales estadísticos (media, cuartiles y valores extremos) de las series de precipitación agregadas a nivel anual obtenidas tanto para el producto grillado CR2MET como para cada uno de los cuatro GCM considerados en el presente trabajo. Por otro lado, en el Anexo B se encuentran graficadas cada una de estas series y se presenta una tabla con el valor numérico de los estadísticos.

Se constata que ninguno de los cuatro GCM es capaz de simular adecuadamente los montos interanuales de precipitación, existiendo diferencias superiores a 1000 mm entre la precipitación reportada por CR2MET y algunos GCM en un mismo año, como es el caso de IPSL y CCSM. No obstante la presencia de este sesgo, los GCMs CSIRO e IPSL muestran un adecuado desempeño al reproducir algunos de los valores más extremos de la serie de precipitación de CR2MET, como es el caso del año 1998 y el período 2010-2015, ambos caracterizados por presentar condiciones de sequía.

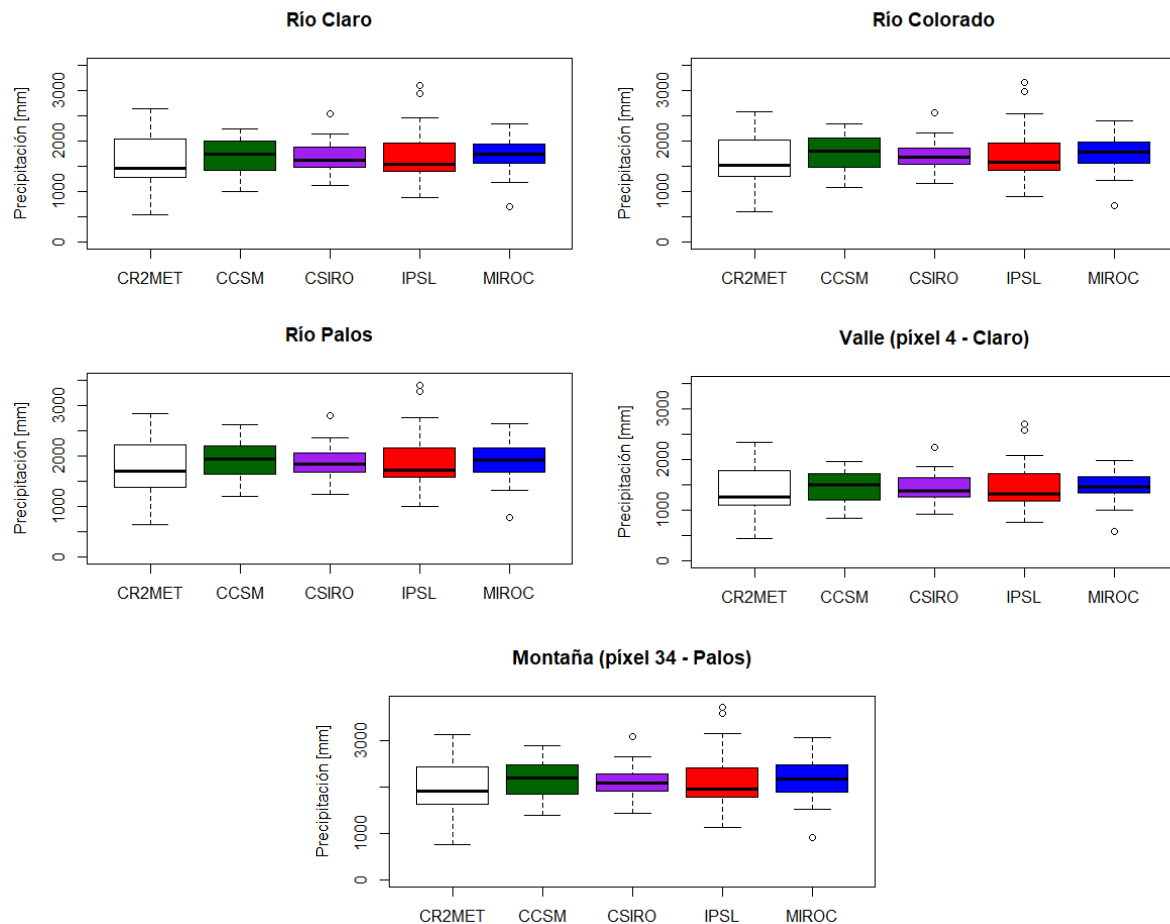


Figura 5.1: Boxplots de las series anuales de precipitación simuladas por el producto grillado CR2MET y los cuatro GCMs, durante el período histórico.

Al evaluar los principales estadísticos de estas series, se destaca que todos los GCMs presentan sesgos positivos en los montos de precipitación simulada, teniendo valores hasta 7,5% mayores en la media y 20% en la mediana. Los GCMs que presentan un mayor sesgo son CCSM y MIROC, mientras que las series que presentan mayores diferencias respecto a CR2MET son las asociada al píxel representativo de valle y a la cuenca del Río Claro. También es posible observar que, a excepción de IPSL, los GCMs presentan una menor desviación estándar que CR2MET, lo que da cuenta de una menor dispersión de los primeros. Por último, otro aspecto a considerar es la significativa diferencia en los valores mínimos de las series, siendo muy patente en el GCM CSIRO, que presenta en todos los casos valores sobre un 100% mayor a lo registrado por CR2MET.

En las Figura 5.2 se presenta la comparación entre las curvas de duración de la precipitación diaria obtenidas por CR2MET y cada GCM escalado en los cinco casos de estudio. De la misma forma, en la Figura 5.3 se presenta la comparación entre curvas de variación estacional de la precipitación durante el período histórico.

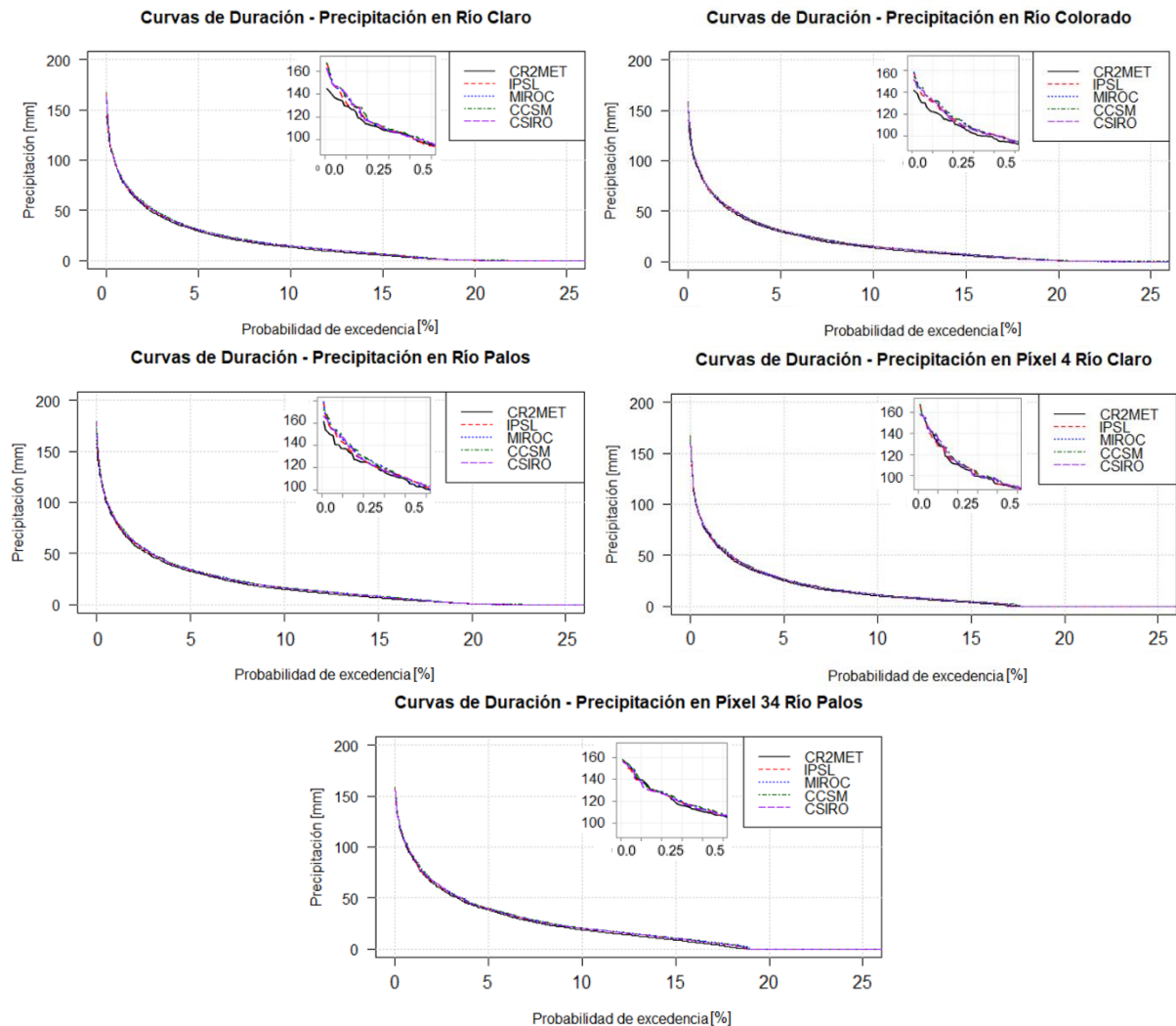


Figura 5.2: Comparación de las curvas de duración entre la precipitación diaria simulada por CR2MET y la simulada por cada uno de los cuatro GCMs escalados, durante el período histórico. En el recuadro superior se muestra un acercamiento al tramo con P_{exc} menor a 0,5%.

En todos los casos los cuatro GCM logran reproducir de forma correcta la curva de duración, sin presentar diferencias apreciables entre el desempeño de cada uno de ellos. Solo es posible detectar diferencias del orden los 10 mm en los valores más altos de precipitación, es decir, en aquellos con una probabilidad de excedencia menor al 0,2% (ver recuadros superiores de la Figura 5.2).

Por otra parte, las curvas de variación estacional muestran un adecuado ajuste durante los meses de menor precipitación (agosto a abril) y diferencias de hasta 50 mm en los meses de mayo y julio. Se destaca que no existen diferencias significativas entre los resultados entregados por cada GCM y que el comportamiento de las curvas es similar en los cinco casos estudiados, lo que es consistente con el hecho de encontrarse las tres cuencas contiguas unas con otras.

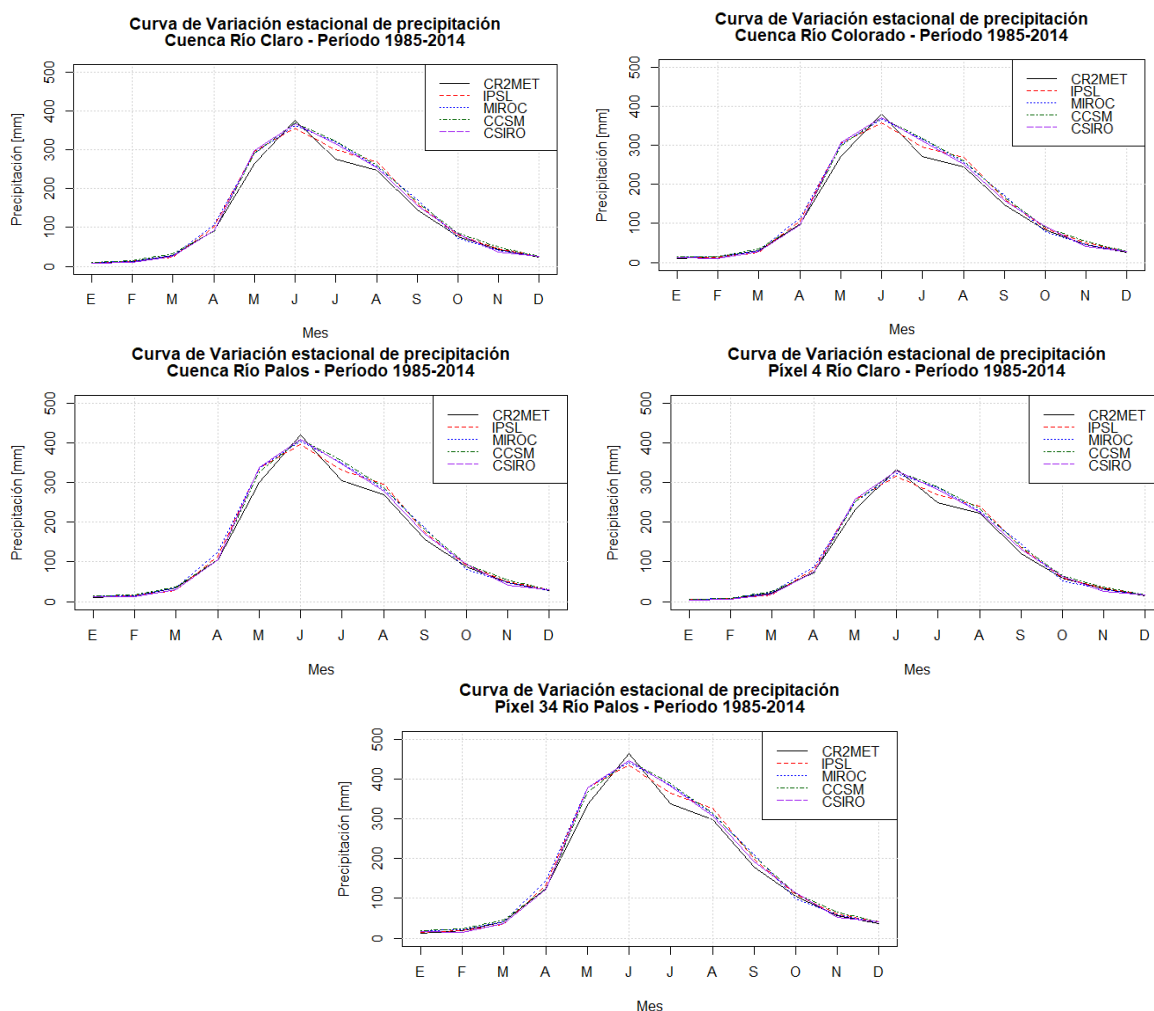


Figura 5.3: Comparación de las curvas de variación estacional entre la precipitación diaria simulada por CR2MET y la simulada por cada uno de los cuatro GCMs, durante el período histórico.

Adicionalmente, se realizó una comparación a nivel de píxel del número de días promedio con precipitación mayor a 0,5 mm al año reproducido por cada GCM en las cuencas. Los resultados de este proceso se encuentran en el Anexo C.1 del presente informe, mientras que, a modo de ejemplo, en la Figura 5.4 se muestra la diferencia obtenida respecto a CR2MET en los GCMs CSIRO, IPSL y MIROC, para el caso de la cuenca del Río Claro en los Queñes.

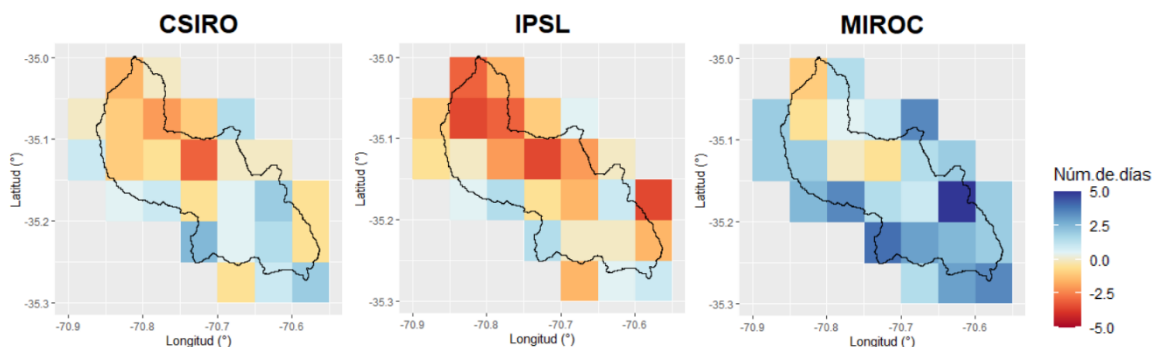


Figura 5.4: Diferencia en el n° de días promedio al año con precipitación mayor a 0,5 mm, respecto a CR2MET y a nivel de píxel, de algunos GCMs en Río Claro durante el período histórico.

5.1.2. Resultados Proyección futura en escenario RCP 4.5

Con el fin de evaluar y comparar las proyecciones de precipitación realizadas, en la Figura 5.5 se presentan simultáneamente las series completas asociadas a cada GCM en los cinco casos de estudio, mientras que en la Tabla 5.2 se resumen los principales estadísticos asociados a estas series en el período futuro. En esta misma tabla también se muestran la diferencia, tanto en los montos como porcentual, entre los valores de mediana reproducidos durante el período histórico o base y el período de evaluación de las proyecciones futuras.

Tabla 5.2: Principales estadísticos de las series anuales de precipitación simuladas por los cuatro GCMs, durante el período 2030 – 2060. Se incluye diferencia en los valores de mediana entre el período histórico y futuro, bajo el escenario RCP 4.5.

Simulación (GCM)	Media [mm]	Desv. Estánd. [mm]	Mediana [mm]	Valor Máximo [mm]	Valor Mínimo [mm]	Dif. periód. [mm]	Dif. en %
Claro – CCSM	1571	320	1612	2168	718	-120	-6,91
Claro – CSIRO	1529	308	1495	2636	918	-131	-8,07
Claro – IPSL	1591	436	1639	2697	710	95	6,13
Claro – MIROC	1703	429	1633	2756	986	-97	-5,60
Colorado – CCSM	1607	309	1643	2232	799	-151	-8,42
Colorado – CSIRO	1565	314	1540	2696	944	-145	-8,63
Colorado – IPSL	1615	438	1671	2748	736	95	5,99
Colorado – MIROC	1741	431	1662	2810	1006	-113	-6,39
Palos – CCSM	1760	336	1796	2473	892	-146	-7,51
Palos – CSIRO	1709	344	1694	2951	1031	-141	-7,69
Palos – IPSL	1766	474	1837	2988	804	111	6,44
Palos – MIROC	1909	471	1822	3101	1099	-106	-5,49
Valle – CCSM	1343	282	1382	1870	574	-115	-7,70
Valle – CSIRO	1312	276	1287	2306	767	-87	-6,36
Valle – IPSL	1372	386	1412	2316	599	101	7,710
Valle – MIROC	1467	386	1399	2394	817	-68	-4,62
Cordillera – CCSM	1986	365	2024	2730	1047	-158	-7,26
Cordillera – CSIRO	1929	378	1910	3280	1198	-168	-8,09
Cordillera – IPSL	1985	514	2070	3350	915	115	5,88
Cordillera - MIROC	2149	510	2103	3466	1266	-58	-2,68

Se evidencia que, con la sola excepción del GCM IPSL, los GCMs muestran descensos en las medianas de la precipitación durante el período futuro, los cuales se sitúan entre los 3% y 9%. Los mayores descensos se presentan en la cuenca del Río Colorado y en el GCM CSIRO, aunque el resto de las cuencas y casos estudiados manifiestan montos porcentuales de disminución similares. Por otro lado, las series no muestran un significativo aumento en la dispersión, pero existe un aumento en la frecuencia y disminución en los montos de los valores extremos (tanto máximos como mínimos) de precipitación futura.

En el Anexo C.2 se presentan, a nivel desagregado por píxel, figuras que dan cuenta de la cantidad de días promedio con precipitación al año en el período futuro en las tres cuencas estudiadas. En ellas también es posible evidenciar un descenso, especialmente en los GCMs CCSM y CSIRO.

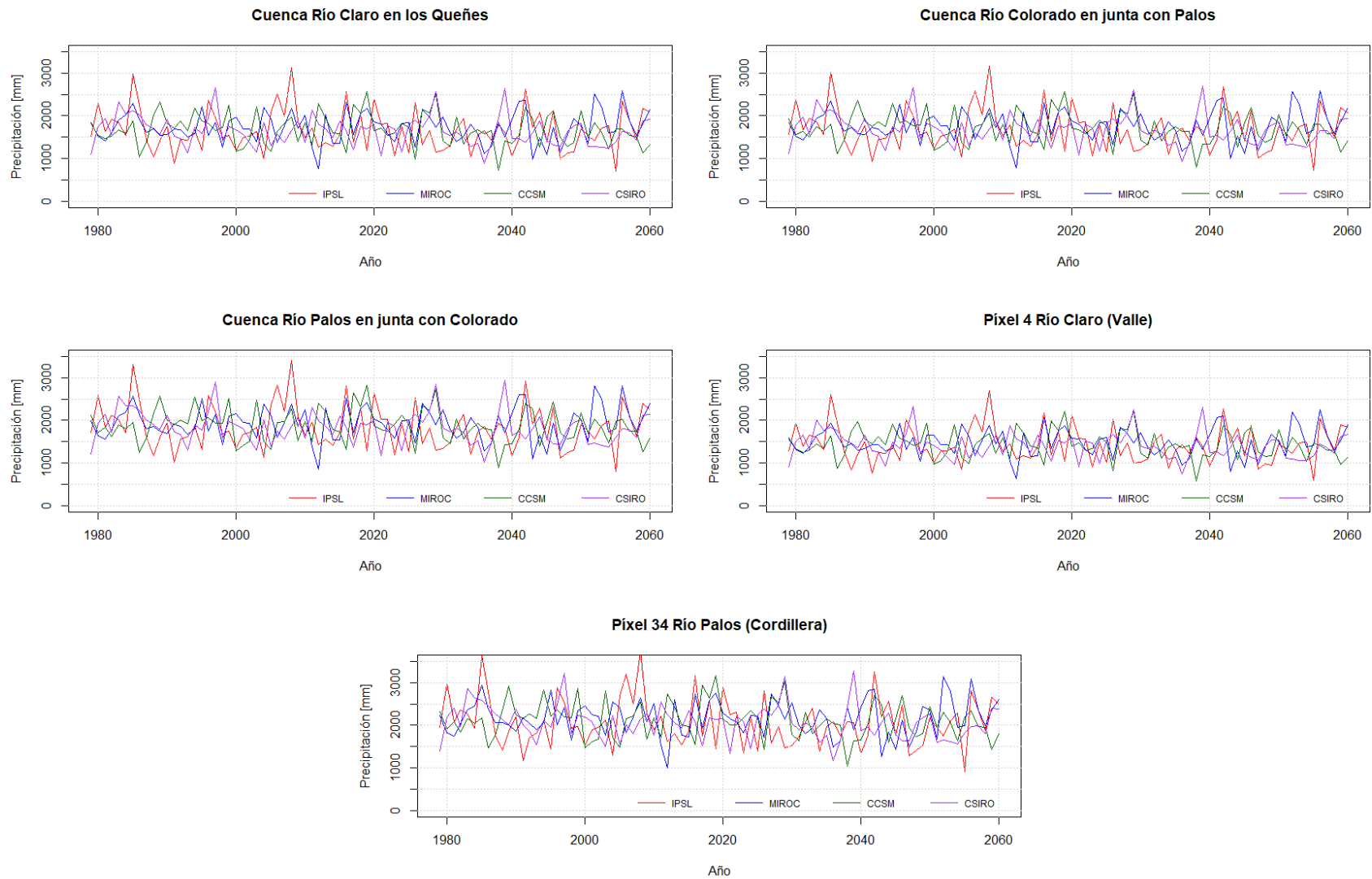


Figura 5.5: Series anuales de precipitación simuladas por cada uno de los cuatro GCMs escalados, entre los años 1979 – 2060.

5.2. Temperatura máxima

5.2.1. Resultados Período histórico (1985 – 2015).

En la Figura 5.6 se presenta el valor de la media, los valores extremos y los cuartiles asociados a las series anuales de temperatura máxima del producto grillado CR2MET y de cada uno de los cuatro GCMs considerados en este estudio, mientras que en el Anexo B se encuentran los gráficos y principales estadísticos de estas series.

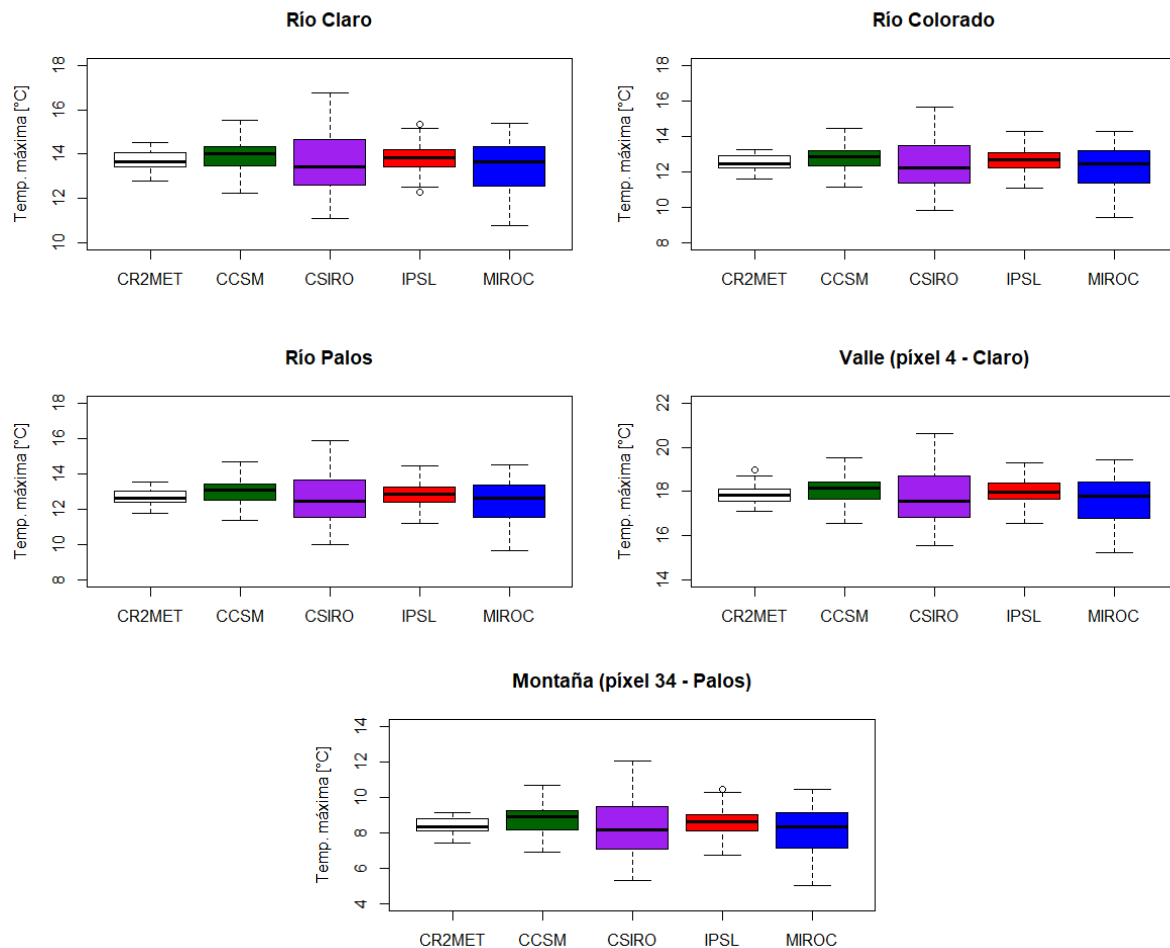


Figura 5.6: Boxplots de las series anuales de temperatura máxima simuladas por el producto grillado CR2MET y los cuatro GCMs, durante el período histórico.

Al igual que el caso de las series de precipitación, se evidencia que ninguna de las cuatro series asociadas a los GCMs escalados logra reproducir adecuadamente la variabilidad interanual. Sin embargo, todas ellas logran establecer un correcto ajuste con la media y mediana de las simulaciones de CR2MET durante el período base, existiendo en los cinco casos diferencias menores a 0,5 °C entre estos valores. Se destaca que los mejores ajustes se obtienen en el modelo MIROC, con diferencias de mediana entre 0 y 0,2 °C, mientras que los peores ajustes se observan en el modelo CCSM, el cual presenta sesgos positivos de hasta 0,5 °C en el píxel de cordillera.

Por otro lado, también es posible observar que las series asociadas a los GCMs presentan una mayor dispersión, hecho que se hace patente al comparar los valores extremos, siendo mayores los valores máximos y menores los mínimos en estos últimos, especialmente en el modelo climático CSIRO, donde existe una diferencia de 4 °C en el valor máximo en el píxel de cordillera.

Al comparar las curvas de duración durante el período histórico (Figura 5.7), es posible observar que los cuatro modelos climáticos muestran un buen ajuste en todas las probabilidades de excedencia, incluyendo a los valores extremos de menor frecuencia. Adicionalmente, no se observan diferencias significativas en el comportamiento de las curvas representadas en los cinco casos de estudio.

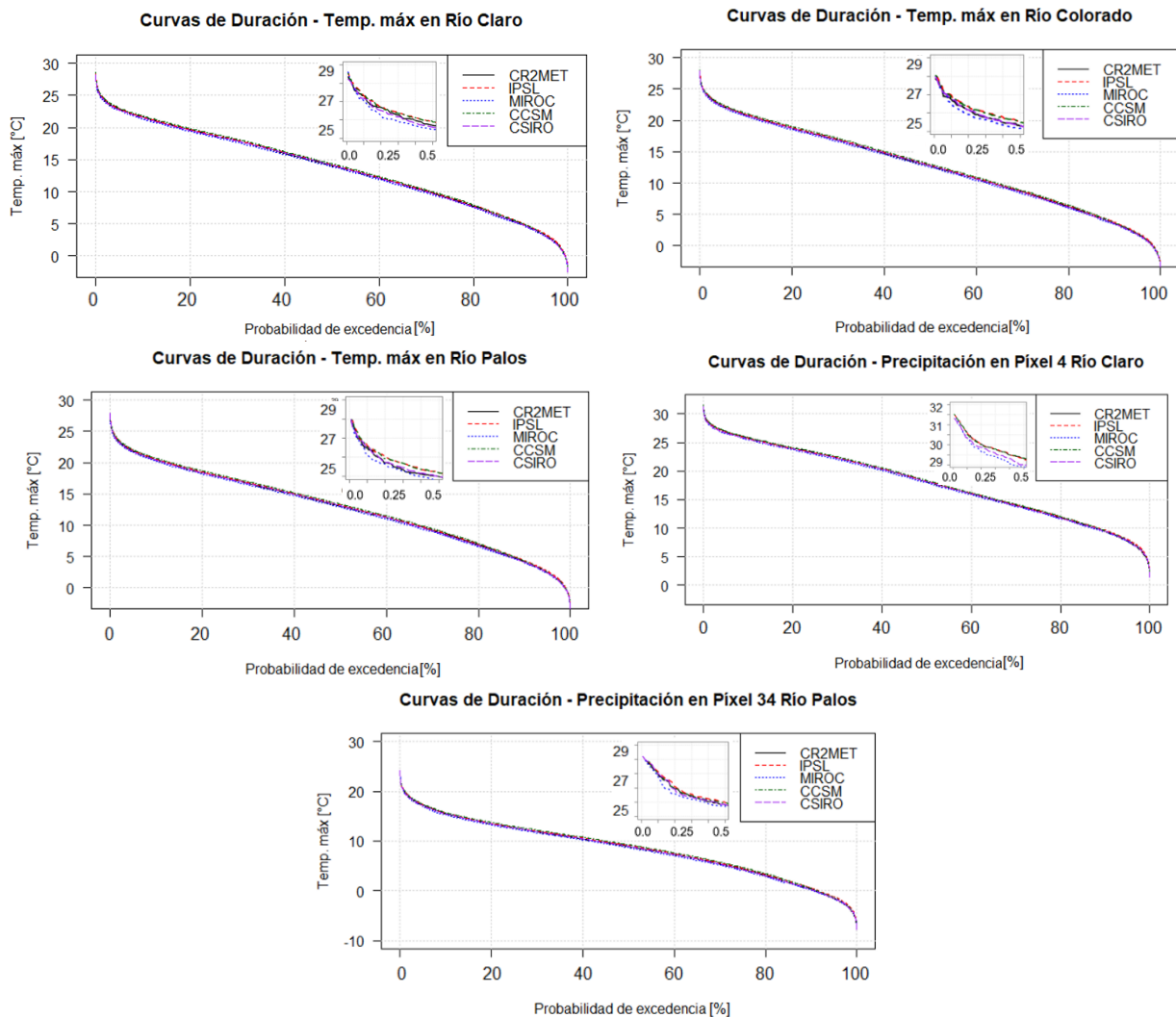


Figura 5.7: Comparación de las curvas de duración entre la temperatura máxima diaria simulada por CR2MET y la simulada por cada uno de los cuatro GCMs escalados, durante el período histórico. En el recuadro superior se muestra un acercamiento al tramo con P_{exc} menor a 0,5%.

En la Figura 5.8 se muestran las curvas de variación estacional para las tres cuencas y los dos píxeles representativos. En ella nuevamente se observa un correcto ajuste con CR2MET en los cuatro GCMs, sin mayores diferencias entre ellos, salvo por el caso del píxel de cordillera en donde

se observa que los modelos CCSM e IPSL poseen un sesgo positivo inferior a 1°C durante los meses de mayor temperatura (Noviembre a Marzo).

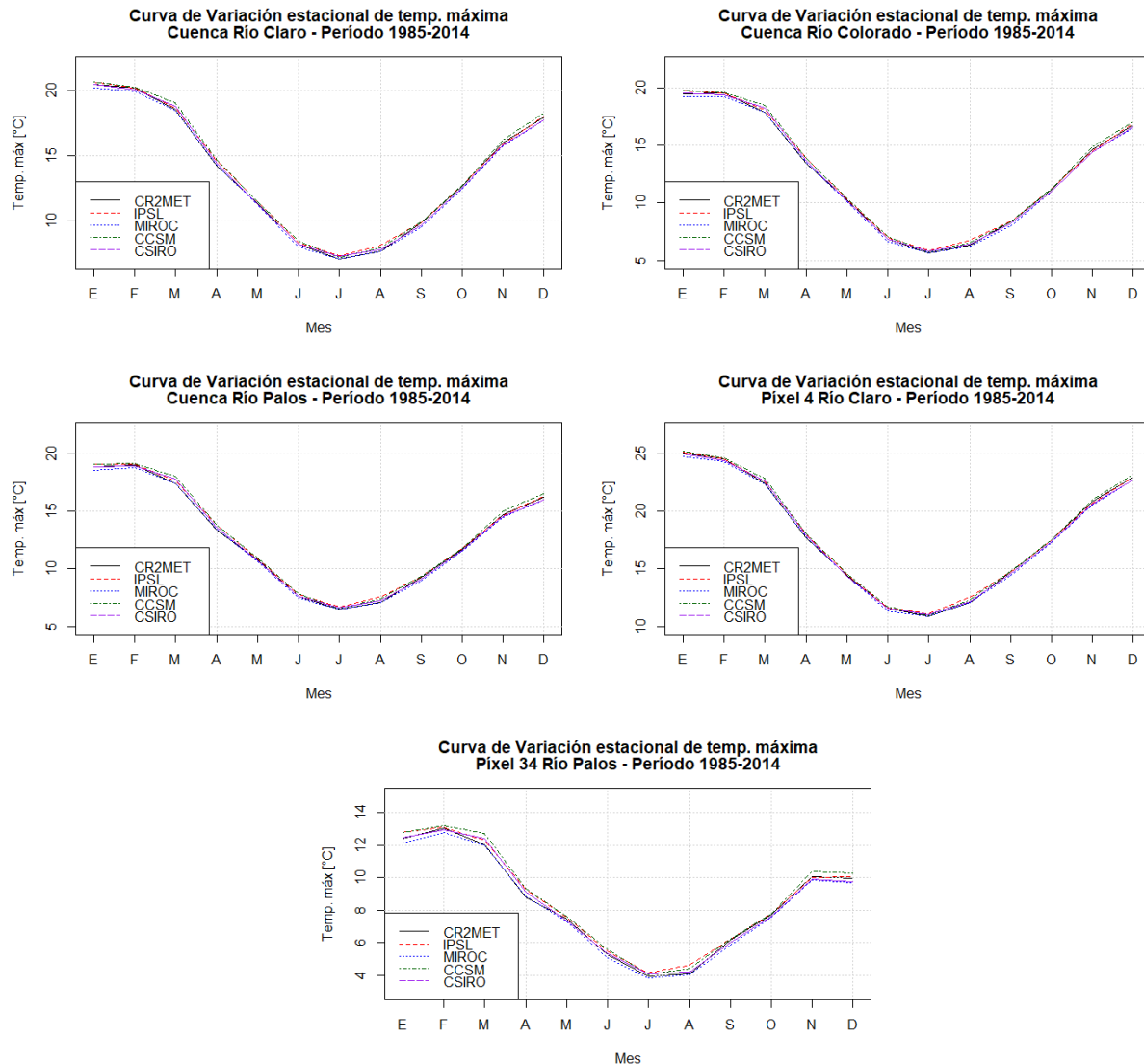


Figura 5.8: Comparación de las curvas de variación estacional entre la temperatura máxima simulada por CR2MET y la simulada por cada uno de los cuatro GCMs, durante el período histórico.

Adicionalmente, en el Anexo C.1 se encuentran los valores de la mediana de temperatura máxima obtenidos por CR2MET y los cuatro GCMs a nivel desagregado por píxel. Los resultados obtenidos muestran que todos los modelos climáticos logran un correcto ajuste a los valores de CR2MET en las tres cuencas estudiadas, con diferencias menores a 0,5 °C en todos los píxeles del dominio de estudio.

5.2.2. Resultados Proyección futura en escenario RCP 4.5

En la Figura 5.9 se presentan de forma simultánea las series completas asociadas a cada GCM en los cinco casos estudiados, mientras que en la Tabla 5.3 se reportan los principales estadísticos asociados a estas series. La última columna de esta tabla presenta la diferencia absoluta en grados Celsius entre los valores de las medianas del período de proyección futura y el período histórico.

Es posible observar que todos los modelos climáticos proyectan incrementos en la mediana de temperaturas máximas, con valores comprendidos entre los 1,29 °C y 2,8 °C. Las zonas en la que se proyectan mayores aumentos son el píxel de cordillera y las cuencas del Río Colorado y Río Palos, las cuales presentan elevaciones medias mayores al Río Claro. Por otra parte, los modelos IPSL y CSIRO son los que reportan mayores aumentos en las temperaturas máximas futuras y, además, los montos más altos en los valores extremos.

Tabla 5.3: Principales estadísticos de las series anuales de temperatura máxima simuladas por los cuatro GCMs, durante el período 2030 – 2060. Se incluye diferencia en los valores de mediana entre el período histórico y futuro bajo el escenario RCP 4.5.

Simulación (GCM)	Media [°C]	Desv. Estándar [°C]	Mediana [°C]	Valor Máximo [°C]	Valor Mínimo [°C]	Dif. período [°C]
Claro – CCSM	15,4	0,8	15,4	16,9	13,7	1,4
Claro – CSIRO	15,8	1,2	15,7	18,2	13,5	2,3
Claro – IPSL	16,2	1,2	16,3	18,4	14,0	2,4
Claro – MIROC	15,5	1,2	15,4	17,9	13,4	1,8
Colorado – CCSM	14,2	0,8	14,3	15,7	12,4	1,4
Colorado – CSIRO	14,7	1,3	14,5	17,2	12,3	2,3
Colorado – IPSL	15,0	1,2	15,2	17,4	12,7	2,5
Colorado – MIROC	14,4	1,2	14,3	16,9	12,2	1,8
Palos – CCSM	14,4	0,8	14,5	15,9	12,5	1,4
Palos – CSIRO	14,9	1,3	14,8	17,5	12,5	2,3
Palos – IPSL	15,3	1,2	15,4	17,6	12,9	2,5
Palos – MIROC	14,6	1,2	14,5	17,2	12,3	1,9
Valle – CCSM	19,4	0,7	19,5	20,8	17,9	1,3
Valle – CSIRO	19,8	1,1	19,7	22,0	17,7	2,1
Valle – IPSL	20,2	1,1	20,2	22,2	18,2	2,2
Valle – MIROC	19,5	1,1	19,4	21,7	17,6	1,6
Cordillera – CCSM	10,3	0,9	10,4	12,0	8,1	1,5
Cordillera – CSIRO	10,9	1,5	10,7	13,8	8,1	2,6
Cordillera – IPSL	11,2	1,3	11,4	13,9	8,7	2,8
Cordillera – MIROC	10,5	1,4	10,4	13,6	7,9	2,1

Otro aspecto por destacar es que las cuatro series anuales exhiben una tendencia al aumento, observable entre los años 2000 – 2060, en contraste al período 1985 – 2000 que no muestra una tendencia clara. En particular, esto se evidencia con claridad al observar las series asociadas al píxel de cordillera y a las cuencas de los Ríos Colorado y Palos, en donde, además, se observa un incremento en la dispersión de los datos a partir del año 2040.

Las tendencias futuras anteriormente descritas también se evidencian al evaluar los cambios a nivel de píxel (Anexo C.2), donde se observa un incremento de las temperaturas máximas de forma transversal en la mayoría de los píxeles de las tres cuencas, aunque especialmente notorio en aquellos ubicados a cotas más altas.

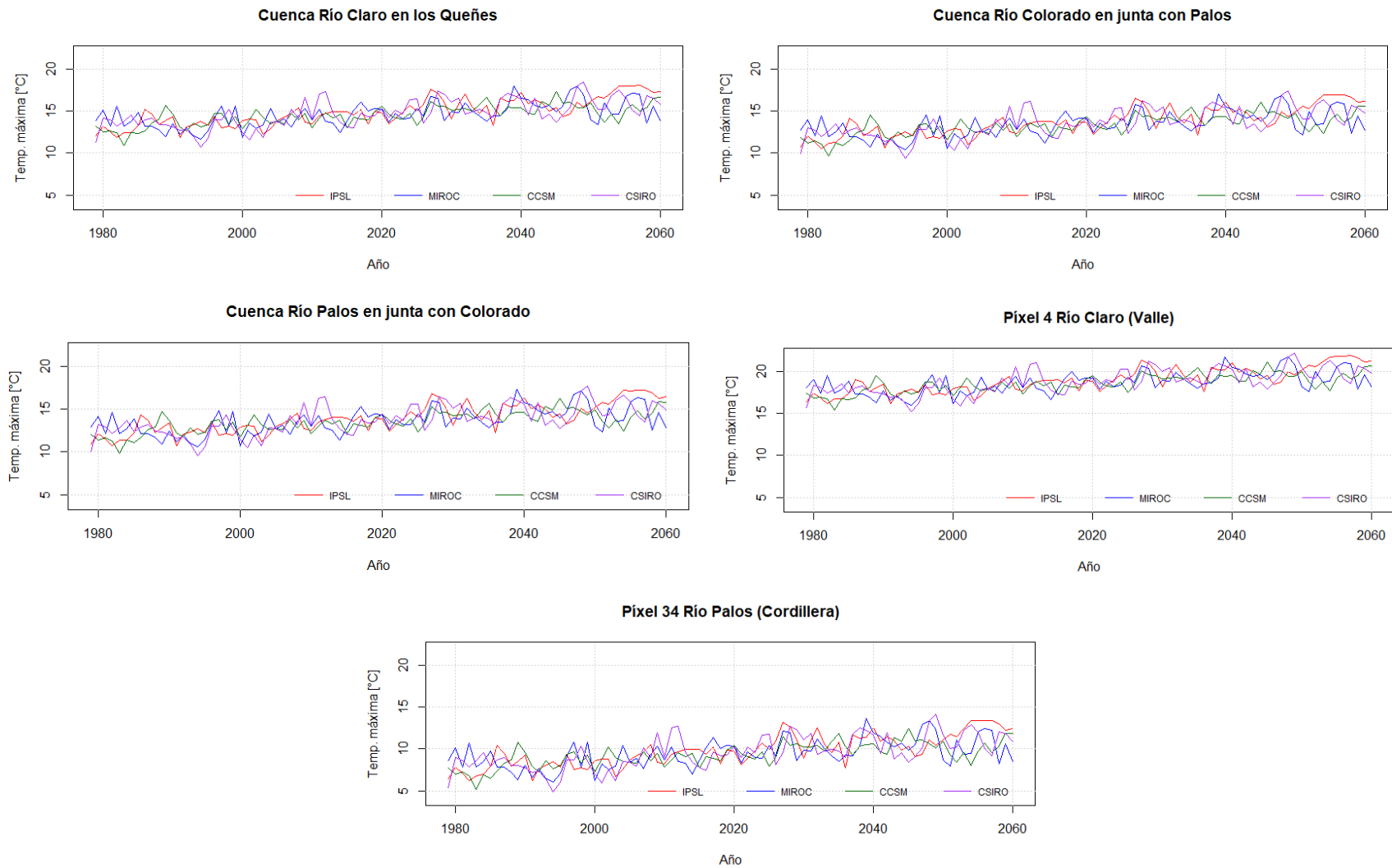


Figura 5.9: Series anuales de temperatura máxima simuladas por cada uno de los cuatro GCMs escalados, entre los años 1979 – 2060.

5.3. Temperatura mínima

5.3.1. Resultados Período histórico (1985 – 2015).

En la Figura 5.10 se muestran de forma conjunta, mediante *boxplots*, la media, los valores extremos y los cuartiles de las series anuales de temperatura mínima de CR2MET y los cuatro GCMs considerados. En el Anexo B se encuentra el gráfico y se reporta el valor de los estadísticos principales de estas series.

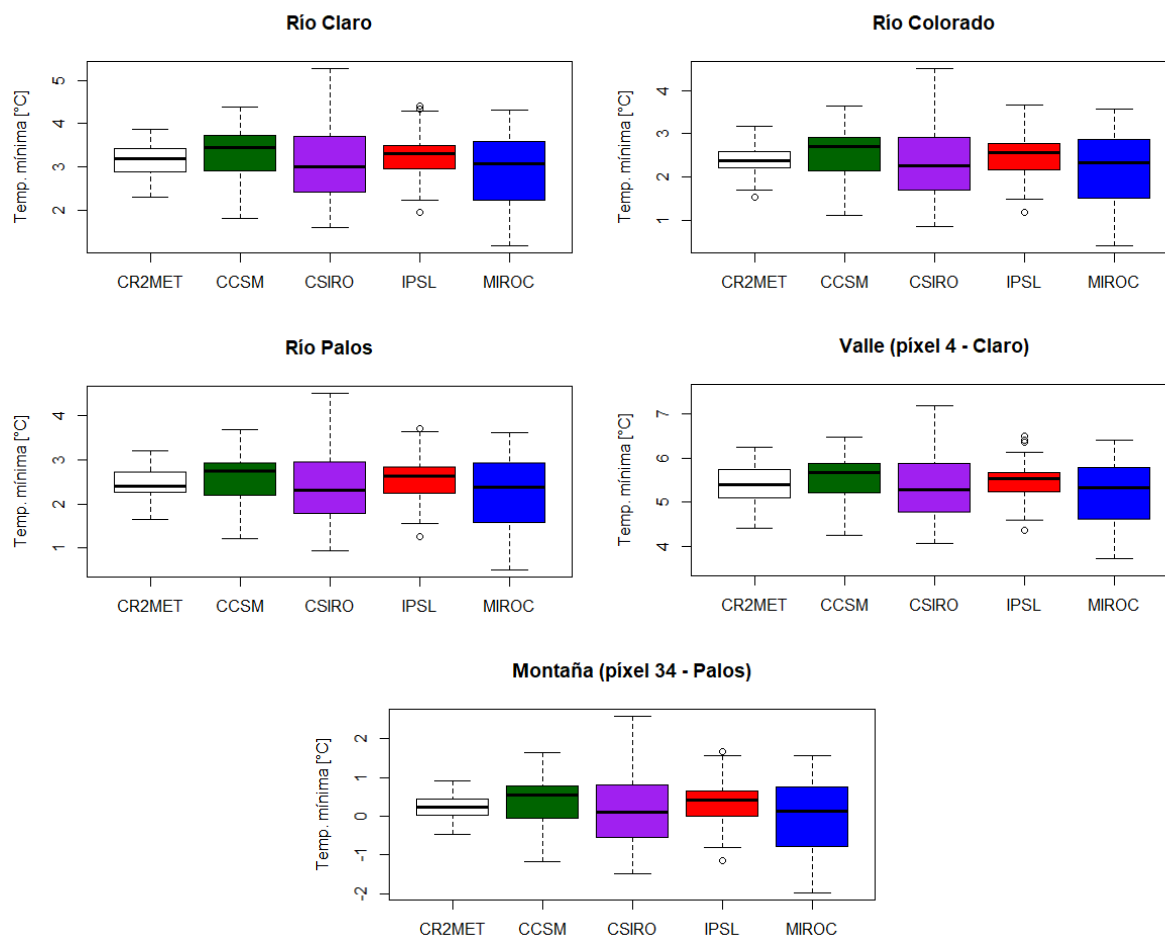


Figura 5.10: *Boxplots* de las series anuales de temperatura mínima simuladas por el producto grillado CR2MET y los cuatro GCMs, durante el período histórico.

Al igual que en el caso de las temperaturas máximas, las series asociadas a los GCMs no logran capturar la variabilidad temporal interanual de la serie de CR2MET. Sin embargo, las diferencias existentes entre la media y la mediana de los valores en el período evaluado son en todos los casos menores a 0,5 °C. Por otra parte, también es posible observar que las simulaciones de todos los modelos climáticos poseen una mayor dispersión y que existen diferencia superiores al 100% entre los valores extremos (máximo y mínimo) entre la serie reproducida por CR2MET y la de los GCMs CSIRO y MIROC.

Las curvas de duración y variación estacional asociadas a CR2MET y cada uno de los modelos climáticos son presentadas en las Figuras 5.11 y 5.12, respectivamente. En ambos casos se reportan resultados similares a lo obtenido previamente en las temperaturas máximas, es decir, curvas con ajustes satisfactorios, comportamiento similar de las curvas en las cinco zonas estudiadas y diferencias mínimas entre las simulaciones de un GCM y otro.

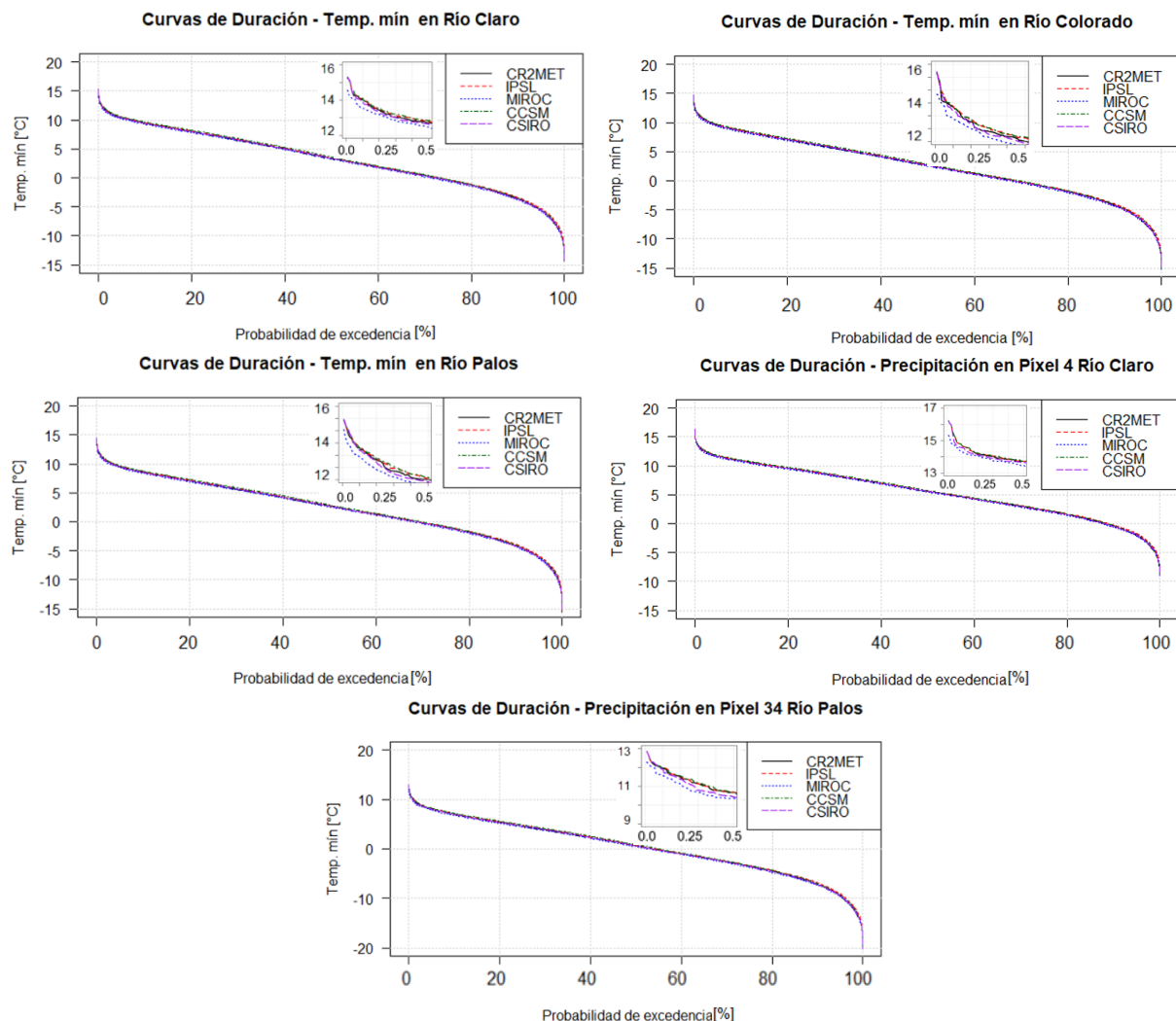


Figura 5.11: Comparación de las curvas de duración entre la temperatura mínima diaria simulada por CR2MET y la simulada por cada uno de los cuatro GCMs escalados, durante el período histórico. En el recuadro superior se muestra un acercamiento al tramo con P_{exc} menor a 0,5%.

En el Anexo C.1 se muestran los valores de la mediana de temperatura mínima desagregados a nivel de píxel en las tres cuencas. Los resultados allí expuestos muestran diferencias absolutas menores a 0,3 °C entre cada uno de los modelos climáticos y los datos del producto CR2MET, para cada uno de los píxeles de las tres cuencas estudiadas.

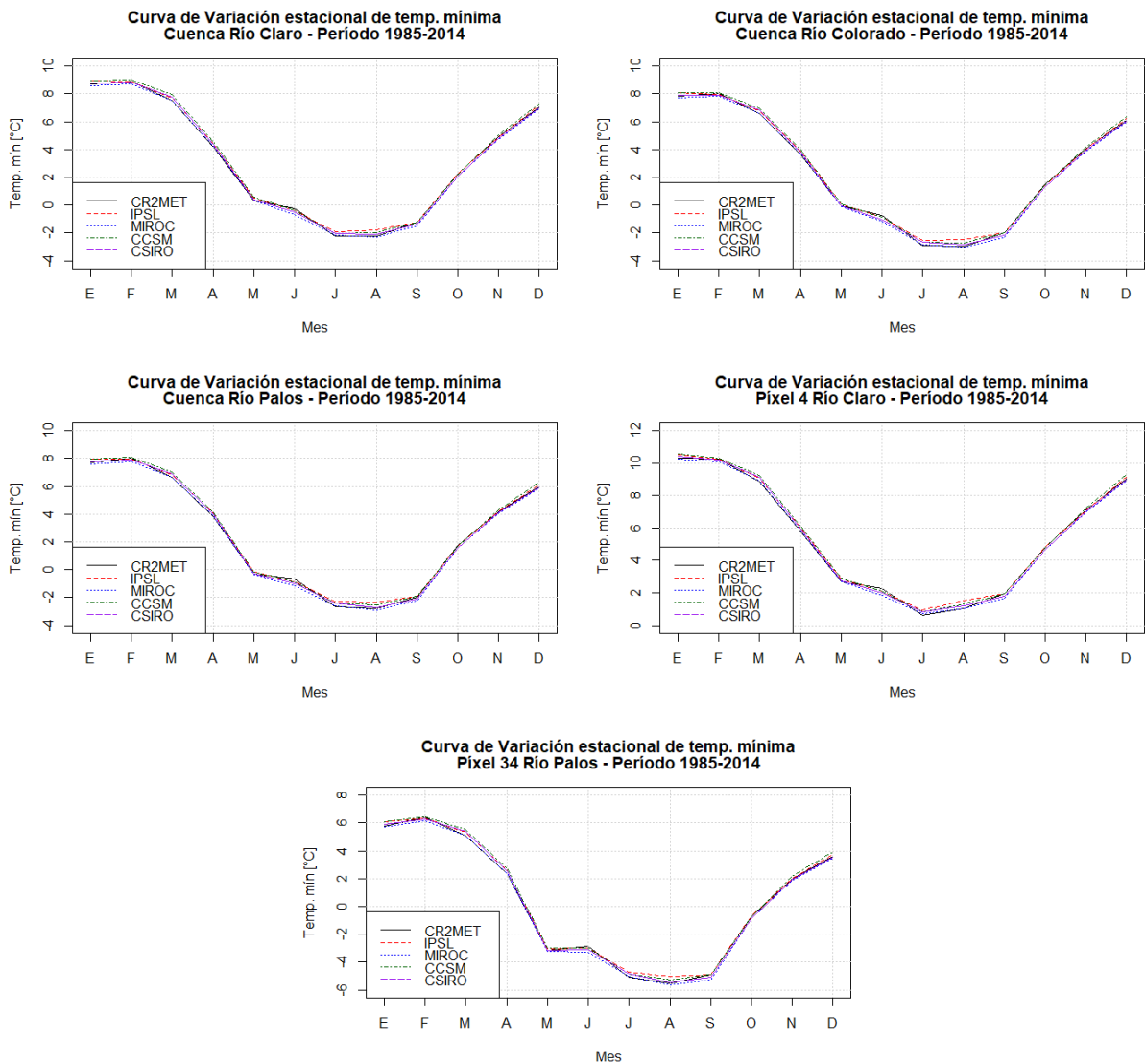


Figura 5.12: Comparación de las curvas de variación estacional entre la temperatura mínima simulada por CR2MET y la simulada por cada uno de los cuatro GCMs, durante el período histórico.

5.3.2. Resultados Proyección futura en escenario RCP 4.5

En la Figura 5.13 se exponen, de forma simultánea, las series anuales de temperatura mínima de cada modelo climático, durante todo el período de simulación. Por otra parte, en la Tabla 5.4 se reportan los estadísticos más relevantes asociados a estas series y también, en la última columna, se muestra la diferencia absoluta de temperatura entre los valores de las medianas del período de proyección futura y el período histórico.

Tal como en el caso de las temperaturas máximas, todos los GCMs señalan incrementos durante el período de proyección futura, esta vez con valores entre los 1 °C y 2,1 °C, siendo IPSL el modelo con mayores cambios y CCSM el que registra los menores aumentos de temperatura mínima. También es posible apreciar una tendencia positiva a partir del año 2000 y cambios de mayor importancia en las zonas y píxeles de mayor elevación (ver Anexo C.2).

Tabla 5.4: Principales estadísticos de las series anuales de temperatura mínima simuladas por los cuatro GCMs, durante el período 2030 – 2060. Se incluye diferencia en los valores de mediana entre el período histórico y futuro bajo el escenario RCP 4.5.

Simulación (GCM)	Media [°C]	Desv. Estánd. [°C]	Mediana [°C]	Valor Máximo [°C]	Valor Mínimo [°C]	Dif. período [°C]
Claro – CCSM	4,6	0,5	4,6	5,7	3,3	1,1
Claro – CSIRO	4,8	0,9	4,7	6,8	3,2	1,7
Claro – IPSL	5,2	0,9	5,3	7,0	3,6	1,9
Claro – MIROC	4,6	0,8	4,6	6,3	3,1	1,5
Colorado – CCSM	3,8	0,5	3,8	4,9	2,5	1,1
Colorado – CSIRO	4,1	0,9	4,0	6,0	2,4	1,7
Colorado – IPSL	4,5	0,9	4,5	6,2	2,9	1,9
Colorado – MIROC	3,9	0,8	3,9	5,6	2,4	1,5
Palos – CCSM	3,9	0,5	3,9	4,9	2,6	1,1
Palos – CSIRO	4,2	0,9	4,1	6,1	2,5	1,7
Palos – IPSL	4,5	0,9	4,6	6,3	2,9	1,9
Palos – MIROC	3,9	0,8	3,9	5,6	2,4	1,5
Valle – CCSM	6,7	0,5	6,7	7,7	5,6	1,0
Valle – CSIRO	6,9	0,8	6,8	8,6	5,5	1,5
Valle – IPSL	7,3	0,8	7,3	8,9	5,9	1,8
Valle – MIROC	6,7	0,7	6,7	8,2	5,5	1,3
Cordillera – CCSM	1,7	0,6	1,8	2,9	0,2	1,2
Cordillera – CSIRO	2,1	1,0	1,9	4,2	0,2	1,8
Cordillera – IPSL	2,5	1,0	2,5	4,4	0,7	2,1
Cordillera – MIROC	1,8	0,9	1,8	3,7	0,1	1,7

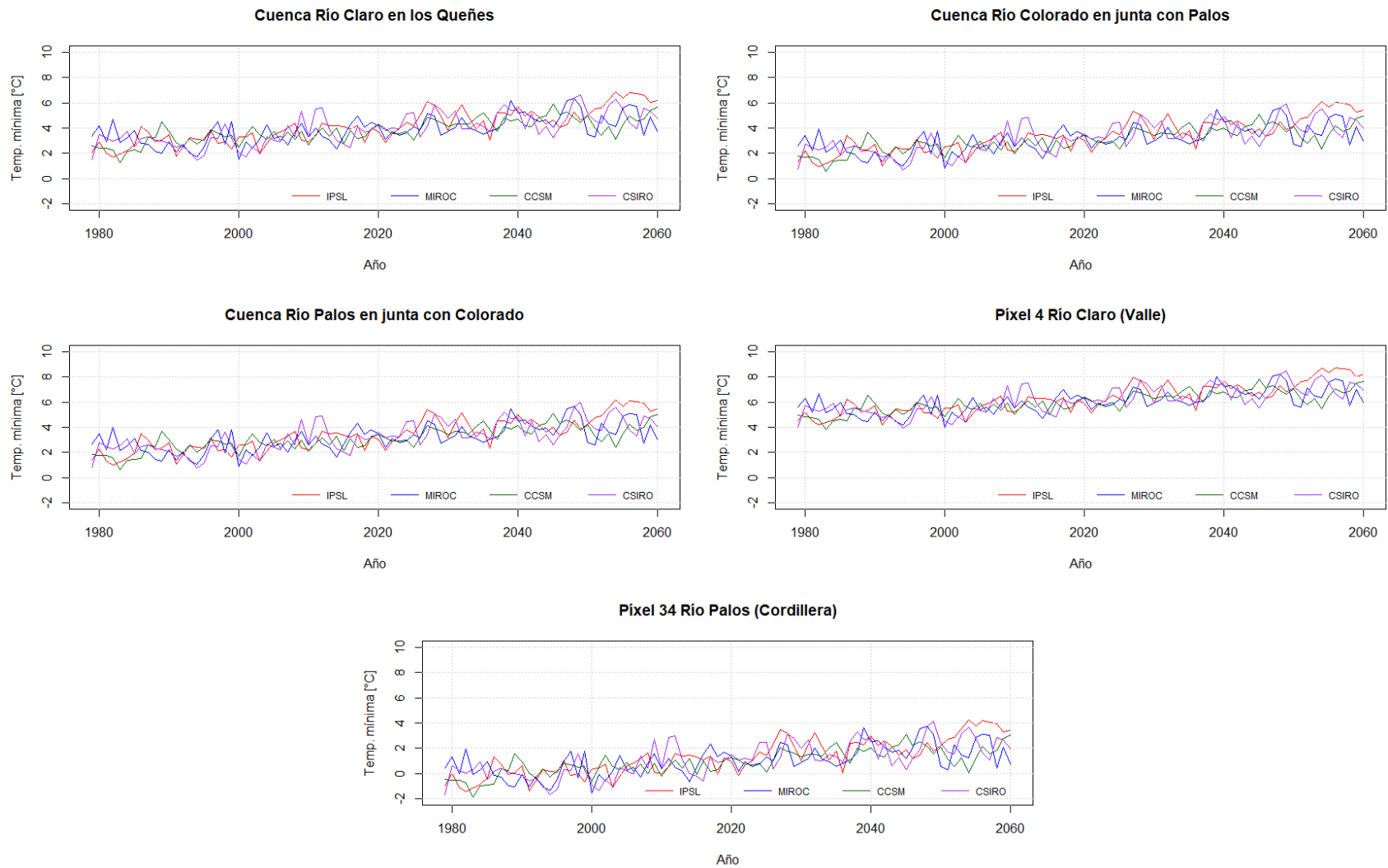


Figura 5.13: Series anuales de temperatura mínima simuladas por cada uno de los cuatro GCMs escalados, entre los años 1979 – 2060.

5.4. Discusión

En líneas generales, los resultados muestran que las series de los modelos climáticos escalados logran obtener un mejor ajuste a CR2MET en las temperaturas por sobre las precipitaciones. En todos los casos, los valores de media y mediana de las series anuales de precipitación y temperaturas extremas presentaron diferencias menores a un 20% y 0,5° C, respectivamente. Sin embargo, se presentaron diferencias de entre 50% y 100% en los valores extremos y la desviación estándar en las series de precipitación, y mayores a 1 °C en el caso de las series de temperaturas extremas. En particular, un aspecto a destacar fue que, en el período histórico, el proceso de escalamiento generó series anuales con una menor dispersión en la precipitación y una mayor dispersión en las temperaturas extremas

Por otra parte, en todos los casos se logró reproducir adecuadamente el comportamiento de la curvas de variación estacional de referencia, lo que se ve reflejado en la presencia de diferencias menores a 50 mm y a 0,3 °C entre los valores promedio mensuales de precipitación y temperaturas extremas, respectivamente. Asimismo, la comparación de curvas de duración diarias mostró diferencias de precipitación y temperaturas inferiores a 50 mm y 0,5 °C, y solamente en los valores más extremos (probabilidad de excedencia menor a 0,25%) de las series representativas de las cuencas. La existencia de esta discrepancia puede tener origen en el proceso de agregación espacial de píxeles.

A pesar de que la variabilidad temporal de las series anuales de precipitación y temperaturas no fue bien representada, este es un resultado esperable dada la metodología empleada durante el proceso de escalamiento. En particular, el método Quantile Delta Mapping, al ser un ajuste estadístico asincrónico y realizado a nivel diario durante un período histórico, solo asegura que asegure que los cuantiles y los valores medios a nivel agregado en el período sean bien reproducidos, pero no necesariamente los valores medios y la mediana de un año en particular. Asimismo, otro aspecto no considerado por este método son las posibles correlaciones que pueden existir entre variables escaladas (en este caso, precipitación y temperatura), lo cual podría ser abordado al incorporar alguna técnica una técnica de escalamiento que considere la covarianza entre variables, como es el caso del algoritmo de corrección de sesgo multivariable (MBC) propuesto por Cannon (2018).

En cuanto a las proyecciones futuras para el período 2030 – 2060 obtenidas, se destaca que la mayoría de los modelos climáticos reporta descensos en la mediana de precipitación ente un 5% y un 9% y una disminución en torno a los dos días en el número promedio de días con precipitación al año. La única excepción a estos resultados la constituye el modelo climático IPSL, el cual proyecta aumentos entre un 6% y 8% en la mediana de las precipitaciones. Por otro lado, los cambios proyectados en esta variable resultan ser homogéneos en toda el área de estudio, registrándose las mismas tendencias en las tres cuencas estudiadas,

Respecto a las proyecciones de temperaturas máxima y mínima reportadas por los GCMs, destaca el hecho de que todos indican aumentos entre 1,1 °C y 2,6 °C hacia el período 2030 - 2060, siendo los incrementos de temperatura máxima mayores a los de temperatura mínima. Los mayores cambios se experimentaron en las series asociadas a los modelos CSIRO e IPSL y, a diferencia de lo observado en la precipitación, existe una clara diferencia en la distribución espacial en los cambios proyectados, siendo mayores los aumentos de temperatura en aquellos píxeles ubicados a una mayor elevación.

Capítulo 6: Resultados Modelación Hidrológica

En el presente capítulo se reportan los resultados principales obtenidos en los procesos de calibración, implementación y simulación de los modelos hidrológicos GR4J (acoplado al módulo de nieve CemaNeige) y VIC. Adicionalmente se analizan las series de caudales obtenidas tanto en el período base como las proyecciones realizadas bajo los distintos modelos climáticos y escenarios de emisiones considerados en este trabajo.

6.1. Calibración del Modelo GR4J con módulo CemaNeige

En la Tabla 6.1 se expone el valor de los parámetros con los cuales se inició el algoritmo de optimización y el valor que estos adquirieron tras el proceso de calibración del modelo hidrológico GR4J acoplado al módulo de nieves CemaNeige, en cada una de las tres cuencas. En ella es posible observar grandes discrepancias en los valores de los parámetros según la función objetivo empleada (NSE, KGE o logNSE), especialmente en los parámetros GR4J X1 y GR4J X3, los cuales están asociados al volumen de almacenamiento de los dos estanques que contiene la estructura del modelo.

Tabla 6.1: Valor de los Parámetros del modelo GR4J y CemaNeige obtenidos en la calibración de las tres cuencas estudiadas.

Cuenca - Función Objetivo	GR4J X1 [mm]	GR4J X2 [mm/día]	GR4J X3 [mm]	GR4J X4 [día]	CN X1 [-]	CN X2 [mm/°C/día]
Parámetros iniciales	408,774	2,646	131,264	1,174	0,962	2,249
Claro – Calib. NSE	1326,103	4,277	98,494	1,378	0,985	3,787
Claro – Calib. KGE	917,129	3,869	76,162	1,485	0,986	3,925
Claro – Calib. NSE _{log}	1935,417	5,000	172,770	1,211	0,979	4,080
Colorado – Calib. NSE	2000,000	5,000	284,291	1,095	0,996	4,586
Colorado – Calib. KGE	1621,168	4,021	138,379	1,261	0,997	4,821
Colorado – Calib. NSE _{log}	2000,000	5,000	300,000	1,280	0,993	3,364
Palos – Calib. NSE	2000,000	5,000	179,468	1,231	0,998	3,572
Palos – Calib. KGE	2000,000	4,936	125,211	1,310	0,998	3,755
Palos – Calib. NSE _{log}	2000,000	5,000	97,514	1,466	0,999	2,619

Para evaluar el desempeño de las calibraciones realizadas, según función objetivo y cuenca, se calculó el valor de distintas métricas para cada una de las simulaciones realizadas en base a los parámetros de la Tabla 6.1, entre ellas: el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE) y los criterios de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y Kling-Gupta (KGE). En la Tabla 6.2 se muestran los resultados obtenidos durante el período en que se efectuó la calibración, correspondiente a los años hidrológicos entre 1985/86 – 2005/06, mientras que en la Tabla 6.3 se reportan las mismas métricas para el período definido como validación (años hidrológicos entre 2006/07 – 2014/15) y en la Tabla 6.4 se reportan para los períodos de calibración y validación conjuntamente.

Tabla 6.2: Valor de las métricas de comparación obtenidas en las calibraciones de cada cuenca durante el período de Calibración (1985/86 – 2005/06). Modelo GR4J y CemaNeige.

Método de Calibración	R² [-]	RMSE [m ³ /s]	NSE [-]	KGE [-]
Claro – Sin calibrar	0,631	3,318	0,513	0,684
Claro – Calibr. NSE	0,683	2,681	0,682	0,770
Claro – Calibr. KGE	0,683	2,797	0,654	0,826
Claro – Calibr. NSE _{log}	0,658	2,880	0,633	0,614
Colorado – Sin calibrar	0,367	4,125	-0,203	0,462
Colorado – Calibr. NSE	0,507	2,670	0,496	0,639
Colorado – Calibr. KGE	0,381	3,735	0,014	0,557
Colorado – Calibr. NSE _{log}	0,492	2,709	0,481	0,607
Palos – Sin calibrar	0,400	4,305	-0,413	0,359
Palos – Calibr. NSE	0,488	2,777	0,412	0,676
Palos – Calibr. KGE	0,453	3,408	0,114	0,580
Palos – Calibr. NSE _{log}	0,476	2,974	0,326	0,676

Tabla 6.3: Valor de las métricas de comparación obtenidas en las calibraciones de cada cuenca durante el período de Validación (2006/07 – 2014/15). Modelo GR4J y CemaNeige.

Método de Calibración	R² [-]	RMSE [m ³ /s]	NSE [-]	KGE [-]
Claro – Sin calibrar	0,586	2,969	0,538	0,526
Claro – Calibr. NSE	0,574	2,973	0,537	0,503
Claro – Calibr. KGE	0,591	2,822	0,583	0,603
Claro – Calibr. NSE _{log}	0,497	3,326	0,420	0,358
Colorado – Sin calibrar	0,432	2,684	0,382	0,688
Colorado – Calibr. NSE	0,444	2,565	0,435	0,476
Colorado – Calibr. KGE	0,380	2,876	0,291	0,607
Colorado – Calibr. NSE _{log}	0,440	2,590	0,424	0,449
Palos – Sin calibrar	0,458	3,035	0,216	0,593
Palos – Calibr. NSE	0,445	2,578	0,434	0,526
Palos – Calibr. KGE	0,381	2,878	0,295	0,563
Palos – Calibr. NSE_{log}	0,486	2,512	0,463	0,621

Tabla 6.4: Valor de las métricas de comparación obtenidas en las calibraciones de cada cuenca durante el período de Calibración + Validación (1985/86 – 2014/15). Modelo GR4J y CemaNeige.

Método de Calibración	R ² [-]	RMSE [m ³ /s]	NSE [-]	KGE [-]
Claro – Sin calibrar	0,610	3,220	0,526	0,672
Claro – Calibr. NSE	0,650	2,769	0,649	0,715
Claro – Calibr. KGE	0,655	2,804	0,640	0,796
Claro – Calibr. NSE _{log}	0,614	3,017	0,584	0,562
Colorado – Sin calibrar	0,396	3,735	-0,028	0,529
Colorado – Calibr. NSE	0,494	2,638	0,487	0,605
Colorado – Calibr. KGE	0,381	3,490	0,103	0,591
Colorado – Calibr. NSE _{log}	0,481	2,672	0,474	0,575
Palos – Sin calibrar	0,412	3,970	-0,204	0,438
Palos – Calibr. NSE	0,483	2,719	0,435	0,655
Palos – Calibr. KGE	0,437	3,259	0,189	0,607
Palos – Calibr. NSE _{log}	0,483	2,845	0,382	0,686

Se puede observar que durante el período de calibración las cuencas del Río Claro y Río Colorado obtuvieron mejores ajustes estadísticos (R² de 0,68 y 0,51, respectivamente) en comparación al período de validación, donde los valores de R² de ambas cuencas fue menor. Esto último no se evidencia en la cuenca del Río Palos, donde los valores del coeficiente de determinación de ambos períodos son similares y en todos los casos inferior a 0,49.

Considerando los mejores resultados del período de calibración, la cuenca del Río Claro en los Queñes es la que entregó un mejor desempeño en las métricas (R² = 0,68; NSE = 0,68; KGE = 0,83), en contraste a la cuenca del Río Palos en junta con Colorado, la cual reportó los peores desempeños (R² = 0,49; NSE = 0,41; KGE = 0,68). Sin embargo, en todos los casos se obtienen valores de NSE mayores a 0,4 y de KGE mayores a 0,65.

Al analizar las métricas obtenidas por cada una de las funciones objetivo, se desprende que la calibración asociada a KGE es la de mejor desempeño en la cuenca del Río Claro, con valores de NSE de 0,654 y de KGE de 0,826 durante el período de calibración, y resultados similares se obtienen al evaluar en el período de calibración + validación. Por otra parte, en las cuencas del Río Colorado y Río Palos la calibración mediante función objetivo NSE fue la que reportó un mejor ajuste, con valores de NSE superiores a 0,4 y de KGE superiores a 0,6 tanto en el período de calibración como en el de simulación completa. En estas últimas dos cuencas se constata, además, que las simulaciones realizadas con parámetros calibrados obtuvieron un peor desempeño en KGE que la simulación sin calibrar durante el período de validación. No obstante lo anterior, al evaluar los resultados en el período completo (1985/86 – 2014/15) las simulaciones calibradas mostraron mejor desempeño en todas las métricas consideradas, respecto a la simulación efectuada con los parámetros iniciales (sin calibrar).

Al evaluar las curvas de duración vinculadas a cada una de las simulaciones realizadas y compararlas con los valores observados (Figura 6.1), resulta evidente la mejora en el desempeño obtenida al considerar parámetros calibrados, en especial en aquellos valores con una probabilidad de excedencia mayor al 20% (es decir, caudales medios y bajos). Adicionalmente, lo observado en estas curvas es consistente con los resultados obtenidos previamente al comparar métricas: la

calibración KGE es la que logra un mejor ajuste en Río Claro, mientras que en la NSE es la de mejor desempeño en Río Colorado y Río Palos.

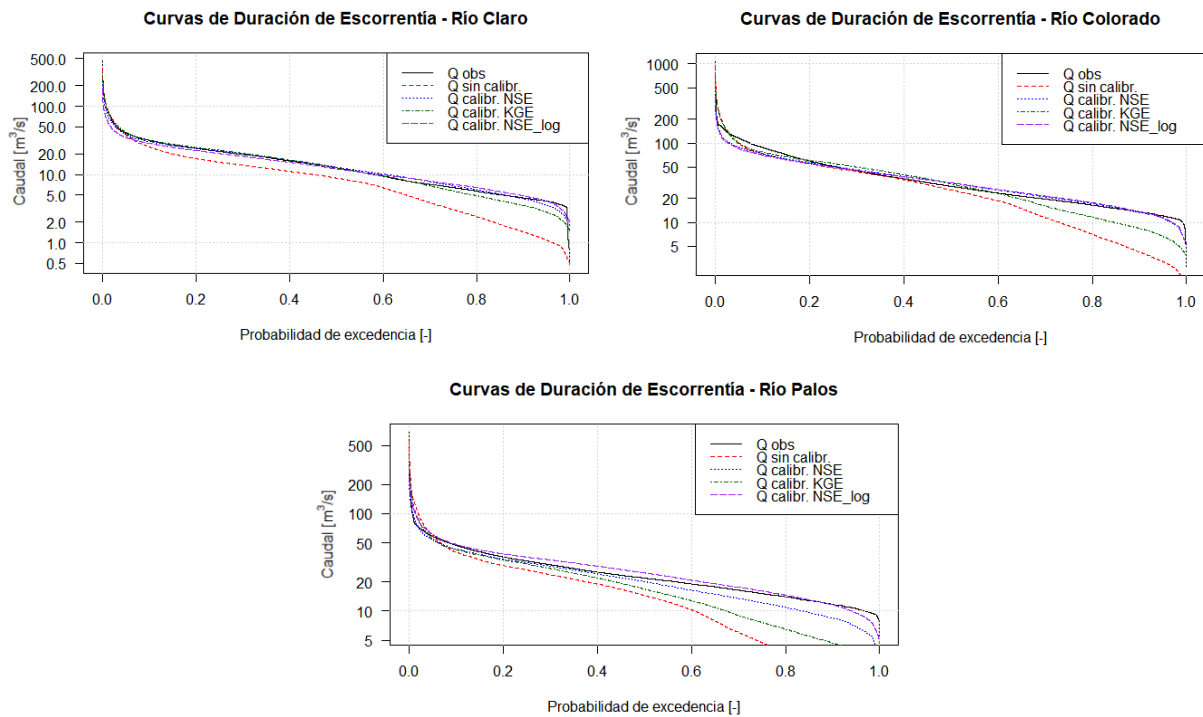


Figura 6.1: Curvas de duración observada en cada cuenca y comparación con las simulaciones asociadas a las funciones objetivo empleadas en calibración.

En la Figura 6.2 se grafican, para cada cuenca, las curvas de variación estacional de los caudales observados y simulados en base a los distintos parámetros calibrados, durante el período base. En ellas se evidencia la mejoría obtenida en el proceso de calibración, ya que la curva de la simulación sin calibrar (curva roja) resulta ser la que presenta mayores diferencias respecto a la curva observada. Además, es posible observar que la cuenca del Río Claro es la que consigue los mejores ajustes, existiendo en todos los meses diferencias inferiores a $4 \text{ m}^3/\text{s}$ entre la curva observada y las asociadas a los parámetros calibrados según las funciones objetivo KGE y NSE. Por el contrario, en las cuencas del Río Colorado y Río Palos se presentan sesgos de hasta $30 \text{ m}^3/\text{s}$ durante los meses asociados a los *peak* de caudales en los períodos pluvial y de deshielo. No obstante lo anterior, las curvas asociadas a la calibración de NSE es la que logra captar de mejor forma el régimen hidrológico en estas dos cuencas.

Por último, en la Figura 6.3 se presenta una comparación directa de las series de tiempo de escorrentía entre los valores observados en las estaciones y las simulaciones de GR4J empleando el mejor set de parámetros calibrados de cada cuenca, definidos como aquellos que consiguen un mayor valor en el índice de eficiencia KGE. Adicionalmente, se incluyen las series de tiempo del almacenamiento de los dos estanques que componen la estructura del modelo hidrológico (estanques de producción y ruteo). Al evaluar dichas series se aprecia que los valores extremos debidos a crecidas pluviales no son bien representados, mientras que los caudales de los meses de deshielo son subestimados por el modelo. Sin embargo, este logra captar adecuadamente la

variabilidad interanual de la serie y, en particular, los valores bajos de caudal asociados a los años 1998 – 1999 y 2010 – 2015, donde se registraron sequías hidrológicas.

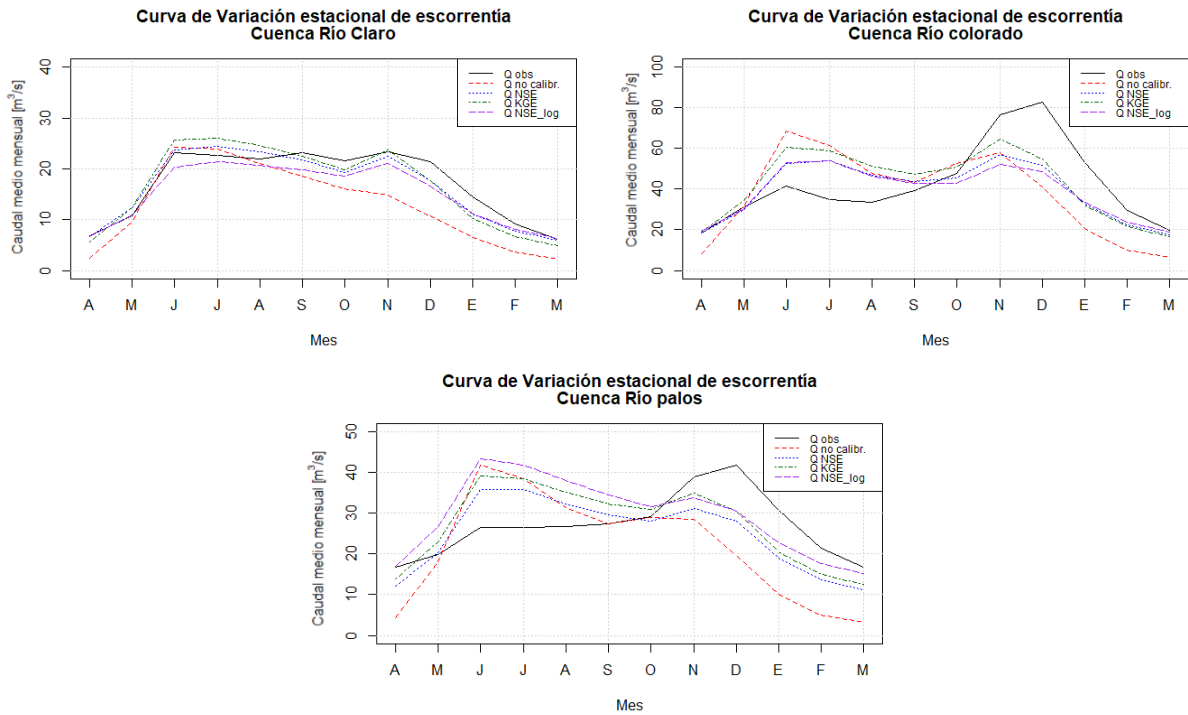


Figura 6.2: Curvas de variación estacional observada en cada cuenca y comparación con las simulaciones asociadas a las funciones objetivo empleadas en calibración. Modelo GR4J y CemaNeige.

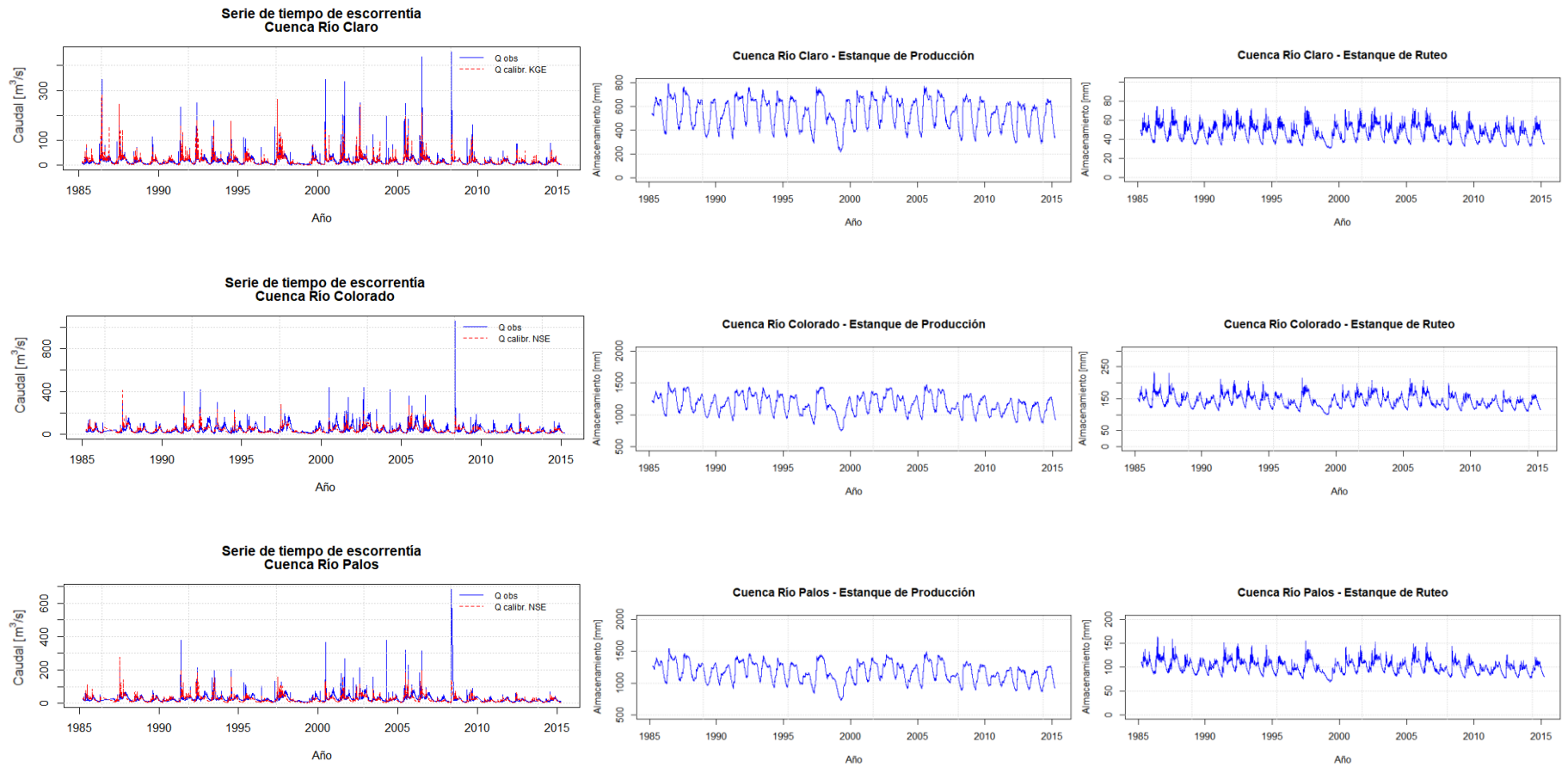


Figura 6.3: Comparación entre serie de caudales observados y simulados con la mejor calibración (izquierda), y evolución temporal del almacenamiento de los estanques de producción (centro) y ruteo (derecha) en cada simulación escogida.

6.2. Modelación hidrológica en cuenca del Río Claro en los Queñes

6.2.1. Resultados Período histórico en cuenca Río Claro

En la Tabla 6.5 se exponen algunos de los principales estadísticos de las series de escorrentía observada y simuladas por los dos modelos hidrológicos considerados en el presente estudio en la cuenca del Río Claro en los Queñes durante el período histórico (años hidrológicos 1985/86 – 2014/15). Debe notarse que, para evaluar el desempeño de las modelaciones futuras realizadas, las series asociadas a cada uno de los cuatro modelos climáticos se contrastan con los estadísticos de la serie asociada a las forzantes provistas por CR2MET en el modelo hidrológico respectivo. Esto se debe a que el proceso de escalamiento estadístico mediante QDM fue realizado teniendo como referencia a las forzantes climáticas de CR2MET, y no a los valores directamente observados en estaciones.

Tabla 6.5: Principales estadísticos de las series de escorrentía diaria observada y simuladas por los modelos hidrológicos GR4J y VIC durante el período base en la cuenca del Río Claro en los Queñes.

Simulación	Media [m ³ /s]	Desv. Estánd. [m ³ /s]	Valor mín. [m ³ /s]	1° Cuartil [m ³ /s]	Mediana [m ³ /s]	3° Cuartil [m ³ /s]	Valor máx. [m ³ /s]
Q observado	16,99	19,19	0,47	6,42	12,50	21,80	456,00
GR4J – CR2MET	18,73	16,95	1,66	7,83	15,10	24,88	254,69
GR4J – CCSM	20,58	22,21	1,82	6,48	15,73	25,79	372,16
GR4J – CSIRO	20,09	19,67	1,71	6,70	16,88	25,84	362,46
GR4J – IPSL	19,95	22,82	2,09	6,05	14,42	24,90	445,37
GR4J – MIROC	20,52	20,30	1,67	7,43	16,35	25,27	257,48
VIC – CR2MET	15,42	18,00	0,60	4,38	9,77	21,22	300,42
VIC – CCSM	19,42	21,03	0,50	4,96	12,78	26,84	280,33
VIC – CSIRO	18,94	19,81	0,61	4,56	11,85	26,38	231,33
VIC – IPSL	18,99	21,75	0,63	4,48	11,34	25,52	311,86
VIC – MIROC	19,21	19,51	0,49	5,12	13,07	25,62	187,80

Se observa que el modelo hidrológico VIC subestima la media y mediana de los caudales observados, mientras que, por el contrario, el modelo GR4J sobreestima el valor de estos estadísticos. Por otra parte, VIC muestra un mejor desempeño que GR4J al reproducir la desviación estándar y los valores más extremos de la serie de caudales. En cuanto a la comparación entre las series asociadas a los modelos climáticos, IPSL y CSIRO son los que muestran un mejor ajuste en los valores de media y mediana del período en VIC, mientras que en GR4J los GCMs que presentan mejor desempeños son CCSM e IPSL.

Con la finalidad de evaluar gráficamente los resultados recién expuestos, en la Figuras 6.4, 6.5 y 6.6 se presentan, respectivamente, las series anuales, curvas de duración y curvas de variación de cada una de las series de caudales modeladas en la cuenca del Río Claro en los Queñes.

Se observan importantes sesgos entre la serie anual simulada bajo CR2MET y las series anuales simuladas a partir de los GCMs, con diferencias de caudal de hasta 35 m³/s para un mismo año. No obstante, las series de IPSL (curva verde) y MIROC (curva púrpura) muestran un mejor desempeño

al reproducir las principales tendencias y variabilidad interanual en comparación a los otros modelos climáticos. Por otro lado, el análisis de curvas de duración muestra que todos los modelos climáticos logran un buen ajuste con la curva simulada bajo CR2MET, particularmente en los valores de caudal medios (probabilidad de excedencia comprendida entre 20% y 80%). Finalmente, al evaluar la variabilidad estacional se constatan dos situaciones opuestas: mientras que las series de los GCMs del modelo hidrológico GR4J sobreestiman la escorrentía del período pluvial (entre los meses de junio y septiembre) y subestiman la del período de deshielo (entre octubre y marzo), las series de los GCMs vinculados al modelo hidrológico VIC se ajustan adecuadamente al período pluvial, pero muestran sesgos positivos durante el período de deshielo.

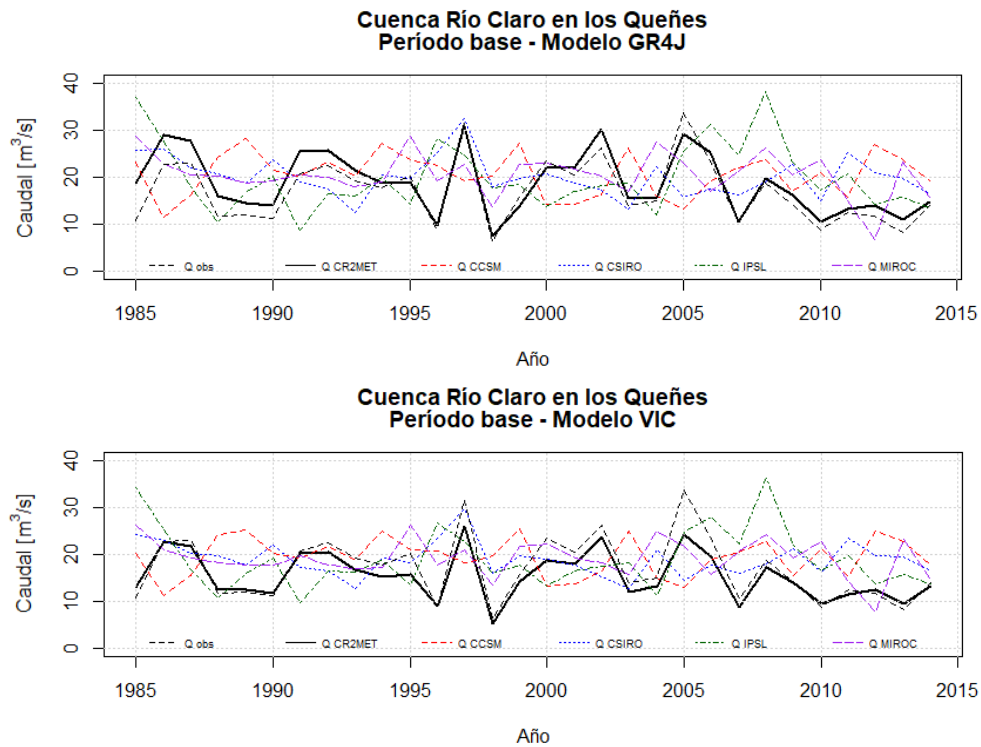


Figura 6.4: Series de escorrentía anual durante el período base en la cuenca del Río Claro en los Queñes, comparación entre modelos hidrológicos GR4J y VIC.

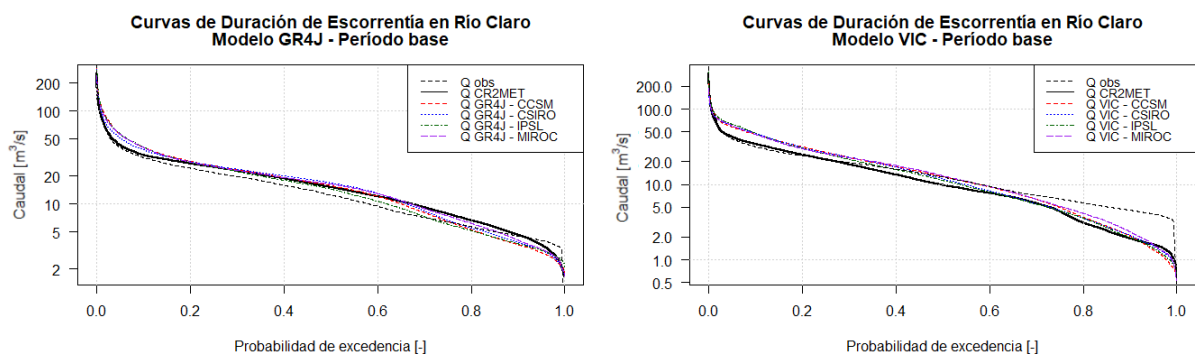


Figura 6.5: Curvas de duración de escorrentía diaria durante el período base en la cuenca del Río Claro en los Queñes, comparación entre modelos hidrológicos GR4J y VIC.

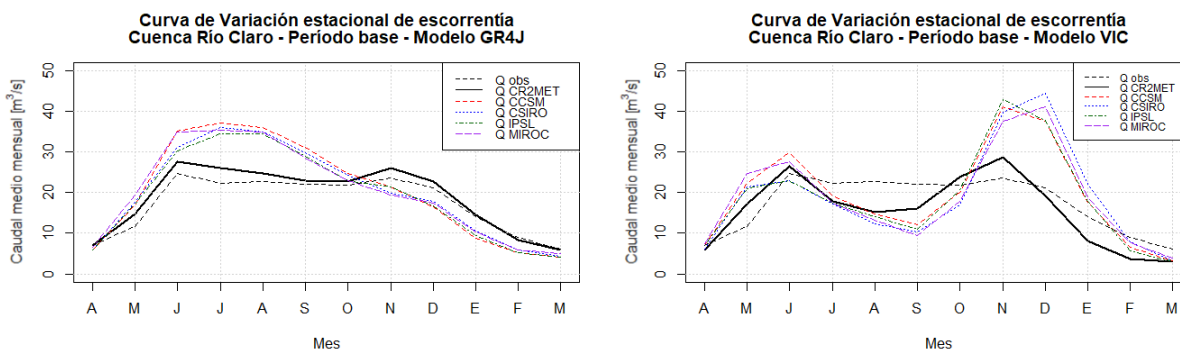


Figura 6.6: Curvas de variación estacional de escorrentía promedio mensual durante el período base en la cuenca del Río Claro en los Queñes, comparación entre modelos hidrológicos GR4J y VIC.

6.2.2. Resultados Período de proyección futura en cuenca Río Claro

Para cada una de las simulaciones de escorrentía asociadas a un modelo hidrológico y GCM se realizaron proyecciones en los escenarios climáticos RCP 4.5 (asociado a un crecimiento estable de la forzante radiativa, sin *peak*) y RCP 8.5 (incremento creciente de la forzante radiativa sobre el planeta). En la Tabla 6.7 se presentan los principales estadísticos (media, mediana, desviación estándar y valores extremos) de cada una de las series diarias proyectadas bajo los dos escenarios climáticos, durante el período comprendido entre los años hidrológicos 2030/31 – 2059/2060 en la cuenca del Río Claro en los Queñes. Adicionalmente, se incluyen (de forma destacada) la diferencia porcentual entre los valores de media y mediana obtenidos en el período proyectado respecto al período histórico para cada modelo GCM.

Tabla 6.7: Estadísticos de las series de escorrentía diaria simuladas por los modelos GR4J y VIC durante el período 2030-2060 en la cuenca del Río Claro en los Queñes, bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

Modelo Hidrológ.	RCP	GCM	Media [m ³ /s]	Dif. Media [%]	Mediana [m ³ /s]	Dif. Mediana [%]	Desv. Estand. [m ³ /s]	Valor Mín. [m ³ /s]	Valor Máx. [m ³ /s]
GR4J	RCP 4.5	CCSM	17,96	-12,72	12,39	-21,24	21,61	1,42	394,85
		CSIRO	17,19	-14,42	12,03	-28,71	20,43	1,51	430,75
		IPSL	17,78	-10,90	10,96	-23,97	21,94	1,30	346,70
		MIROC	19,59	-4,51	13,18	-19,41	24,51	1,59	441,25
	RCP 8.5	CCSM	13,05	-36,60	9,19	-41,59	16,22	1,42	284,57
		CSIRO	14,52	-27,72	8,79	-47,96	19,34	1,23	300,29
		IPSL	11,84	-40,65	7,38	-48,81	15,16	1,27	314,70
		MIROC	13,19	-35,70	8,35	-48,95	15,89	1,29	241,27
VIC	RCP 4.5	CCSM	17,54	-9,69	11,72	-8,26	20,06	0,51	353,93
		CSIRO	16,97	-10,40	10,70	-9,70	20,40	0,49	388,51
		IPSL	17,72	-6,67	11,02	-2,80	20,29	0,42	291,84
		MIROC	19,02	-0,97	11,91	-8,90	22,68	0,63	473,95
	RCP 8.5	CCSM	12,74	-34,39	6,99	-45,31	18,11	0,37	367,31
		CSIRO	13,50	-28,71	7,74	-34,68	19,29	0,28	297,11
		IPSL	11,88	-37,43	6,53	-42,42	16,04	0,37	258,93
		MIROC	12,95	-32,56	6,99	-46,52	16,75	0,31	174,72

Se evidencia que todas las proyecciones realizadas señalan un descenso en la media y mediana de caudales bajo ambos escenarios, siendo más acentuado en el escenario climático más extremo. En particular, se observa que mientras en el escenario RCP 4.5 se reportan diferencias de media de entre 1% y 14% y de mediana entre 3% y 29%, para el caso del escenario RCP 8.5 se proyectan descensos entre 28% y 41% en la media y entre 35% y 49% en la mediana de caudales.

Las proyecciones realizadas en las series reproducidas por el modelo hidrológico GR4J presentan mayores descensos que las del modelo VIC, siendo esto particularmente evidente al comparar las diferencias en las medianas de ambos modelos bajo el escenario RCP 4.5. En la misma línea, también se observan diferencias entre las proyecciones realizadas según el GCM empleado. Por ejemplo, bajo el escenario RCP 4.5 el modelo que presentó un mayor descenso en la media y mediana fue CSIRO (entre 9,7% y 28,7%), mientras que en el escenario RCP 8.5 el modelos IPSL fue el que mostró mayores disminuciones en el caudal medio diario (entre 37,4% y 48,8%).

En la Figura 6.7 se muestran las series anuales, curvas de duración y curvas de variación estacional de todas las simulaciones de caudal relacionadas al modelo climático IPSL, uno de los que mostró un mejor desempeño al reproducir la serie de caudales en el período base en la cuenca del Río Claro y ,también, uno de los que proyecta mayores descensos en los caudales medios. En dichas figuras, los resultados se comparan diferenciando tanto por modelo hidrológico como escenario climático representado. Por otra parte, en el Anexo D se puede encontrar estas mismas gráficas para el resto de los modelos climáticos considerados en el presente estudio.

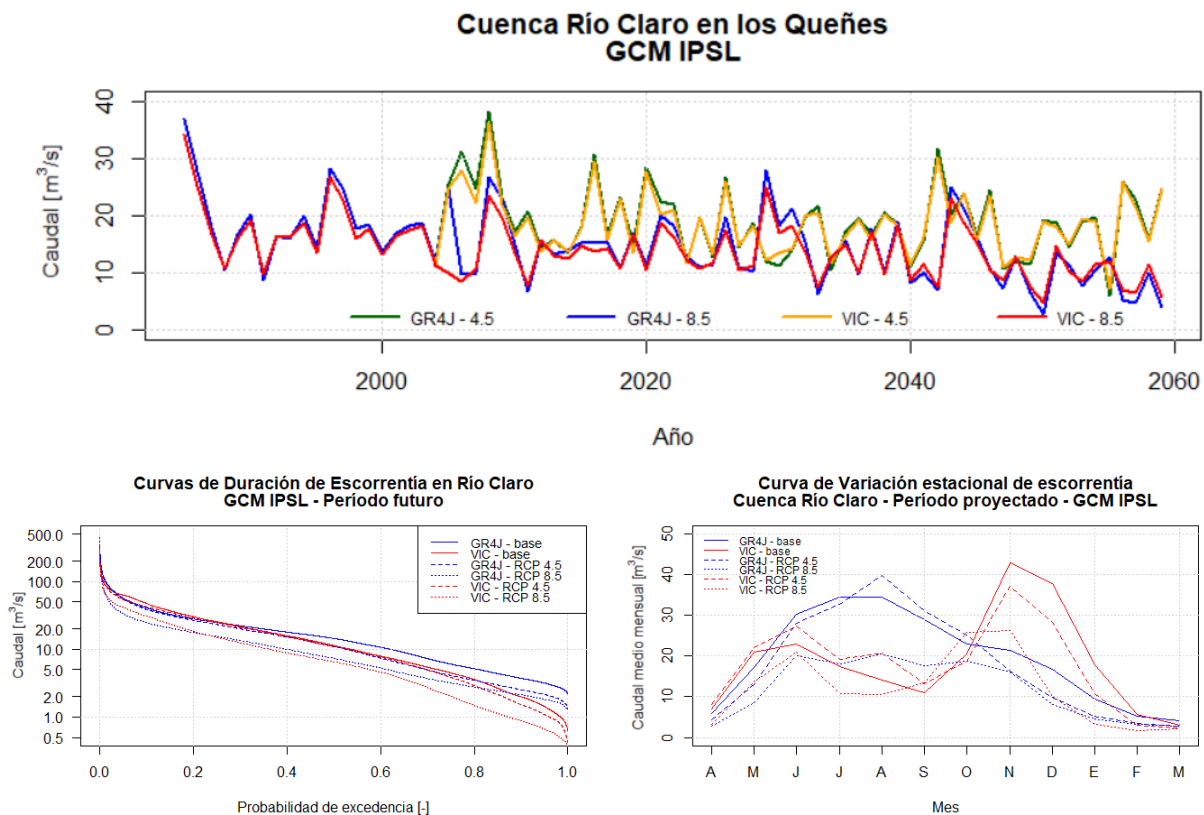


Figura 6.7: Serie anual y curvas de duración y variación estacional de la simulación de caudales del modelo climático IPSL en la cuenca del Río Claro en los Queñes.

Las series futuras proyectadas muestran un desplazamiento hacia valores inferiores en las curvas de duración y variación estacional, lo que está relacionado con un aumento de la frecuencia de los caudales bajos, en especial en aquellos menores a 10 m³/s, y un descenso en el valor promedio de los caudales durante los meses de *peak* pluvial y de deshielo. Esta situación se percibe mucho más acentuada en el escenario RCP 8.5, a diferencia del RCP 4.5, donde los cambios observados son de un orden menor al 10%. Adicionalmente, la simulación de VIC en el escenario climático más extremo también exhibe un adelantamiento en torno a un mes en el período de deshielo, aunque sin alterar significativamente el régimen hidrológico de la cuenca.

6.3. Modelación hidrológica en cuenca del Río Colorado en junta con Palos

6.3.1. Resultados Período histórico en cuenca Río Colorado

En la Tabla 6.8 se reportan los principales estadísticos de las series de escorrentía observada y simuladas por los modelos hidrológicos GR4J y VIC en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos, durante el período histórico.

Al ser forzados con los datos de CR2MET, ambos modelos hidrológicos muestran un buen ajuste con la media de los valores observados. A pesar de esto, GR4J presenta valores mayores de caudal en todos los cuartiles evaluados y ambos modelos subestiman significativamente el valor máximo de la serie observada. Por otro lado, al comparar el desempeño de las series asociadas a los modelos climáticos, se aprecia que todas ellas sobreestiman la media, mediana y cuartiles de la serie simulada bajo CR2MET, en un promedio de 4 m³/s para la media y con diferencias de hasta 9 m³/s en el caso de la mediana según forzantes de CCSM en el modelo VIC. Teniendo en consideración esto, los modelos climáticos que presentan menores discrepancias con los estadísticos a partir de CR2MET para esta cuenca nuevamente son CSIRO e IPSL, tal como en el caso de la cuenca del Río Claro en los Queñes.

Tabla 6.8: Principales estadísticos de las series de escorrentía diaria observada y simuladas por los modelos hidrológicos GR4J y VIC durante el período base en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos.

Simulación	Media [m ³ /s]	Desv. Estánd. [m ³ /s]	Valor mín. [m ³ /s]	1° Cuartil [m ³ /s]	Mediana [m ³ /s]	3° Cuartil [m ³ /s]	Valor máx. [m ³ /s]
Q observado	41,51	37,44	0,00	18,10	28,60	51,30	1060,00
GR4J – CR2MET	40,53	30,05	5,31	19,29	32,41	54,19	489,30
GR4J – CCSM	44,75	34,10	6,92	18,63	36,18	61,23	451,10
GR4J – CSIRO	43,48	30,40	7,32	18,97	39,27	58,22	460,60
GR4J – IPSL	43,64	39,99	7,29	16,71	32,35	57,14	813,44
GR4J – MIROC	44,68	32,20	5,72	20,30	39,33	57,50	306,54
VIC – CR2MET	40,84	35,98	2,41	15,19	27,66	54,69	208,18
VIC – CCSM	44,26	29,07	3,12	22,28	36,91	60,22	210,77
VIC – CSIRO	43,25	31,10	2,98	18,91	33,84	60,65	208,92
VIC – IPSL	43,38	33,36	4,07	18,15	32,86	59,24	246,69
VIC – MIROC	43,93	29,79	2,68	20,94	35,32	59,27	194,04

En las Figuras 6.8, 6.9 y 6.10 se muestran, de forma respectiva, la comparación entre las series anuales, curvas de duración y curvas de variación estacional para cada una de las series de caudales simulados en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos durante el período histórico.

A nivel general, los resultados obtenidos en el análisis gráfico dan cuenta de un comportamiento similar a lo ya observado en la cuenca del Río Claro en los Queñes: series anuales con importantes sesgos en los valores de caudal simulados para un mismo año, buenos ajustes en el tramo central de las curvas de duración (probabilidad de excedencia entre 10% y 90%) en ambos modelos hidrológicos y una sobreestimación de los caudales pluviales en las simulaciones el modelo GR4J y en los caudales de deshielo del modelo VIC.

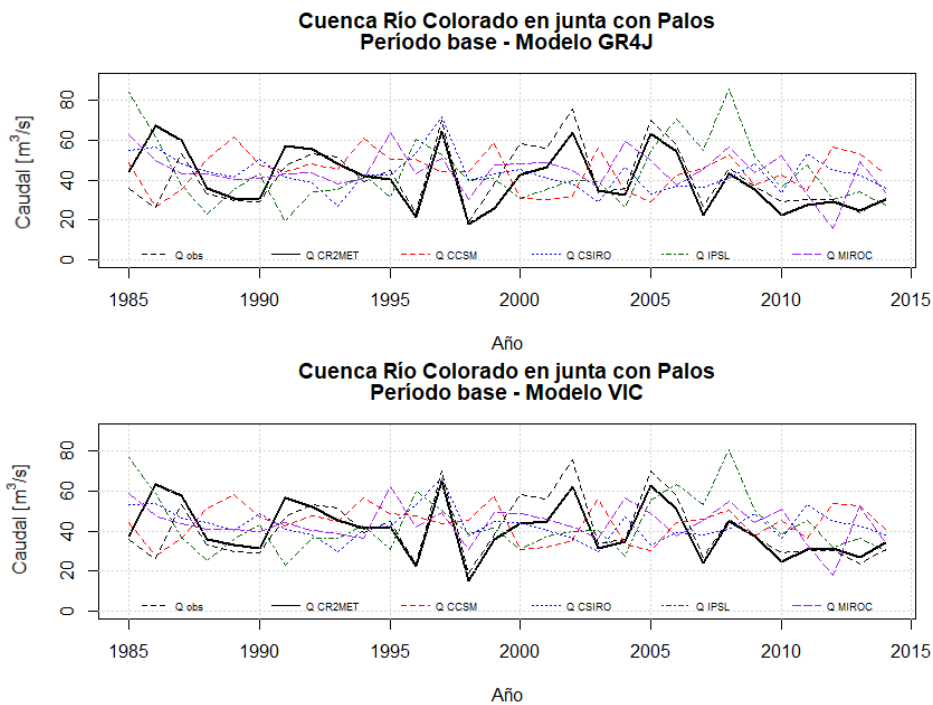


Figura 6.8: Series de escorrentía anual durante el período base en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos, comparación entre modelos hidrológicos GR4J y VIC.

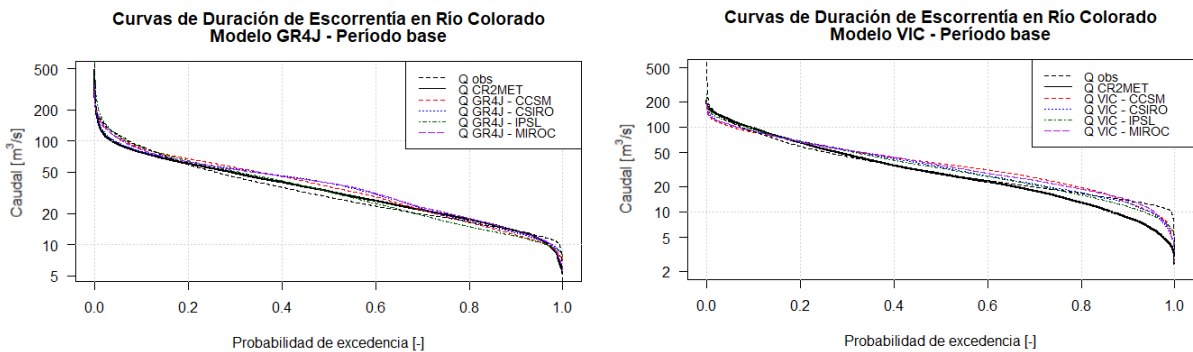


Figura 6.9: Curvas de duración de escorrentía diaria durante el período base en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos, comparación entre modelos hidrológicos GR4J y VIC.

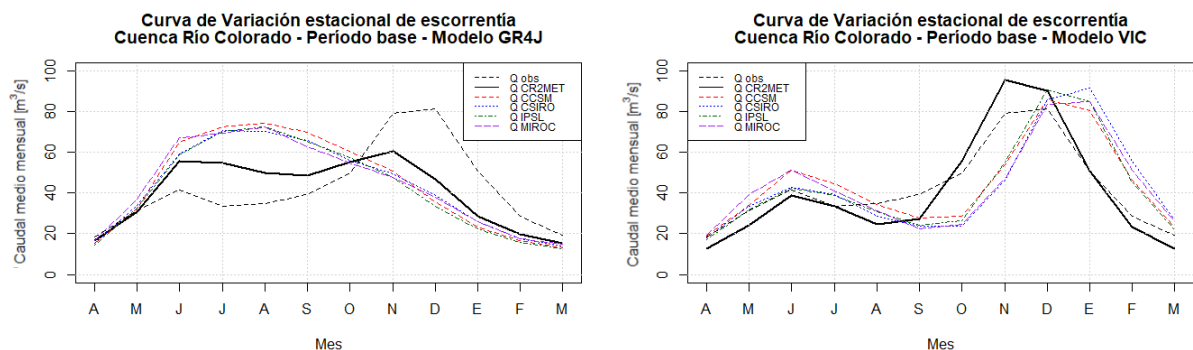


Figura 6.10: Curvas de variación estacional de escorrentía mensual promedio durante el período base en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos, comparación entre modelos hidrológicos GR4J y VIC.

Un aspecto adicional para destacar, observado en esta cuenca, es el desfase en torno a un mes en la ocurrencia de los *peak* de caudales asociados al período de deshielo, los cuales ocurren entre los meses de noviembre y diciembre en los valores observados y de CR2MET. Sin embargo, es reproducido entre los meses de diciembre y enero en prácticamente la totalidad de los cuatro modelos climáticos analizados.

6.3.2. Resultados Período de proyección futura en cuenca Río Colorado

En la Tabla 6.9 se muestran los principales estadísticos y los valores de diferencia porcentual entre media y mediana de todas las series de escorrentía proyectadas bajo los dos escenarios climáticos, durante el período futuro, en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos.

Tabla 6.9: Estadísticos de las series de escorrentía media diaria simuladas por los modelos GR4J y VIC durante el período 2030-2060 en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos, bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5.

Modelo Hidrológ.	RCP	GCM	Media [m ³ /s]	Dif. Media [%]	Mediana [m ³ /s]	Dif. Mediana [%]	Desv. Estand. [m ³ /s]	Valor Mín. [m ³ /s]	Valor Máx. [m ³ /s]
GR4J	RCP 4.5	CCSM	38,86	-13,17	29,62	-18,13	32,46	4,91	397,53
		CSIRO	36,94	-15,03	28,36	-27,79	31,23	5,54	478,48
		IPSL	37,86	-13,25	26,22	-18,93	36,03	4,00	455,02
		MIROC	42,67	-4,50	31,82	-19,10	39,00	5,85	585,38
	RCP 8.5	CCSM	30,75	-31,29	24,30	-32,83	25,76	5,25	341,61
		CSIRO	34,14	-21,48	24,36	-37,96	32,05	4,08	398,74
		IPSL	27,84	-36,21	20,17	-37,65	25,59	3,62	407,75
		MIROC	31,08	-30,44	23,32	-40,72	26,40	4,50	313,05
VIC	RCP 4.5	CCSM	40,18	-9,22	33,88	-8,21	26,67	2,56	266,98
		CSIRO	38,92	-10,02	31,11	-8,07	28,90	2,24	363,76
		IPSL	40,28	-7,15	32,44	-1,27	29,04	1,52	195,85
		MIROC	43,57	-0,83	36,45	3,20	30,68	3,05	498,68
	RCP 8.5	CCSM	32,18	-27,28	23,79	-35,56	30,03	0,92	430,23
		CSIRO	34,36	-20,54	22,12	-34,65	34,82	0,68	306,42
		IPSL	30,10	-30,61	22,33	-32,05	29,08	0,97	274,23
		MIROC	33,09	-24,69	24,10	-31,77	31,63	0,71	226,00

Las proyecciones futuras de caudal en esta cuenca siguen la tendencia ya expuesta en el caso de la cuenca del Río Claro en los Queñes, presentándose disminuciones en todas ellas y siendo de mayor magnitud en el escenario climático RCP 8.5 y en las simulaciones efectuadas por el modelo hidrológico GR4J. También es posible constatar que el modelo climático CSIRO es aquel que reporta los mayores descensos en el escenario RCP 4.5 y que, de la misma forma, los modelos IPSL y MIROC se asocian a una mayor disminución de caudales en el escenario RCP 8.5. Por último, también es posible observar que las proyecciones realizadas en este último escenario climático muestran un incremento en los valores máximos y un descenso en los valores mínimos respecto al período base.

En la Figura 6.11 se exponen las series de caudales medios anuales, las curvas de duración de caudales medios diarios y las curvas de variación estacional promedio de todas las simulaciones de caudal efectuadas bajo las forzantes proyectadas del modelo climático CSIRO, el cual es el que se asocia con las mayores disminuciones de caudal en el escenario RCP 4.5. Al igual que en el caso anterior, el resto de los gráficos realizados para los otros modelos climáticos se encuentra en el Anexo D del presente informe.

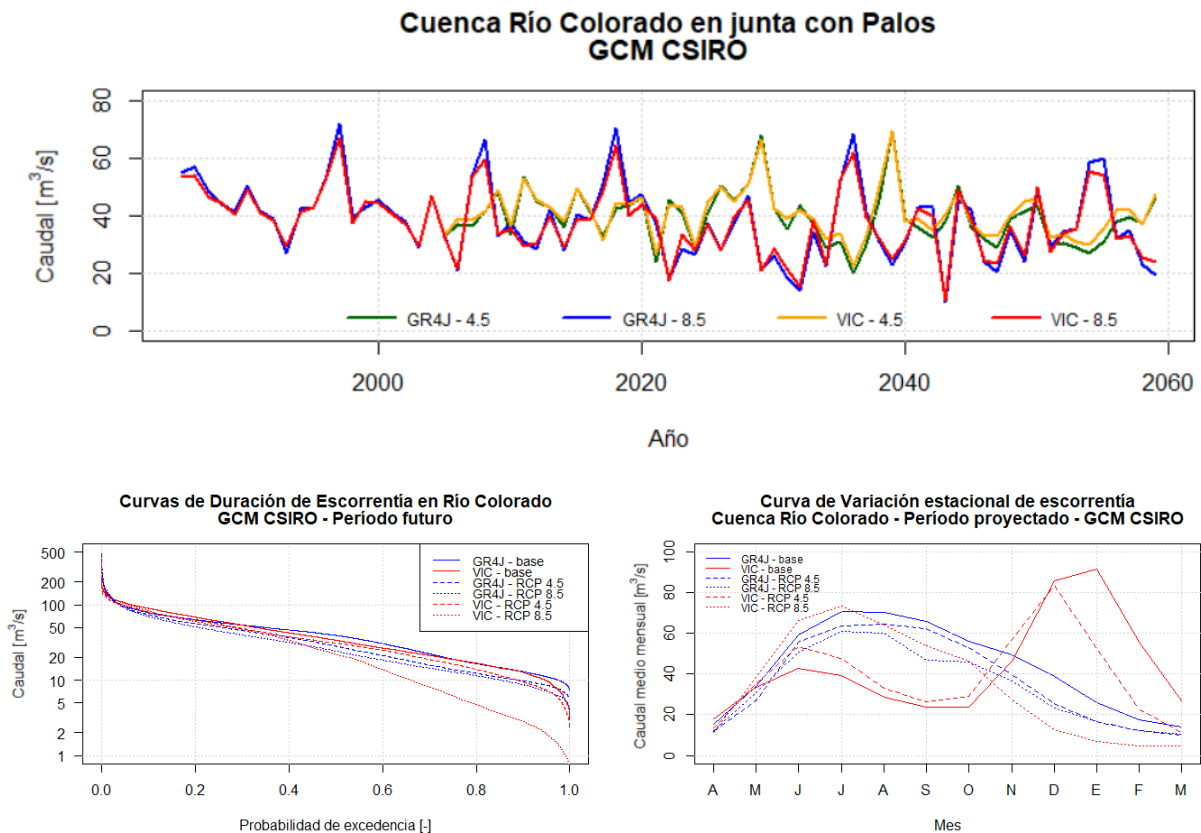


Figura 6.11: Serie de caudal medio anual, curvas de duración de caudal medio diario y variación estacional promedio de la simulación de caudales del modelo climático CSIRO en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos.

Se evidencian descensos entre 2 y 20 m³/s en las simulaciones de los caudales medios mensuales de los escenarios futuro bajo el modelo GR4J, siendo mayores en el período de deshielo. Por otro lado, uno de los resultados más destacados, y que difiere de lo exhibido por las proyecciones de la

cuenca del Río Claro en los Queñes, está en la curva de variación estacional futura asociada al modelo VIC en escenario RCP 8.5, la cual muestra un cambio en el régimen hidrológico de la cuenca, desde un régimen nivo-pluvial hacia uno pluvio-nival. Adicionalmente, esta última proyección también muestra un importante aumento en la frecuencia de los caudales menores a 10 m³/s, los cuales pasan de tener una probabilidad de excedencia aproximada del 95% en el período base a una cercana al 60% en este escenario.

6.4. Modelación hidrológica en cuenca del Río Palos en junta con Colorado

6.4.1. Resultados Período histórico en cuenca Río Palos

En la Tabla 6.10 se presenta el valor de los principales estadísticos de las series de escurrentía media diaria observada y simuladas por los modelos hidrológicos GR4J y VIC en la cuenca del Río Palos en junta con Colorado, durante el período histórico.

Al igual que las otras dos cuencas anteriores, se observa que las series generadas con las forzantes del modelo GR4J poseen un sesgo positivo respecto a los valores de media y mediana observada, mientras que ocurre lo contrario en las series vinculadas al modelo VIC. Ninguno de los modelos hidrológicos logra captar los valores más extremos de caudal, aunque GR4J muestra un mejor ajuste en el 1° cuartil (caudales bajos) y, por su parte, el modelo VIC se ajusta mejor a los valores del 3° cuartil (caudales altos). Por otra parte, nuevamente se constata que al comparar el desempeño de los modelos climáticos, los modelos IPSL y CSIRO son aquellos que exhiben menores diferencias respecto a los estadísticos bajo forzantes de CR2MET.

Tabla 6.10: Principales estadísticos de las series de escurrentía media diaria observada y simuladas por los modelos hidrológicos GR4J y VIC durante el período base en la cuenca del Río Palos en junta con Colorado.

Simulación	Media [m ³ /s]	Desv. Estánd. [m ³ /s]	Valor mín. [m ³ /s]	1° Cuartil [m ³ /s]	Mediana [m ³ /s]	3° Cuartil [m ³ /s]	Valor máx. [m ³ /s]
Q observado	26,95	20,53	5,48	15,19	21,80	32,60	684,00
GR4J – CR2MET	27,67	19,18	3,70	15,00	23,52	35,20	327,34
GR4J – CCSM	30,38	23,61	4,70	13,57	25,32	38,85	337,86
GR4J – CSIRO	29,60	21,27	4,74	14,24	26,09	37,54	354,74
GR4J – IPSL	29,63	26,86	5,15	12,30	22,75	37,39	536,73
GR4J – MIROC	30,39	22,66	3,90	14,97	25,78	37,21	231,80
VIC – CR2MET	23,53	21,00	1,56	8,03	17,35	33,31	253,48
VIC – CCSM	27,30	23,35	1,59	9,91	19,89	38,36	218,89
VIC – CSIRO	26,72	23,60	1,68	9,19	18,09	37,43	198,06
VIC – IPSL	26,81	25,32	1,93	8,79	17,49	36,68	253,59
VIC – MIROC	27,20	22,88	1,58	10,27	19,75	37,67	175,37

En las Figuras 6.12, 6.13 y 6.14 se muestran los resultados del análisis gráfico, en donde se compararon las series anuales, curvas de duración de caudales medios diarios y curvas de variación estacional promedio entre cada una de las series de caudales simulados en la cuenca del Río Palos en junta con Colorado, durante el período histórico.

Nuevamente, se vuelve a constatar un comportamiento similar a lo ya exhibido por las series de las cuencas de los Ríos Claro y Colorado, con la presencia de sesgos en las series anuales, buenos ajustes en el tramo central de las curvas de duración y la presencia de sesgos, tanto en magnitud como en temporalidad, en el caudal medio mensual durante los meses de *peak* pluvial y de deshielo. Sin embargo, un hecho a destacar, respecto a las otras dos cuencas, es el mejor ajuste evidenciado en las curvas de variación estacional y duración de las series de los GCMs simuladas por VIC.

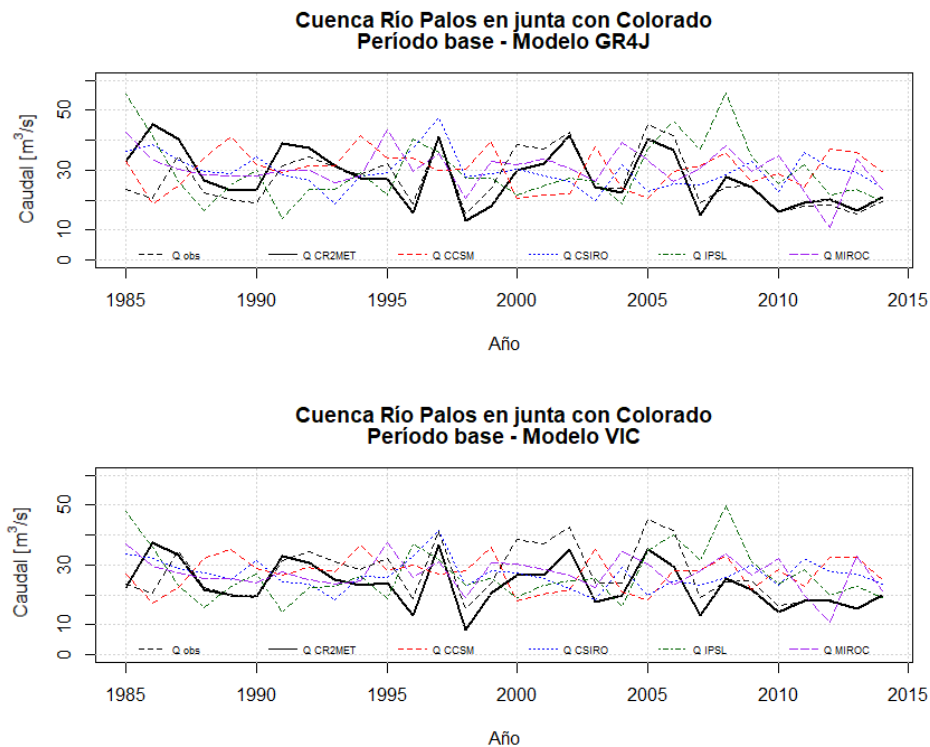


Figura 6.12: Series de escorrentía anual durante el período base en la cuenca del Río Palos en junta con Colorado, comparación entre modelos hidrológicos GR4J y VIC.

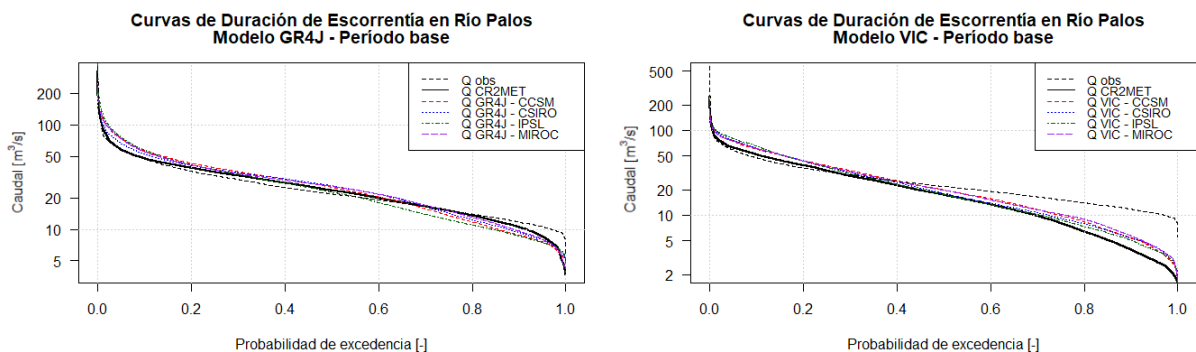


Figura 6.13: Curvas de duración de caudal medio diario durante el período base en la cuenca del Río Palos en junta con Colorado; comparación entre modelos hidrológicos GR4J y VIC.

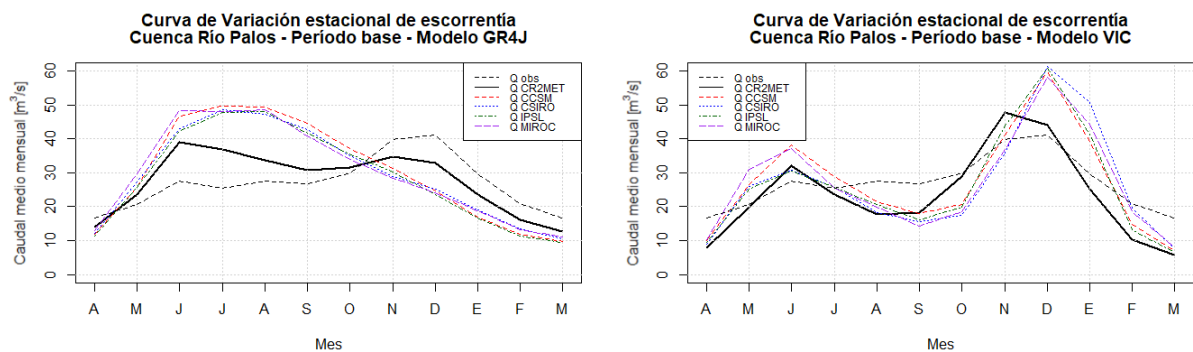


Figura 6.14: Curvas de variación estacional de escorrentía durante el período base en la cuenca del Río Palos en junta con Colorado, comparación entre modelos hidrológicos GR4J y VIC.

6.4.2. Resultados Período de proyección futura en cuenca Río Palos

En la Tabla 6.11 se presentan los principales estadísticos y los valores de diferencia porcentual entre media y mediana de todas las series de escorrentía proyectadas bajo los dos escenarios climáticos, durante el período futuro, en la cuenca del Río Palos en junta con Colorado.

Tabla 6.11: Estadísticos de las series de escorrentía media diaria simuladas por los modelos GR4J y VIC durante el período 2030-2060 en la cuenca del Río Palos en junta con Colorado, bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5.

Modelo Hidrológ.	RCP	GCM	Media [m³/s]	Dif. Media [%]	Mediana [m³/s]	Dif. Mediana [%]	Desv. Estand. [m³/s]	Valor Mín. [m³/s]	Valor Máx. [m³/s]
GR4J	RCP 4.5	CCSM	26,75	-11,96	20,57	-18,75	23,33	3,44	328,11
		CSIRO	25,43	-14,07	19,68	-24,59	22,46	3,57	410,79
		IPSL	26,05	-12,07	18,43	-19,00	25,00	2,59	353,91
		MIROC	29,22	-3,84	21,74	-15,67	27,58	3,80	422,41
	RCP 8.5	CCSM	19,21	-36,77	15,09	-40,40	17,31	3,06	258,37
		CSIRO	21,53	-27,28	15,25	-41,56	21,24	2,38	299,67
		IPSL	17,64	-40,48	12,91	-43,26	16,73	2,17	294,87
		MIROC	19,85	-34,69	14,97	-41,93	17,49	2,89	226,68
VIC	RCP 4.5	CCSM	24,89	-8,82	18,53	-6,86	21,88	1,75	218,55
		CSIRO	24,06	-9,97	16,27	-10,08	23,24	1,49	240,63
		IPSL	24,93	-7,00	16,50	-5,64	23,40	1,24	231,54
		MIROC	27,04	-0,58	18,36	-7,02	25,73	1,73	313,07
	RCP 8.5	CCSM	19,08	-30,10	11,69	-41,23	21,68	1,04	348,34
		CSIRO	20,55	-23,09	12,66	-30,02	23,87	0,83	304,33
		IPSL	18,03	-32,74	11,06	-36,76	20,40	1,10	246,34
		MIROC	19,84	-27,07	11,58	-41,37	22,85	0,85	193,98

Las proyecciones realizadas reproducen las tendencias ya expuestas en las cuenca de los Ríos Claro y Colorado, con descensos de la mediana de los caudales entre un 6% y un 25% en el escenario RCP 4.5 y entre un 30% y un 43% bajo el escenario RCP 8.5, siendo esta la cuenca más afectada

(de las tres analizadas) por las disminuciones de la escorrentía esperadas en la zona producto del cambio climático.

La Figura 6.15 muestra las series anuales y las curvas de duración y variación estacional de todas las simulaciones de caudal efectuadas durante el período de proyección futura bajo las forzantes proyectadas del modelo climático MIROC, el cual es el que entrega las mayores caídas en los valores de media y mediana de caudales en el escenario climático más extremo. Por otra parte, al igual que en las cuencas anteriores, en el Anexo D se podrá encontrar estas mismas gráficas para el resto de los GCMs evaluados en el presente trabajo.

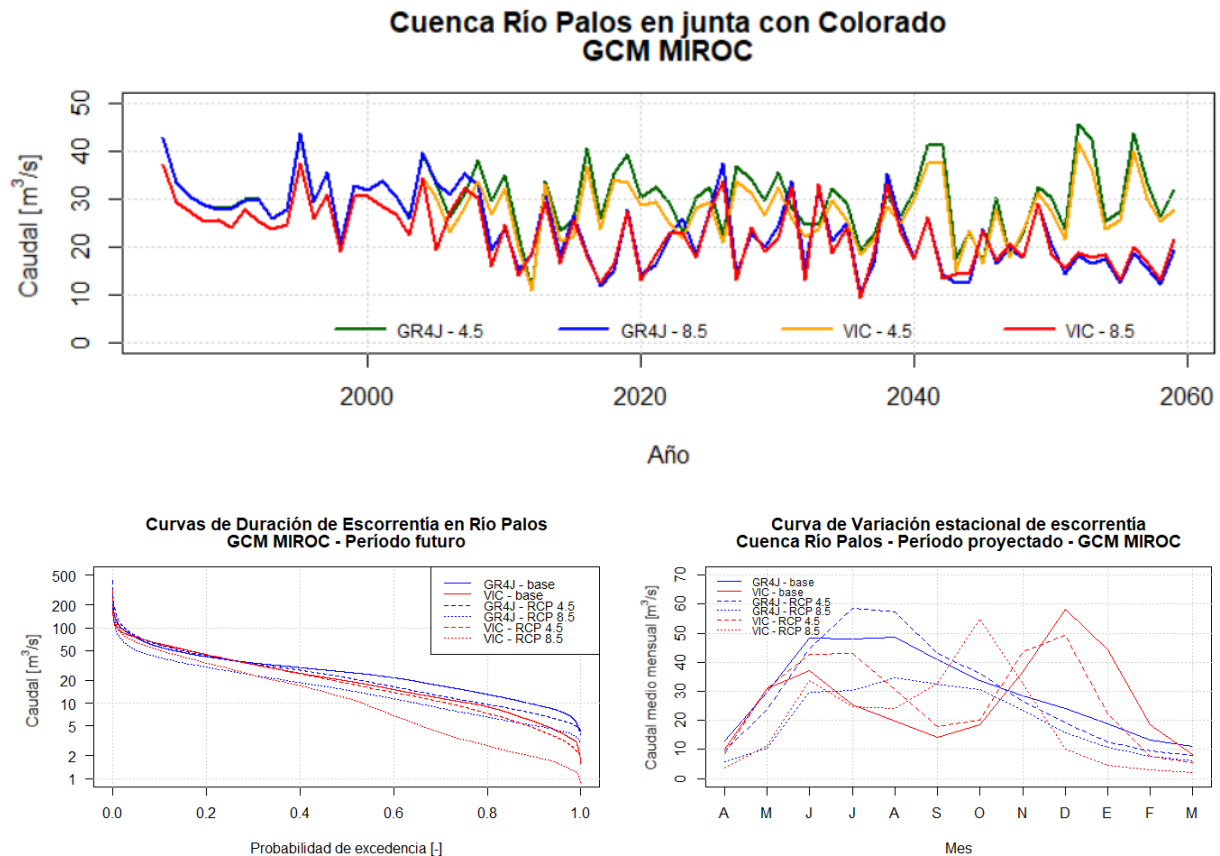


Figura 6.15: Serie de caudales medios anuales, curvas de duración de caudales medios diarios y variación estacional promedio de la simulación de caudales del modelo climático MIROC en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos.

Entre los resultados más relevantes, se puede mencionar que, bajo el escenario climático RCP 8.5 y en ambos modelos hidrológicos, se esperan caudales medios anuales inferiores a $30 \text{ m}^3/\text{s}$ en todos los años a partir de 2040, acompañados de un aumento en la frecuencia de un 25% de los caudales diarios inferiores a $10 \text{ m}^3/\text{s}$ y un adelantamiento en torno a 2 meses en la ocurrencia de los *peak* de caudales del período de deshielo. Además ambos modelos hidrológicos proyectan aumentos de caudales en el período invernal respecto a los valores del período histórico bajo el escenario RCP 4.5.

Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones

7.1. Conclusiones

En el presente trabajo de investigación se logró realizar con éxito el proceso de escalamiento espacial y corrección de sesgo de forzantes climáticas provenientes de cuatro modelos climáticos del escenario RCP 4.5. Esto se realizó mediante la implementación del método Quantile Delta Mapping (QDM) sobre grillas que representaban a tres cuencas hidrológicas ubicadas en la parte alta del Río Mataquito. Adicionalmente, las forzantes escaladas fueron utilizadas para alimentar a los modelos hidrológicos GR4J y VIC, en los cuales, tras un proceso de calibración de parámetros previo, se logró simular diversas series de escurrimiento en el período comprendido entre los años hidrológicos 1985/86 y 2059/60.

El trabajo comenzó con un chequeo de consistencia del producto grillado CR2MET sobre la zona de estudio, en el cual se constató que las series anuales de temperaturas extremas y precipitación muestran un adecuado ajuste estadístico al compararse con los valores observados en las estaciones, obteniendo valores del coeficiente de determinación superiores a 0,8 en todos los casos. Sin embargo, en una estación se observaron sesgos positivos en la temperatura mínima anual de hasta 1,5 °C, mientras que otras mostraron sesgos de precipitación anual de hasta 200 mm durante los años más lluviosos. También, se logró identificar una correspondencia en las curvas de variación estacional de estas variables y un adecuado desempeño al reproducir la magnitud y temporalidad de los eventos máximos de precipitación anual, experimentando solo deficiencias durante los meses más secos del año.

En el proceso de escalamiento espacial de forzantes meteorológicas se obtuvo un mejor desempeño en el ajuste de temperaturas extremas por sobre la precipitación. Sin embargo, en todos los casos la media y mediana de las series anuales fueron satisfactoriamente reproducidos por los GCMs, presentando diferencias menores a 20% en precipitación y a 0,5 °C en temperaturas, aunque no ocurrió lo mismo con la desviación estándar y valores extremos, obteniendo series de temperaturas extremas más dispersas que CR2MET. Por otro lado, en ambas variables meteorológicas se lograron reproducir adecuadamente las curvas de duración diaria y de variación estacional promedio, obteniendo en todos los casos diferencias de precipitación y temperatura menores a 50 mm y 0,5 °C, respectivamente. Por el contrario, las series anuales de los GCMs presentaron sesgos y un deficiente desempeño al captar la variabilidad temporal, aunque este es un resultado esperable dado las características estadísticas y asincrónicas de la metodología empleada.

Respecto a las proyecciones futuras de las forzantes en el escenario climático RCP 4.5 en la zona de estudio, tres de los cuatro modelos climáticos evaluados reportan descensos entre un 5% y 9% en la mediana de precipitación anual, mientras que todos ellos señalan un aumento en las medianas anuales de las temperaturas máximas y mínimas, con incrementos que se encuentran en el rango de los 1°C y 2,6°C.

La calibración de parámetros efectuada al modelo hidrológico GR4J arrojó ajustes satisfactorios en la cuenca del Río Claro, con criterios de eficiencia de NSE y KGE de 0,65 y 0,83, respectivamente. El desempeño mostrado en la calibración de las cuencas de los Ríos Colorado y Palos fue menor, aunque de todas formas se consiguieron valores de NSE y KGE superiores a 0,4

y 0,6, respectivamente. Sin embargo, se constató que en estas dos últimas cuencas no se logran reproducir adecuadamente la curva de variación estacional, sobreestimando los caudales del período pluvial y subestimando los del período de deshielo.

En la evaluación de la modelación hidrológica de series de escorrentía, forzadas con modelos climáticos escalados durante el período histórico, se comprueba la existencia de desempeños similares en las tres cuencas estudiadas. En particular, en todas ellas se observan diferencias menores al 20% en la media y mediana de los caudales medios diarios, la existencia de sesgos de hasta 40 m³/s entre los valores de un mismo año en la serie de escorrentía anual, pendientes similares en el tramo central de las curvas de duración de caudales diarios (probabilidad de excedencia entre 20% y 80%) y, particularmente, una situación opuesta en la estacionalidad de caudales reproducida por ambos modelos hidrológicos. Por un lado, el modelo GR4J sobreestima los caudales del período pluvial y se ajusta adecuadamente a los del período de deshielo, mientras que, por el contrario, el modelo VIC se ajusta de forma satisfactoria a los caudales pluviales, pero muestra una sobreestimación y un desfase en los caudales simulados durante el período de deshielo.

Este último resultado es uno de los más relevantes obtenidos en este trabajo, puesto que deja en evidencia la alta incertidumbre involucrada en la decisión de qué tipo de modelo hidrológico utilizar en proyecciones de cambio hidrológico. Asimismo, debe tenerse presente que también existen otras fuentes de incertidumbre en etapas previas, como es el caso de la elección del escenario de emisiones, el método de escalamiento espacial utilizado y la generación de forzantes climáticas. Sobre estas últimas, en este trabajo se utilizó el producto grillado CR2MET, el cual no pudo ser validado con estaciones meteorológicas en alta montaña y, además, presentó sesgos positivos en las temperaturas de algunas estaciones.

En cuanto a las proyecciones de la disponibilidad futura de los recursos hídricos en las cuencas analizadas, se evidencia un notorio descenso en la media y mediana de los caudales medios diarios en ambos escenarios climáticos, alcanzando disminuciones de hasta un 29% bajo el escenario RCP 4.5 y de hasta un 49% en el escenario RCP 8.5. Si bien todos los modelos climáticos presentaron cambios negativos en los caudales proyectados, los que presentaron condiciones más extremas fueron CSIRO en el escenario RCP 4.5 e IPSL en el escenario RCP 8.5.

Es bajo el escenario RCP 8.5 donde también se evidencia un aumento en la magnitud y frecuencia de los valores extremos de caudal, lo cual está relacionado con el aumento en la severidad de eventos como sequías o crecidas. Además, también en este escenario, se constató un significativo cambio en el régimen hidrológico de las cuencas de los Ríos Colorado y Palos, el cual está asociado con un adelantamiento en la ocurrencia de los caudales de deshielo entre 1 y 2 meses.

Los resultados obtenidos en las proyecciones hidrológicas y climáticas son consistentes con los ya documentados en estudios previos de cambio hidrológico en cuencas de Chile Central (Gómez, 2013; Cepeda, 2017; DGA, 2018), en los cuales también se esperan significativos cambios hacia el año 2060, tales como: aumentos en la temperatura media anual de entre 1°C y 4 °C, según el escenario de emisiones considerado, cambios en el régimen hidrológico y reducciones de hasta 200 mm en los valores de precipitación y de hasta 46% en los valores de escorrentía media anual, bajo el escenario RCP 8.5.

7.2. Recomendaciones

La metodología de escalamiento estadístico de forzantes meteorológicas empleada en el presente trabajo logró reproducir adecuadamente las curvas de duración diaria y variación estacional a nivel mensual de la referencia utilizada. Sin embargo, existieron sesgos en los valores medios y en la dispersión de las series anuales de los modelos climáticos y, además, la variabilidad temporal de estas series no pudo ser reproducida, aunque esto último es un resultado esperable dada las características asincrónicas del método utilizado. En ese sentido, algunas alternativas a tomar en consideración son complementar la metodología mediante una etapa previa de escalamiento estadístico de las variables agregadas a nivel anual e incorporar técnicas que consideren la covarianza entre variables escaladas, como el caso del algoritmo MBC (Cannon, 2017).

Una de las principales deficiencias evidenciadas en los resultados de la modelación hidrológica fue la discrepancia entre los montos de los caudales medios mensuales observados y simulados durante los momentos del *peak* del período pluvial y de deshielo, en especial en las simulaciones del modelo GR4J. Frente a esto, debe considerarse que existe una incertidumbre asociada al uso de forzantes provenientes del producto grillado CR2MET en la zona de estudio, debido a que no existen estaciones de alta montaña con las cuales contrastar. Además, las principales diferencias obtenidas el chequeo de consistencia a dicho producto ocurrieron precisamente durante los meses de mayor precipitación. Por lo tanto, resulta de interés revisar continuamente el desempeño de CR2MET en la búsqueda de posibles correcciones y mejoras en su representación de la climatología local, en especial en aquellas zonas que presentan una escasa red de monitoreo.

En esta misma línea, otro aspecto que podría mejorar el desempeño de la modelación hidrológica tiene lugar durante el proceso de calibración de parámetros, en el cual se podrían evaluar el uso y la implementación diversos algoritmos de optimización multiobjetivo, como es el caso de *Shuffled complex evolution* (Duan *et al.*, 1993) o MOCOM-UA (Yapo *et al.*, 1998). Además, este proceso puede ser complementado al incorporar información relativa a la línea de nieves y al umbral de temperatura que determina la fracción de precipitación sólida y líquida en la zona de estudio. Herramientas como el uso de técnicas de percepción remota, productos satelitales y campañas de terreno podrían contribuir a este fin, pero escapan a los alcances de este estudio.

Para futuros trabajos en esta línea de investigación, se recomienda explorar la posibilidad de incorporar los escenarios climáticos que recientemente ha elaborado el IPCC en el contexto de la sexta fase del proyecto de inter-comparación de modelos climáticos acoplados (CMIP6). De la misma forma, resultaría de interés extender la metodología empleada a cuencas que presenten un grado mayor de intervención humana, para lo cual resulta fundamental incorporar información asociada a la asignación de derechos de aguas superficiales y subterráneos, así como también de las demandas de riego por evapotranspiración de cultivos.

Finalmente, debe reconocerse la importancia social que poseen las proyecciones futuras de variables hidro-meteorológicas en un contexto de cambio climático y significativas alteraciones sobre la disponibilidad de los recursos hídricos del país. Estas cobran gran relevancia en la aplicación práctica de la ingeniería civil; por ejemplo al considerar que muchas de las grandes obras hidráulicas, como los embalses, han sido diseñadas bajo condiciones de estacionariedad, lo cual no necesariamente seguirá siendo válido en las próximas décadas. También, estas proyecciones

resultan fundamentales a la hora de gestionar y administrar los recursos hídricos nacionales, contribuyendo a evitar el futuro sobre otorgamiento de derechos de agua.

Bibliografía

- Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., ... & Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies-Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817-5846.
- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 413-421.
- 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.
- Cannon, A. J. (2018). Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate dynamics*, 50(1), 31-49.
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2, 2015). La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Centro.
- Cepeda Abad, J. A. (2017). Análisis de los caudales nivo-glaciares históricos y proyectados en la cuenca del Río Olivares: comparación entre el modelo DHSVM y WEAP. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA, 2006). Estudio de la Variabilidad Climática en Chile para el Siglo XXI. Estudio realizado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile.
- Cooperativa (2020). Dramática situación en el Río Mataquito: Caudal llegó al 0,4 por ciento. *Cooperativa* [online]. Recuperado de <https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/region-del-maule/dramatica-situacion-en-el-rio-mataquito-caudal-llego-al-0-4-por-ciento/2020-01-11/124601.html>
- D'Arcangeli, V. (1997). Variación Temporal de Algunos Factores Meteorológicos en Chile. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Department of Public Works, 1960. California culvert practice, second edition. Division of Highways, California State Print.
- Dirección General de Aguas (DGA, 2018). Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de las Macrozonas Norte y Centro. Informe Final.
- Dirección General de Aguas (DGA, 2017). Actualización Balance Hídrico Nacional. Realizado por Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T. N°417. Santiago, Chile

- Díaz Cofré, M. A. (2015). Modelación de hidrogramas de crecidas usando proyecciones de precipitaciones diarias del modelo climático MK3. 6 aplicación en la cuenca Butamalal en Butamalal, VIII Región, Chile. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Durán Chandía, F. F. (2019). Influencia de la resolución temporal de las forzantes meteorológicas en la modelación de cuencas andinas de la Región de Coquimbo mediante el modelo hidrológico VIC. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Duan, Q. Y., Gupta, V. K., & Sorooshian, S. (1993). Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of optimization theory and applications*, 76(3), 501-521.
- ERIDANUS (2016). “Determinación del impacto del cambio climático en el potencial esperado de generación hidroeléctrica en la cuenca del río Maule”. Informe preparado para la subsecretaría de energía, Gobierno de Chile.
- Falvey, M., & Garreaud, R. D. (2009). Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D4).
- Figueroa Leiva, R. (2008). Efectos del Cambio Climático en la Disponibilidad de Recursos Hídricos a Nivel de Cuenca—Implementación de un Modelo Integrado a Nivel Superficial y Subterráneo. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Garreaud, R. (2011). Cambio Climático: Bases físicas e impactos en Chile.
- Gao, H., Tang, Q., Shi, X., Zhu, C., Bohn, T., Su, F., ... & Wood, E. (2010). Water budget record from Variable Infiltration Capacity (VIC) model.
- Gómez Zavala, T. I. (2013). Evaluación del impacto del cambio climático en centrales hidroeléctricas de la cuenca del Alto Cachapoal. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2), 80-91.
- Hamlet, A. F., E.P. Salathé & P. Carrasco (2010). “Statistical downscaling techniques for global climate model simulations of temperature and precipitation with application to water resources planning studies”. The Columbia Basin Climate Change Scenarios Project (CBCCCSP) report.
- Hrachowitz, M., & Clark, M. P. (2017). HESS Opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 21(8), 3953-3973.
- IPCC (2014). “Cambio climático 2014, informe de síntesis”. Informe del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático.

- King, H. (1970). Variación de algunos factores meteorológicos en Chile a través del tiempo. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Knoben, W. J., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323-4331.
- Liang, X., Wood, E. F., & Lettenmaier, D. P. (1996). Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modification. *Global and Planetary Change*, 13(1-4), 195-206.
- López, R. (2001). Impactos sobre Recursos Hídricos de Chile Central producto de los cambios climáticos. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Marino Estay, G. A. (2017). Impacto del proceso de escalamiento de forzantes meteorológicas de modelos de circulación general en la estimación de recurso hídricos en la cuenca de Andalién en la Región del Bío-Bío, Chile. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Mena Pardo, D. I. (2009). Análisis de impactos del cambio climático en la cuenca Andina del río Teno, usando el modelo WEAP. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Mendoza Zúñiga, P. A. (2010). Pronóstico de Caudales de Crecida Mediante un Modelo Hidrológico Distribuido y la Asimilación de Datos Observados. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Michel, C. (1991), *Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux*. Hydrology handbook. Cemagref, Antony, France.
- Morales Ulloa, B. A. (2012). Adaptación de sistemas de agua potable rural frente al cambio climático en el Valle del Río Cogotí. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Neumann Mery, C. I. (2019). Impacto de la desagregación a nivel horario de la precipitación proyectada por un modelo de circulación global, en los hidrogramas de crecida generados por el modelo hidrológico distribuido VIC, en dos cuencas de Chile Central sin influencia glaciar. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of hydrology*, 279(1-4), 275-289.
- Ramirez, J., Jarvis, A., 2010. Downscaling global circulation model outputs: the delta method. *Decis. policy Anal. Work. Pap.* 1, 1–18.

- Ricchetti, F. & X. Vargas (2017). “Preliminary evaluation of climate change impact in the Codegua’s river irrigation improvement project”, EGU 2017 General Assembly, Viena, Austria.
- Ricchetti Campos, F. (2018). Incorporación del efecto de la no estacionareidad en el análisis de series hidrometeorológicas de precipitación diaria y temperatura media diaria. Caso de estudio: valores extremos y mensuales en Chile Central. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Strahler, A. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. Mc Graw-Hill. New York - USA.
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A., (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. Bull. Am. Met. Soc. 93, 485–498. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.
- Témez, J., 1991. Extended and improved Rational Method. Highways Administration of Spain.
- Trzaska, S., & Schnarr, E. (2014). A review of downscaling methods for climate change projections. United States Agency for International Development by Tetra Tech ARD, 1-42.
- USAID (2014). “A review of downscaling methods for climate change projections”. United State Agency for International Development with African and Latin American Resilience to Climate Change.
- Vásquez Placencia, N. A. (2018). Incorporación de información de percepción remota para mejorar la representación de procesos del ciclo hidrológico usando el modelo CRHM. Aplicación en la cuenca del río Elqui, Chile. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Wilby, R. L., Charles, S. P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., & Mearns, L. O. (2004). Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. Supporting material of the Intergovernmental Panel on Climate Change, available from the DDC of IPCC TGCI, 27.
- Yapo, P. O., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (1998). Multi-objective global optimization for hydrologic models. Journal of hydrology, 204(1-4), 83-97.
- Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., Hernández, H.J., Galleguillos, M., Estades, C., Biging, G.S., Radke, J.D., Gong, P., 2016. Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. Remote Sens. Environ. 183, 170–185. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.016>

Anexos

Anexo A: Validación producto CR2MET

A continuación, se presentan los resultados obtenidos tras el chequeo de consistencia realizado para evaluar el desempeño del producto grillado CR2MET al reproducir la climatología de la zona de estudio.

A.1. Temperatura máxima

Cercana a la zona de estudio existen dos estaciones meteorológicas con registros de temperaturas mayores a los 30 años: Curicó y Potrero Grande. En la Figura A.1 se muestra el gráfico de dispersión entre los valores medios anuales observados y los simulados por CR2MET, mientras que en las Figuras A.2 y A.3 se presenta la comparación de la curva de variación estacional.

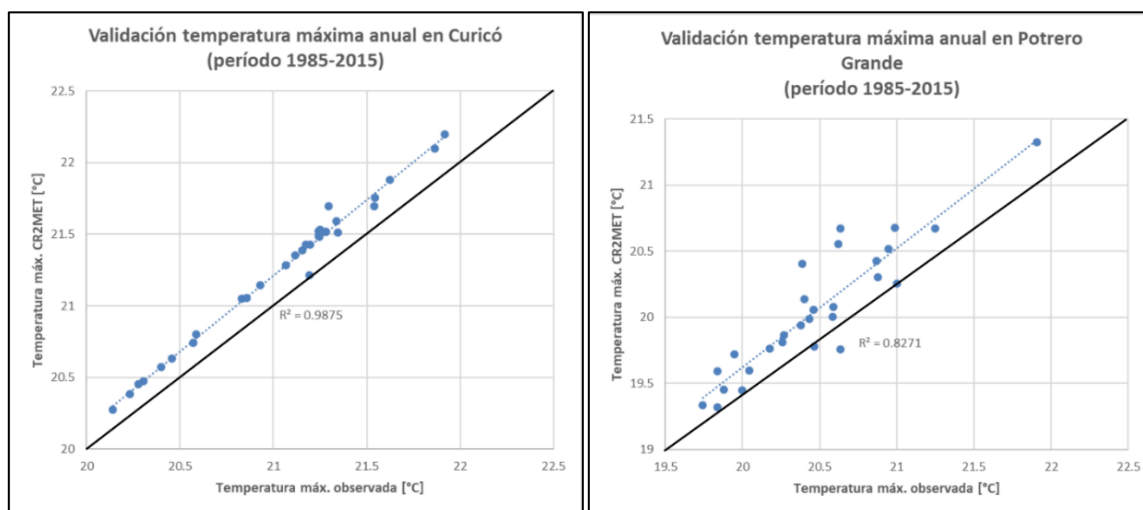


Figura A.1: Gráficos de dispersión entre la temperatura máxima observada en las estaciones meteorológicas de la zona de estudio y la precipitación simulada por CR2MET en los respectivas pixeles de cada estación. Adicionalmente, se incluye la línea 1:1 y el valor de R^2 .

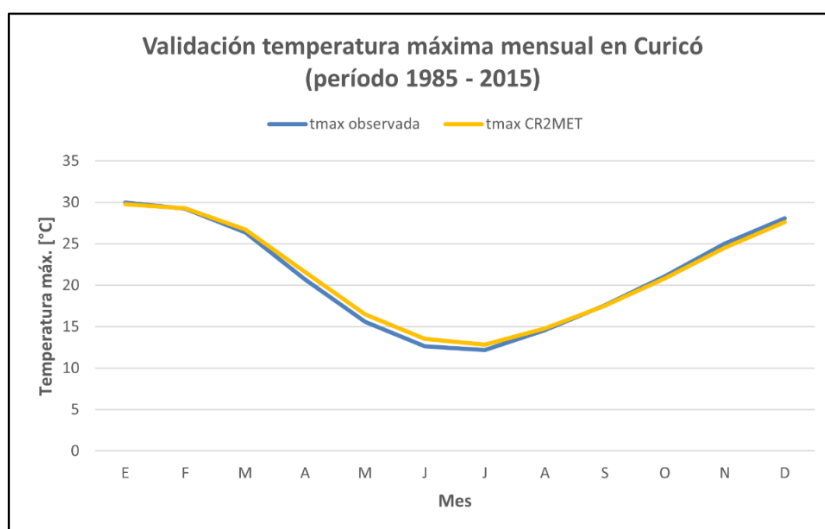


Figura A.2: Curvas de variación estacional de temperatura máxima en estación Curicó. Comparación entre valores observados y simulados por CR2MET.

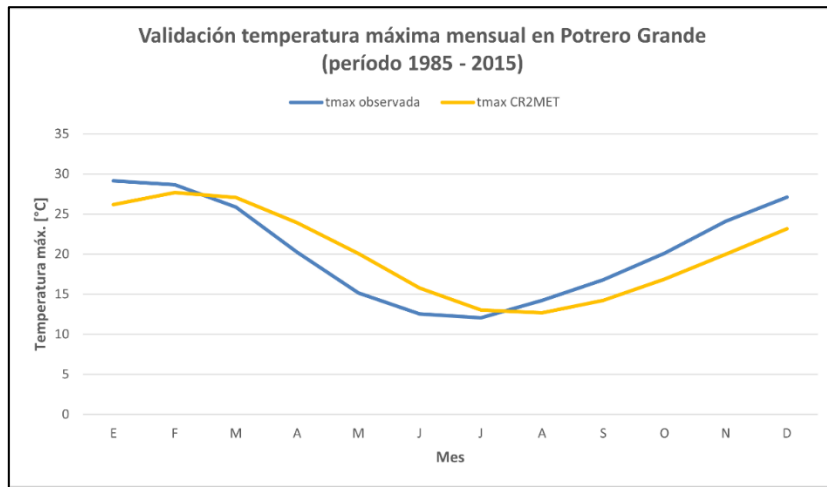


Figura A.3: Curvas de variación estacional de temperatura máxima en estación Potrero Grande. Comparación entre valores observados y simulados por CR2MET.

A.2. Temperatura mínima

Análogo al caso de las temperaturas máximas, en la Figura A.4 se muestra el gráfico de dispersión entre los valores medios anuales de temperatura mínima observada y simulada por CR2MET, mientras que en las Figuras A.5 y A.6 se presenta la comparación entre curvas de variación estacional.

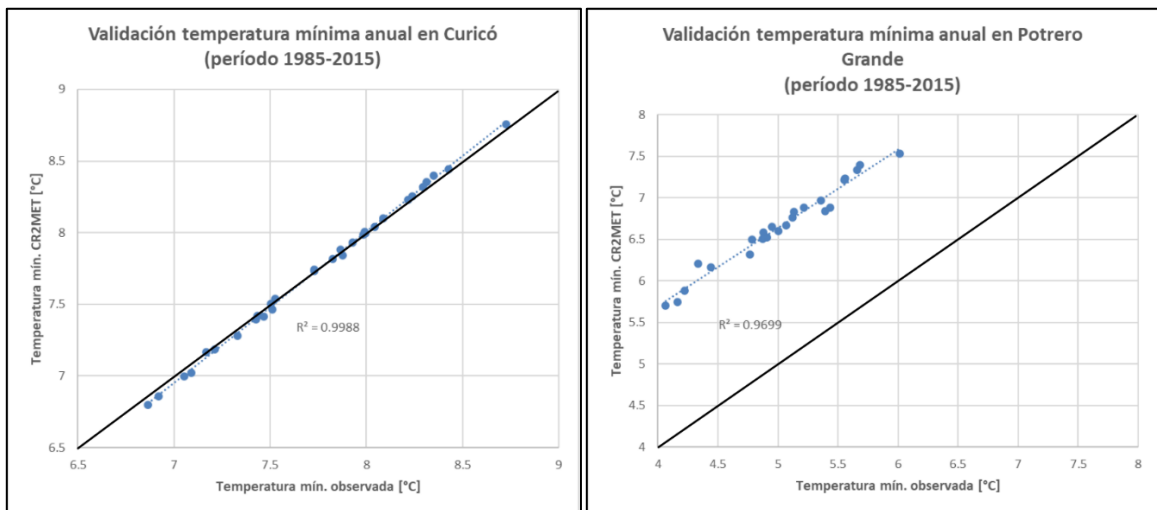


Figura A.4: Gráficos de dispersión entre la temperatura mínima observada en las estaciones meteorológicas de la zona de estudio y la precipitación simulada por CR2MET en los respectivas pixeles de cada estación. Adicionalmente, se incluye la línea 1:1 y el valor de R^2 .

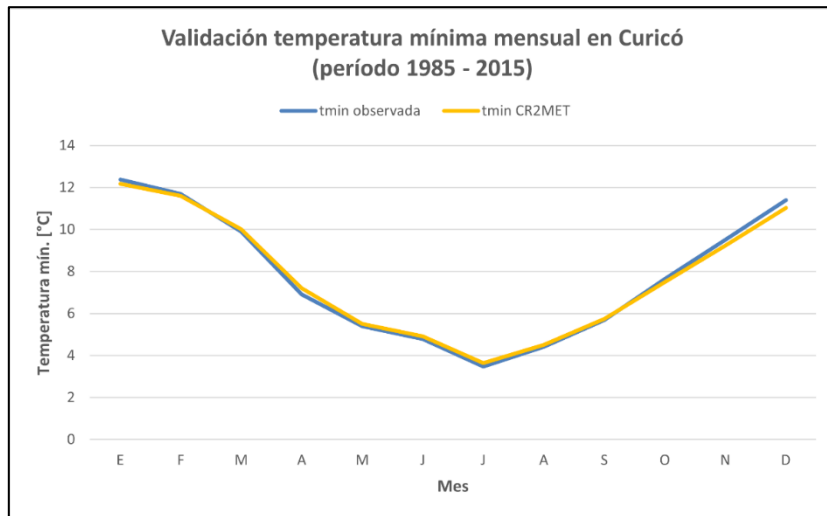


Figura A.5: Curvas de variación estacional de temperatura mínima en estación Curicó. Comparación entre valores observados y simulados por CR2MET.

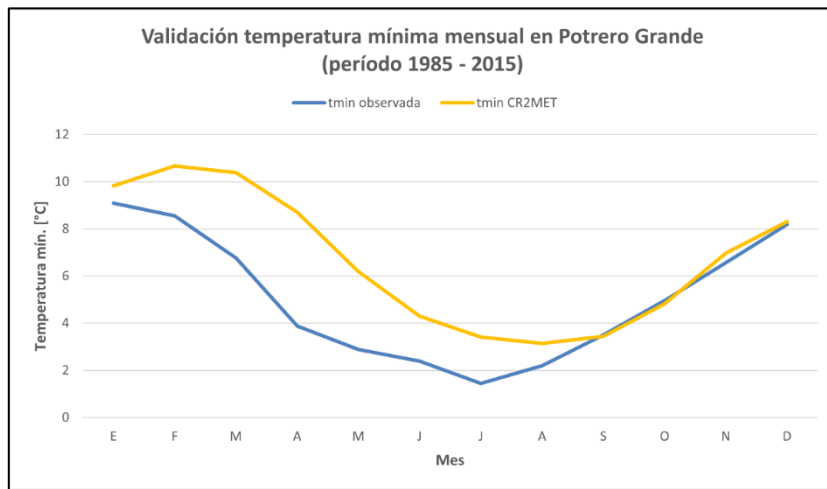


Figura A.6: Curvas de variación estacional de temperatura mínima en estación Potrero Grande. Comparación entre valores observados y simulados por CR2MET.

A.3. Precipitación

Existe un total de cinco estaciones meteorológicas de la DGA cercanas a la zona de estudio, y con registros continuos mayores a 20 años, que fueron consideradas: El Manzano, Fundo el Radal, Monte Oscuro, Potrero Grande y Agua Fría. En la Figura A.7 se muestra el gráfico de dispersión entre los valores acumulados de precipitación anual observados y simulados por los pixeles de CR2MET. Por otra parte, en las Figuras A.8 a A.12 se presenta la comparación entre las curvas de variación estacional de cada estación, mientras que en las Figuras A.13 a A.17 se encuentran las gráficas comparativas de distribución de fechas de los valores máximos anuales de precipitación.

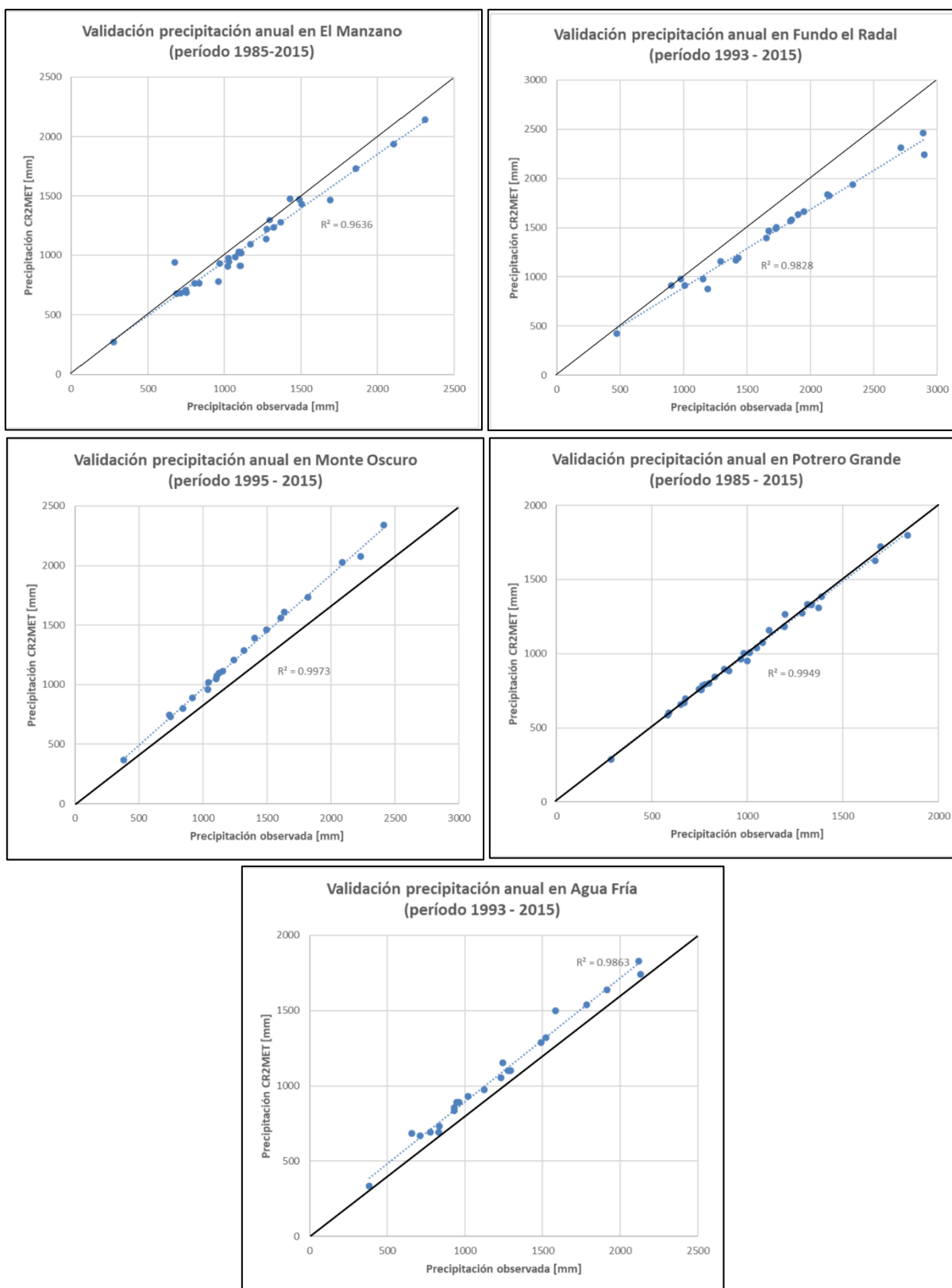


Figura A.7: Gráficos de dispersión, línea 1:1 y valor de R^2 entre la precipitación en las estaciones meteorológicas de la zona de estudio y la precipitación simulada por CR2MET en los respectivas pixeles de cada estación.

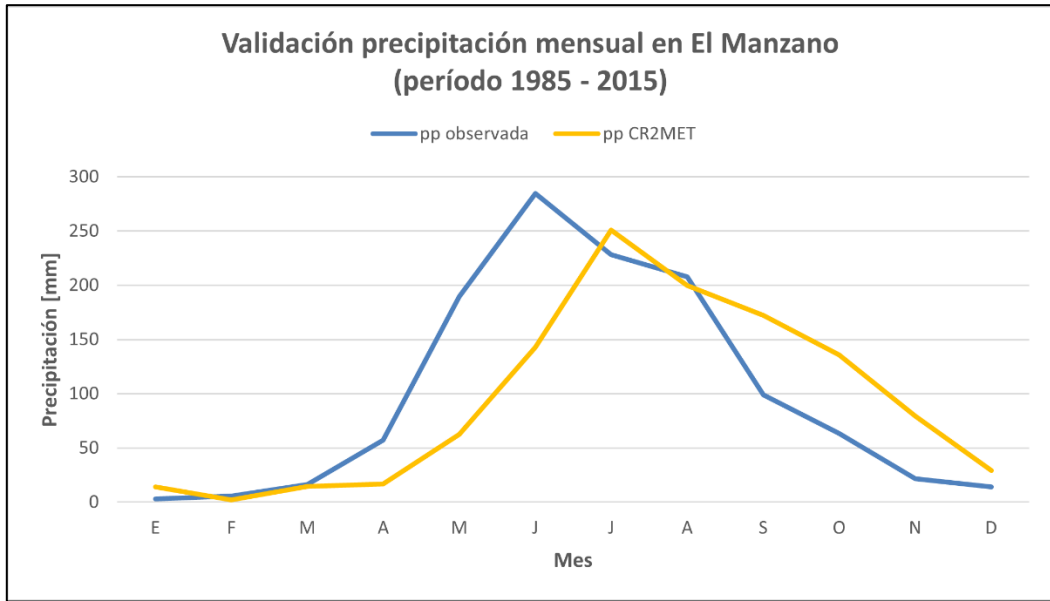


Figura A.8: Curvas de variación estacional de precipitación en estación El Manzano. Comparación entre valores observados y simulados por CR2MET.

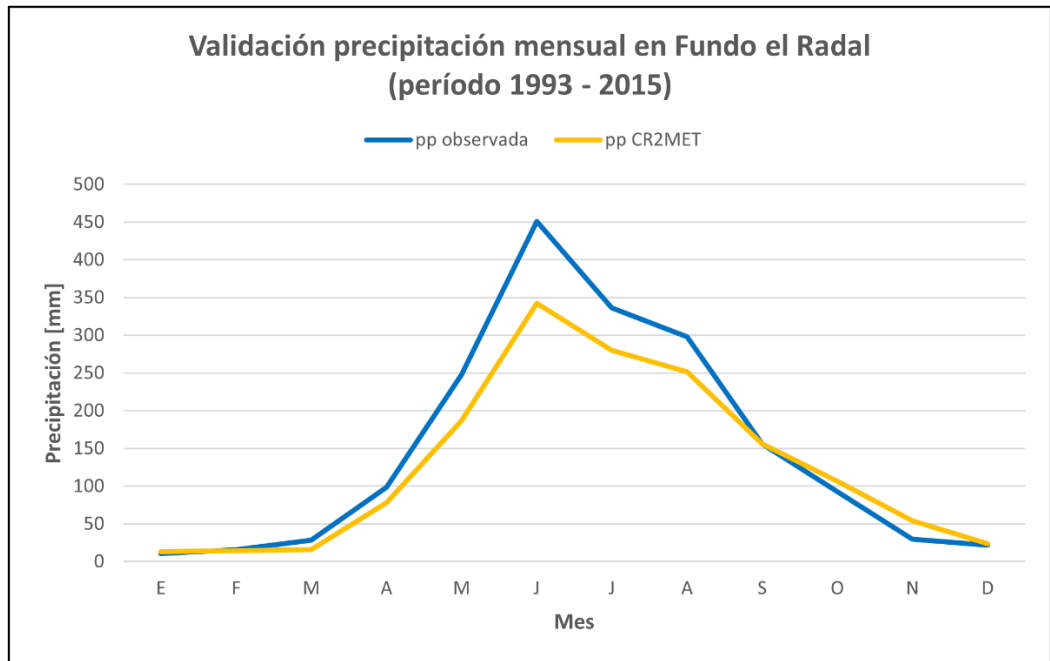


Figura A.9: Curvas de variación estacional de precipitación en estación Fundo el Radal. Comparación entre valores observados y simulados por CR2MET.

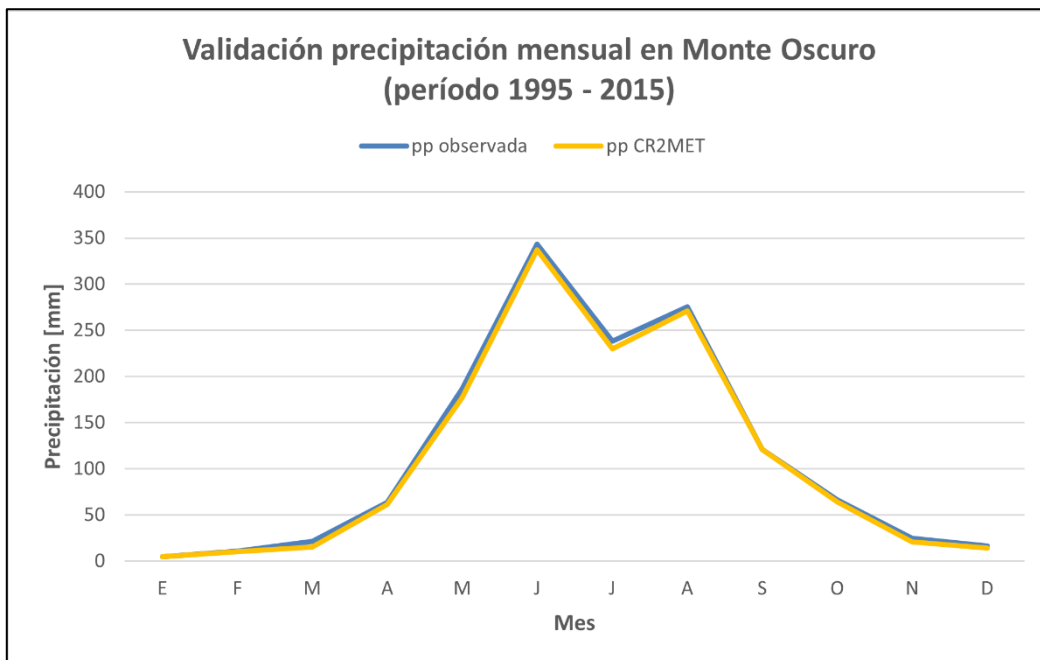


Figura A.10: Curvas de variación estacional de precipitación en estación Monte Oscuro. Comparación entre valores observados y simulados por CR2MET.

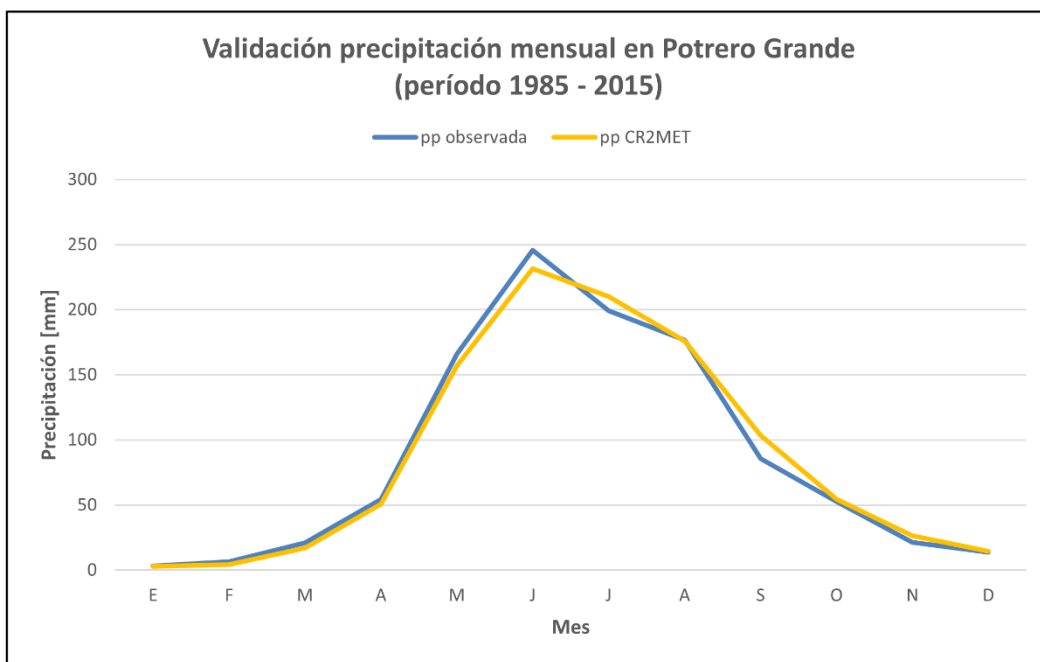


Figura A.11: Curvas de variación estacional de precipitación en estación Potrero Grande. Comparación entre valores observados y simulados por CR2MET.

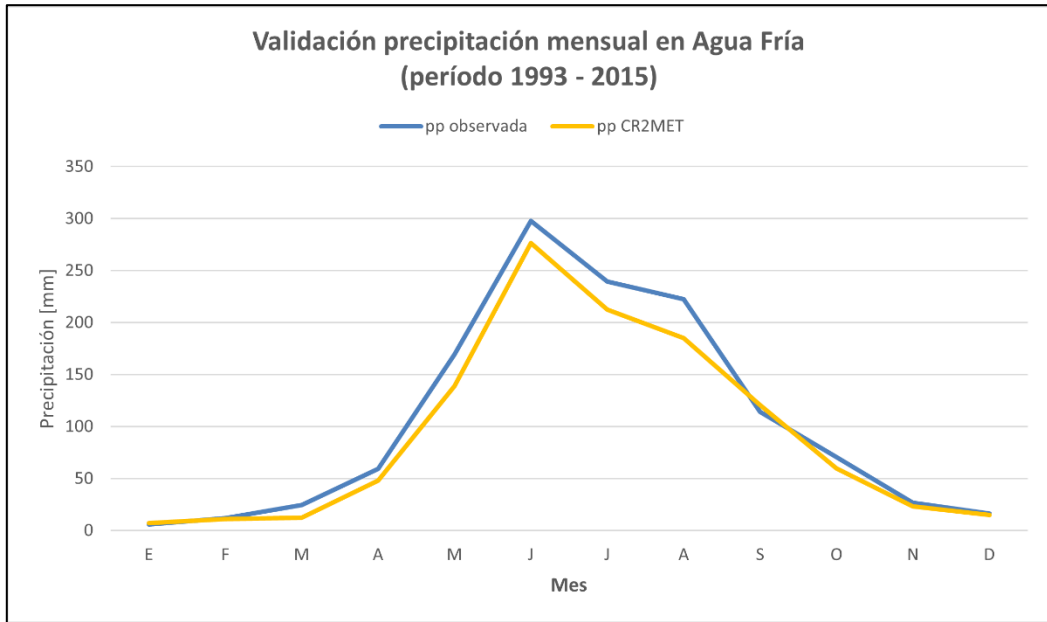


Figura A.12: Curvas de variación estacional de precipitación en estación Agua Fría. Comparación entre valores observados y simulados por CR2MET.

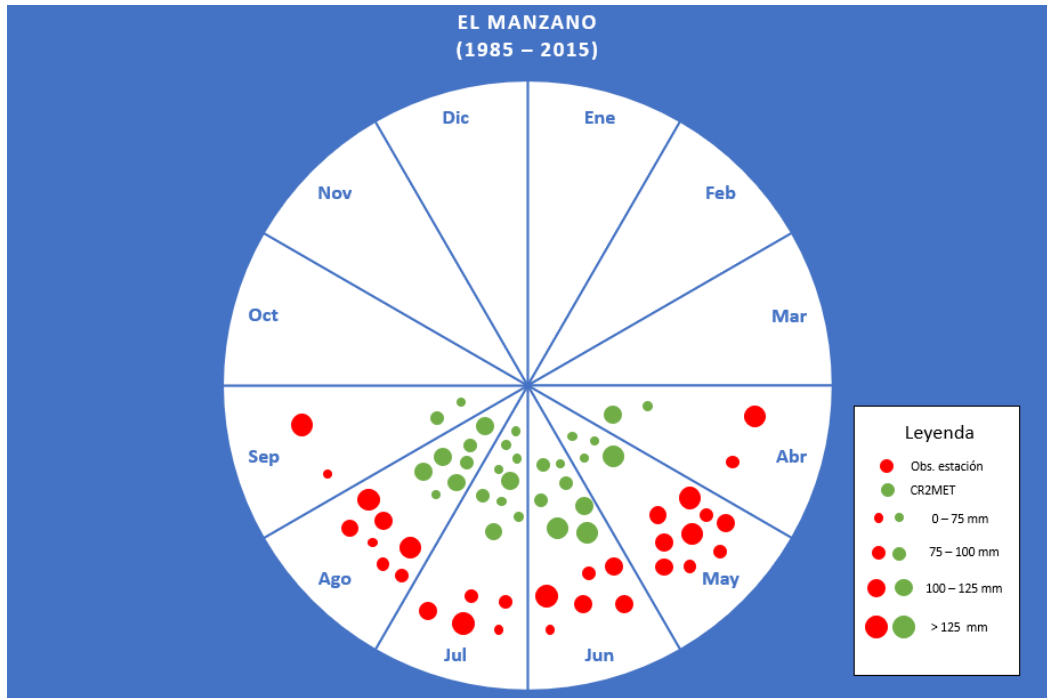


Figura A.13: Distribución mensual de los valores máximos anuales de precipitación observados y simulados por CR2MET en estación El Manzano, durante el período 1985 - 2015.

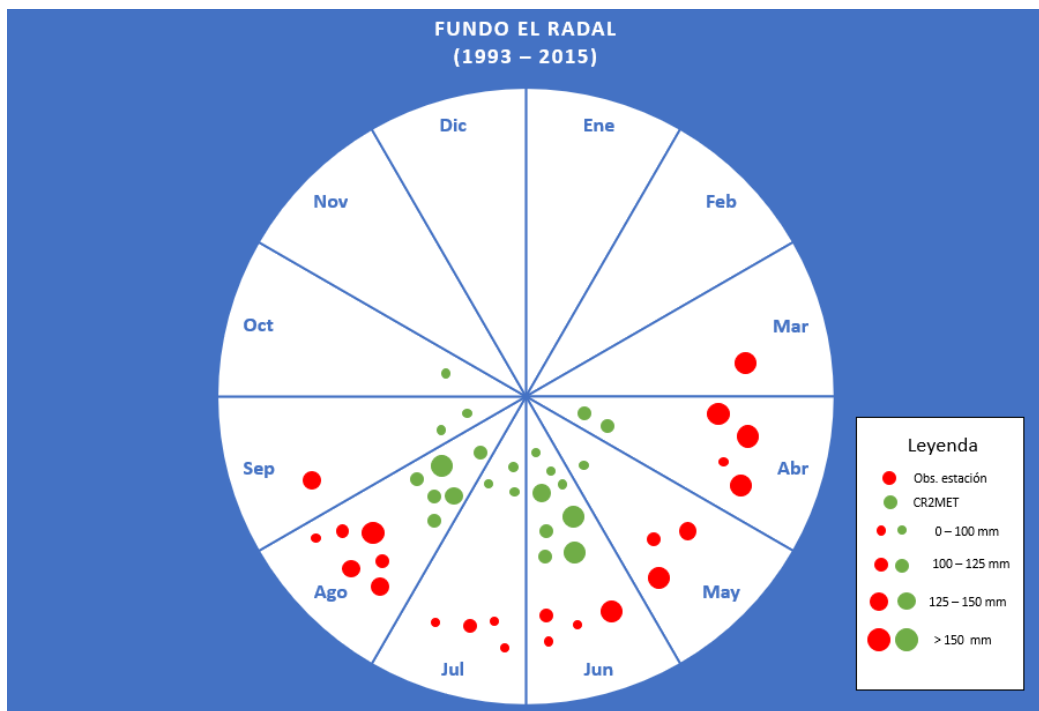


Figura A.14: Distribución mensual de los valores máximos anuales de precipitación observados y simulados por CR2MET en estación Fundo el Radal, durante el período 1993 - 2015.

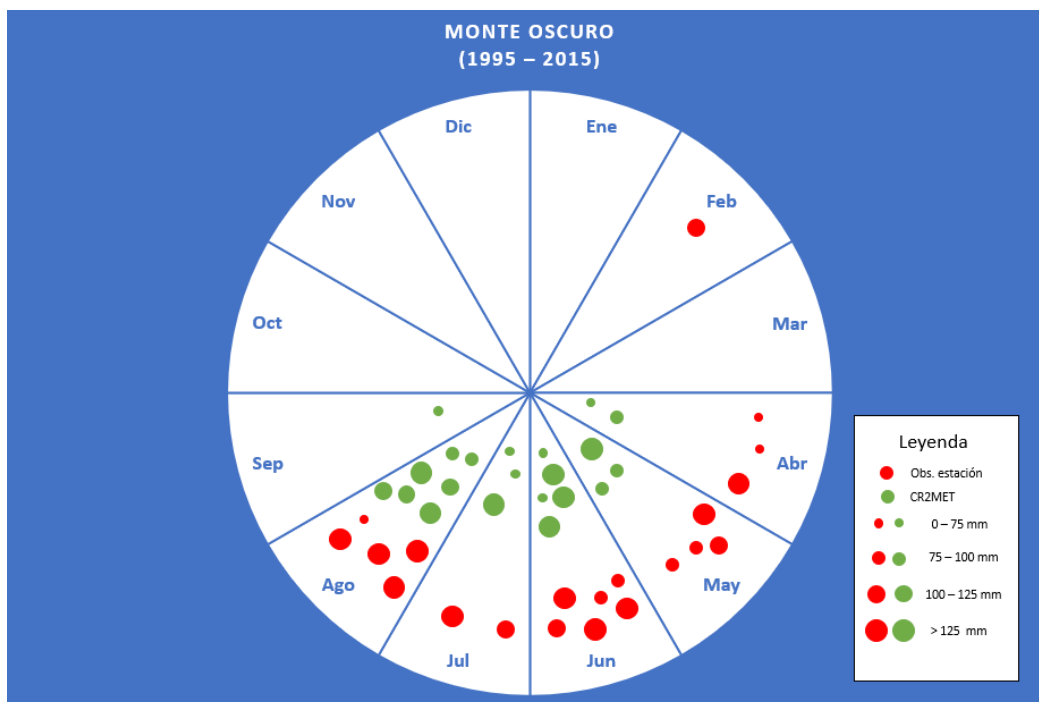


Figura A.15: Distribución mensual de los valores máximos anuales de precipitación observados y simulados por CR2MET en estación Monte Oscuro, durante el período 1995 - 2015.

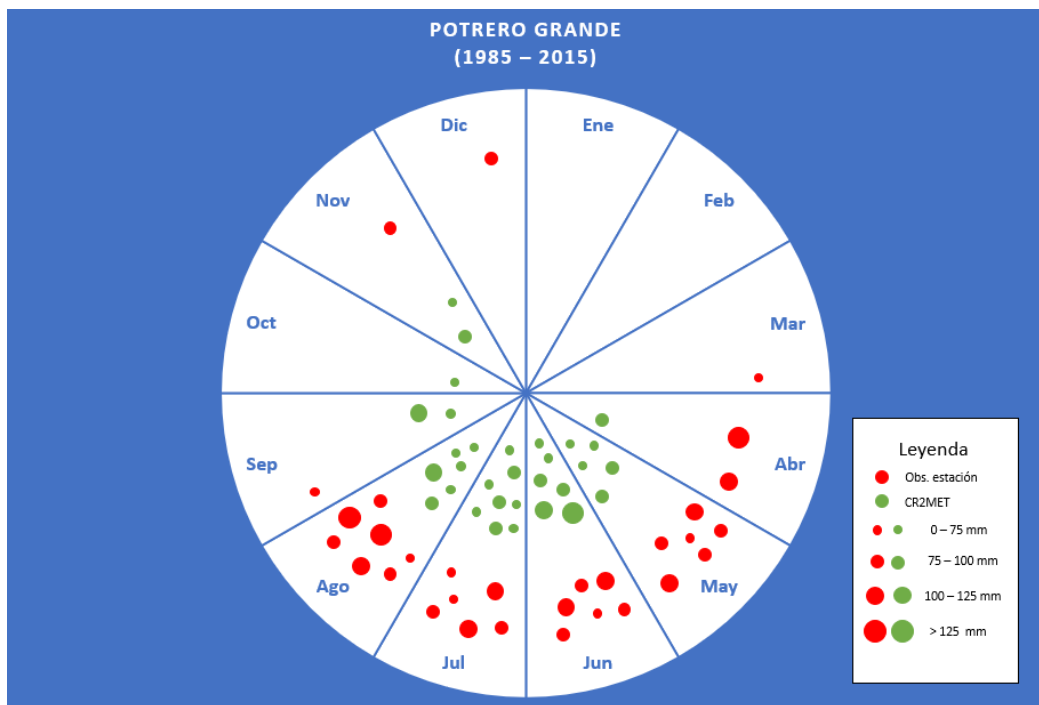


Figura A.16: Distribución mensual de los valores máximos anuales de precipitación observados y simulados por CR2MET en estación Potrero Grande, durante el período 1985 - 2015.

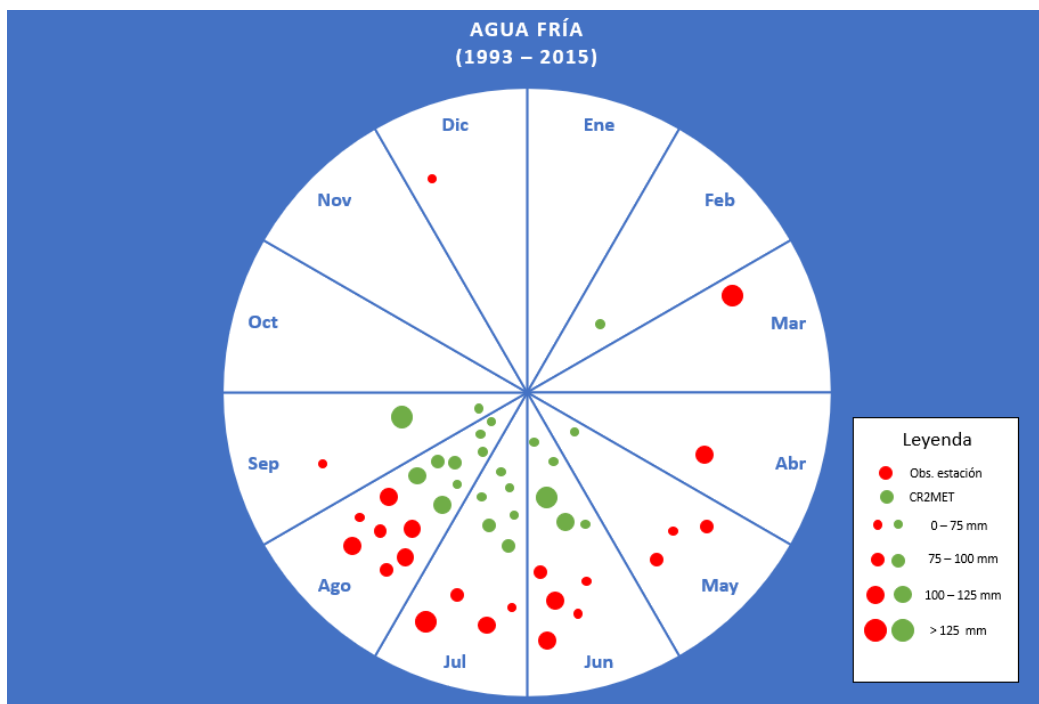


Figura A.17: Distribución mensual de los valores máximos anuales de precipitación observados y simulados por CR2MET en estación Agua Fría, durante el período 1993 - 2015.

Anexo B: Series anuales de GCMs durante el período histórico

B.1. Precipitación

Tabla B.1: Principales estadísticos de las series anuales de precipitación simuladas por el producto grillado CR2MET y los cuatro GCMs escalados, durante el período 1985 – 2015.

Simulación (CR2MET/ GCM)	Media [mm]	Desviación Estándar [mm]	Mediana [mm]	Valor Máximo [mm]	Valor Mínimo [mm]
Claro – CR2MET	1595	525	1454	2640	540
Claro – CCSM	1714	357	1731	2237	989
Claro – CSIRO	1674	315	1626	2550	1109
Claro – IPSL	1680	541	1544	3113	879
Claro – MIROC	1701	347	1729	2337	695
Colorado – CR2MET	1628	519	1507	2587	600
Colorado – CCSM	1745	353	1795	2344	1075
Colorado – CSIRO	1710	305	1685	2558	1149
Colorado – IPSL	1716	547	1577	3154	903
Colorado – MIROC	1740	351	1775	2399	721
Palos – CR2MET	1777	563	1692	2835	634
Palos – CCSM	1906	386	1942	2612	1192
Palos – CSIRO	1869	334	1835	2802	1244
Palos – IPSL	1876	593	1726	3402	989
Palos – MIROC	1905	383	1928	2641	782
Valle – CR2MET	1369	466	1254	2348	436
Valle – CCSM	1470	315	1497	1967	834
Valle – CSIRO	1437	289	1374	2240	923
Valle – IPSL	1440	473	1311	2697	753
Valle – MIROC	1458	305	1467	1985	575
Cordillera – CR2MET	2013	610	1903	3133	763
Cordillera – CCSM	2147	430	2182	2895	1384
Cordillera – CSIRO	2106	354	2079	3080	1438
Cordillera – IPSL	2117	648	1955	3723	1133
Cordillera – MIROC	2150	429	2161	3053	907

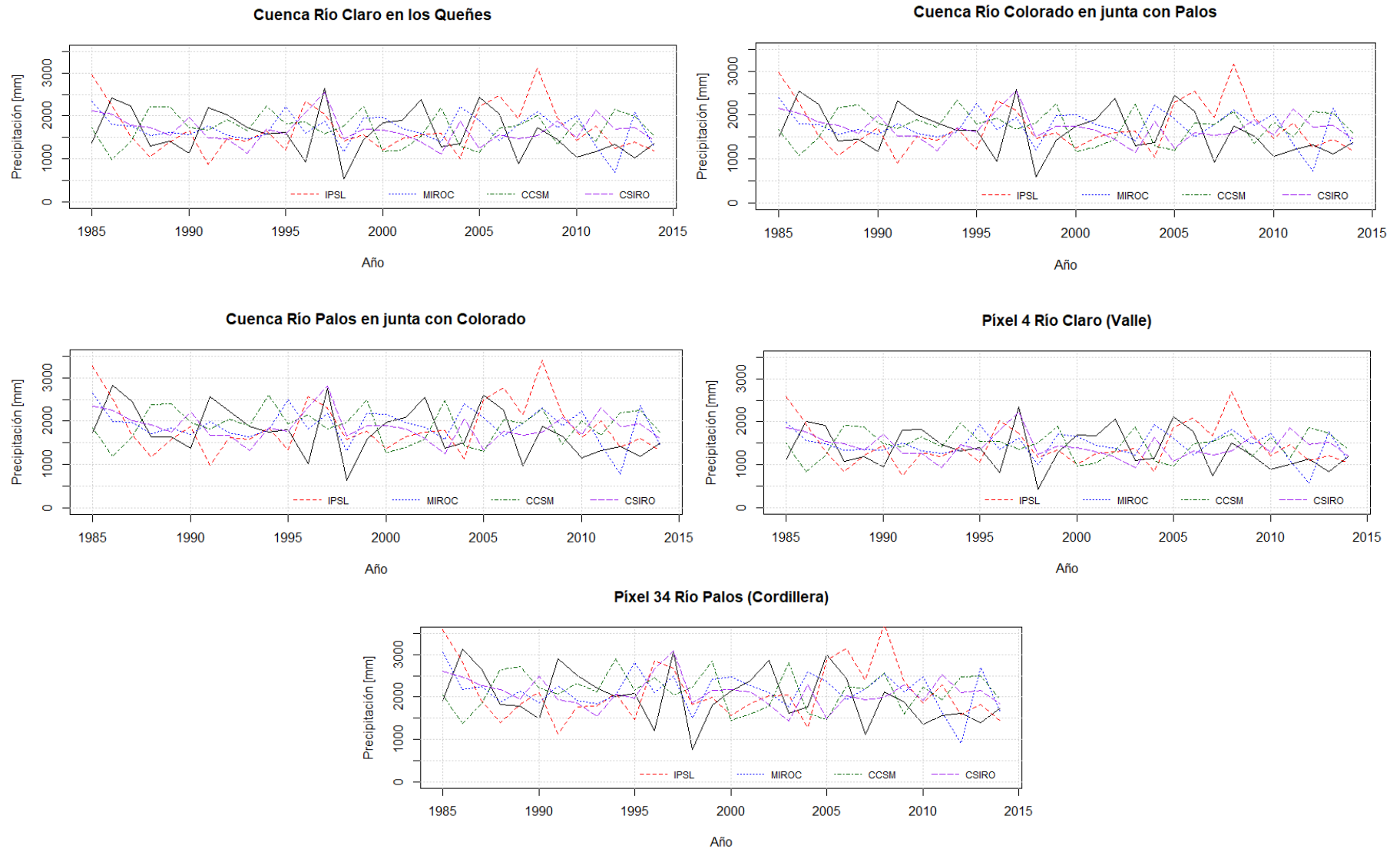


Figura B.1: Series anuales de precipitación simulada por el producto grillado CR2MET (línea negra continua) y por cada uno de los cuatro GCMs escalados, durante el período 1985 – 2015.

Tabla B.2: Principales estadísticos de las series anuales de temperatura máxima simuladas por el producto grillado CR2MET y los cuatro GCMs escalados, durante el período 1985 – 2015.

Simulación (CR2MET/ GCM)	Media [°C]	Desviación Estándar [°C]	Mediana [°C]	Valor Máximo [°C]	Valor Mínimo [°C]
Claro – CR2MET	13,7	0,4	13,7	14,5	12,8
Claro – CCSM	13,9	0,8	14,0	15,5	12,2
Claro – CSIRO	13,7	1,4	13,4	16,8	11,1
Claro – IPSL	13,8	0,7	13,8	15,3	12,3
Claro – MIROC	13,5	1,1	13,6	15,4	10,8
Colorado – CR2MET	12,5	0,4	12,4	13,3	11,6
Colorado – CCSM	12,7	0,8	12,9	14,4	11,1
Colorado – CSIRO	12,5	1,5	12,2	15,6	9,8
Colorado – IPSL	12,7	0,8	12,7	14,3	11,1
Colorado – MIROC	12,3	1,1	12,5	14,3	9,4
Palos – CR2MET	12,7	0,4	12,6	13,5	11,8
Palos – CCSM	12,9	0,8	13,1	14,7	11,4
Palos – CSIRO	12,7	1,5	12,4	15,9	10,0
Palos – IPSL	12,9	0,8	12,9	14,5	11,2
Palos – MIROC	12,5	1,2	12,6	14,5	9,6
Valle – CR2MET	17,9	0,4	17,8	19,0	17,1
Valle – CCSM	18,0	0,7	18,2	19,5	16,5
Valle – CSIRO	17,8	1,3	17,6	20,6	15,5
Valle – IPSL	18,0	0,6	18,0	19,3	16,6
Valle – MIROC	17,7	1,0	17,8	19,5	15,2
Cordillera – CR2MET	8,4	0,5	8,4	9,1	7,4
Cordillera – CCSM	8,7	0,9	8,9	10,7	6,9
Cordillera – CSIRO	8,4	1,7	8,1	12,1	5,3
Cordillera – IPSL	8,6	0,9	8,6	10,4	6,7
Cordillera – MIROC	8,2	1,3	8,3	10,5	5,0

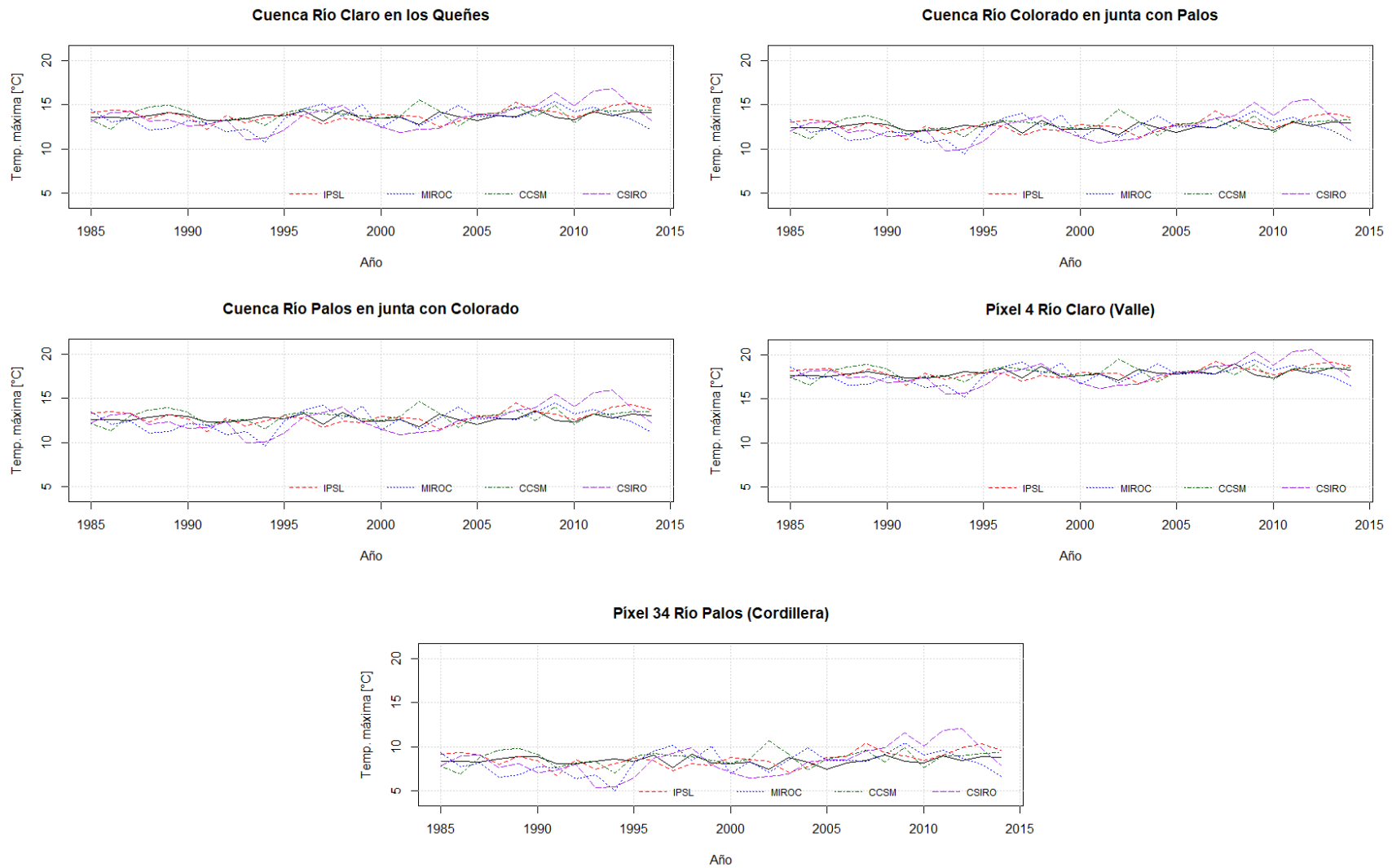


Figura B.2: Series anuales de temperatura máxima simulada por el producto grillado CR2MET (línea negra continua) y por cada uno de los cuatro GCMs escalados, durante el período 1985 – 2015.

Tabla B.3: Principales estadísticos de las series anuales de temperatura mínima simuladas por el producto grillado CR2MET y los cuatro GCMs escalados, durante el período 1985 – 2015.

Simulación (CR2MET/ GCM)	Media [°C]	Desviación Estándar [°C]	Mediana [°C]	Valor Máximo [°C]	Valor Mínimo [°C]
Claro – CR2MET	3,2	0,4	3,2	3,9	2,3
Claro – CCSM	3,3	0,5	3,5	4,4	1,8
Claro – CSIRO	3,1	1,0	3,0	5,3	1,6
Claro – IPSL	3,3	0,6	3,3	4,4	1,9
Claro – MIROC	3,0	0,8	3,1	4,3	1,2
Colorado – CR2MET	2,4	0,4	2,4	3,2	1,6
Colorado – CCSM	2,6	0,5	2,7	3,7	1,1
Colorado – CSIRO	2,4	1,0	2,3	4,5	0,9
Colorado – IPSL	2,5	0,6	2,6	3,7	1,2
Colorado – MIROC	2,3	0,8	2,3	3,6	0,4
Palos – CR2MET	2,5	0,4	2,4	3,2	1,7
Palos – CCSM	2,6	0,5	2,7	3,7	1,2
Palos – CSIRO	2,4	0,9	2,3	4,5	0,9
Palos – IPSL	2,6	0,6	2,6	3,7	1,3
Palos – MIROC	2,3	0,8	2,4	3,6	0,5
Valle – CR2MET	5,4	0,5	5,4	6,2	4,4
Valle – CCSM	5,5	0,5	5,7	6,5	4,3
Valle – CSIRO	5,4	0,8	5,3	7,2	4,1
Valle – IPSL	5,5	0,5	5,5	6,5	4,4
Valle – MIROC	5,3	0,7	5,3	6,4	3,7
Cordillera – CR2MET	0,2	0,4	0,3	0,9	-0,5
Cordillera – CCSM	0,4	0,6	0,5	1,6	-1,2
Cordillera – CSIRO	0,2	1,1	0,1	2,6	-1,5
Cordillera – IPSL	0,4	0,6	0,4	1,7	-1,2
Cordillera – MIROC	0,1	0,9	0,1	1,6	-2,0

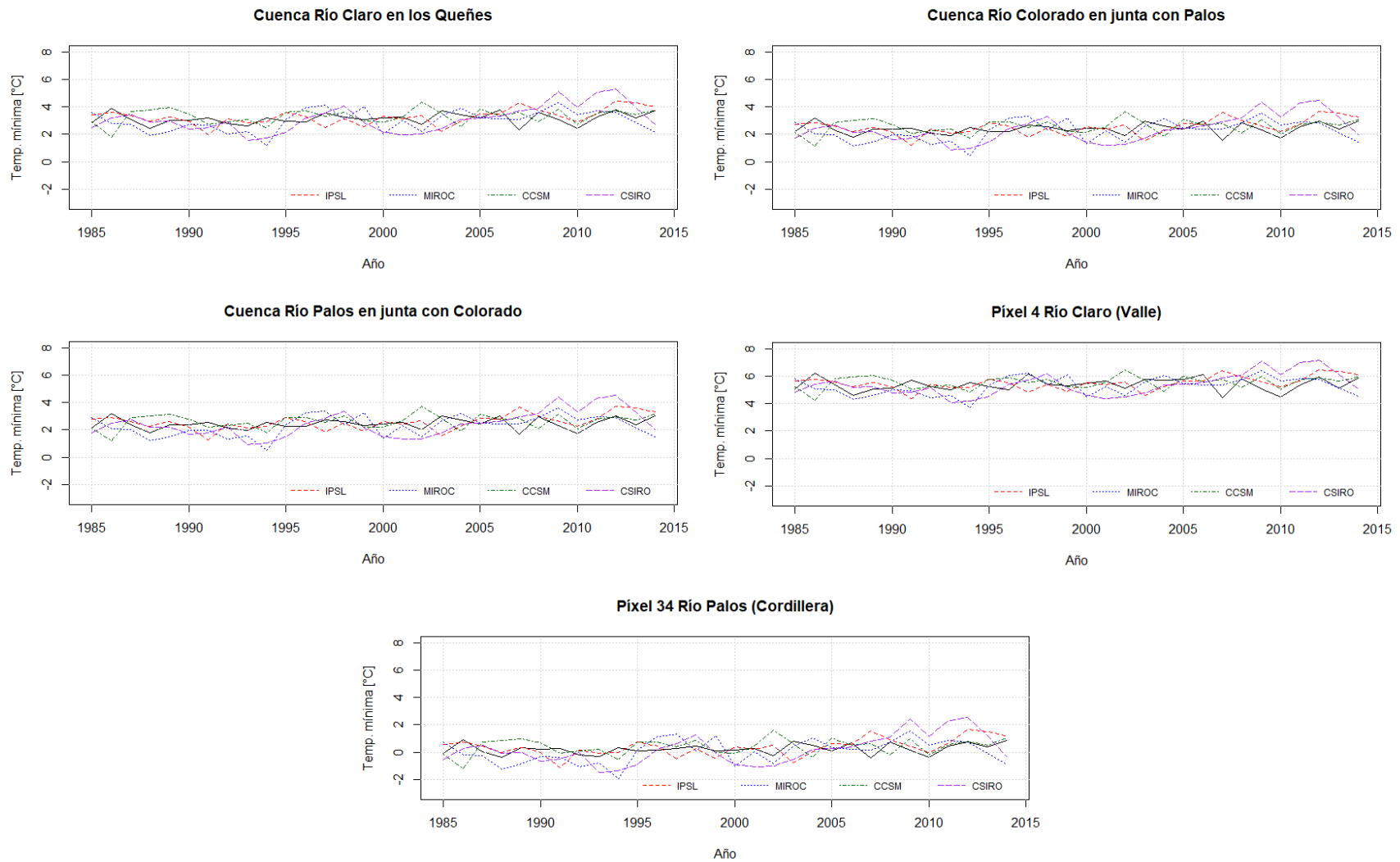


Figura B.3: Series anuales de temperatura mínima simulada por el producto grillado CR2MET (línea negra continua) y por cada uno de los cuatro GCMs escalados, durante el período 1985 – 2015.

Anexo C: Downscaling desagregado a nivel de píxel

C.1. Período de Calibración (1985 – 2015).

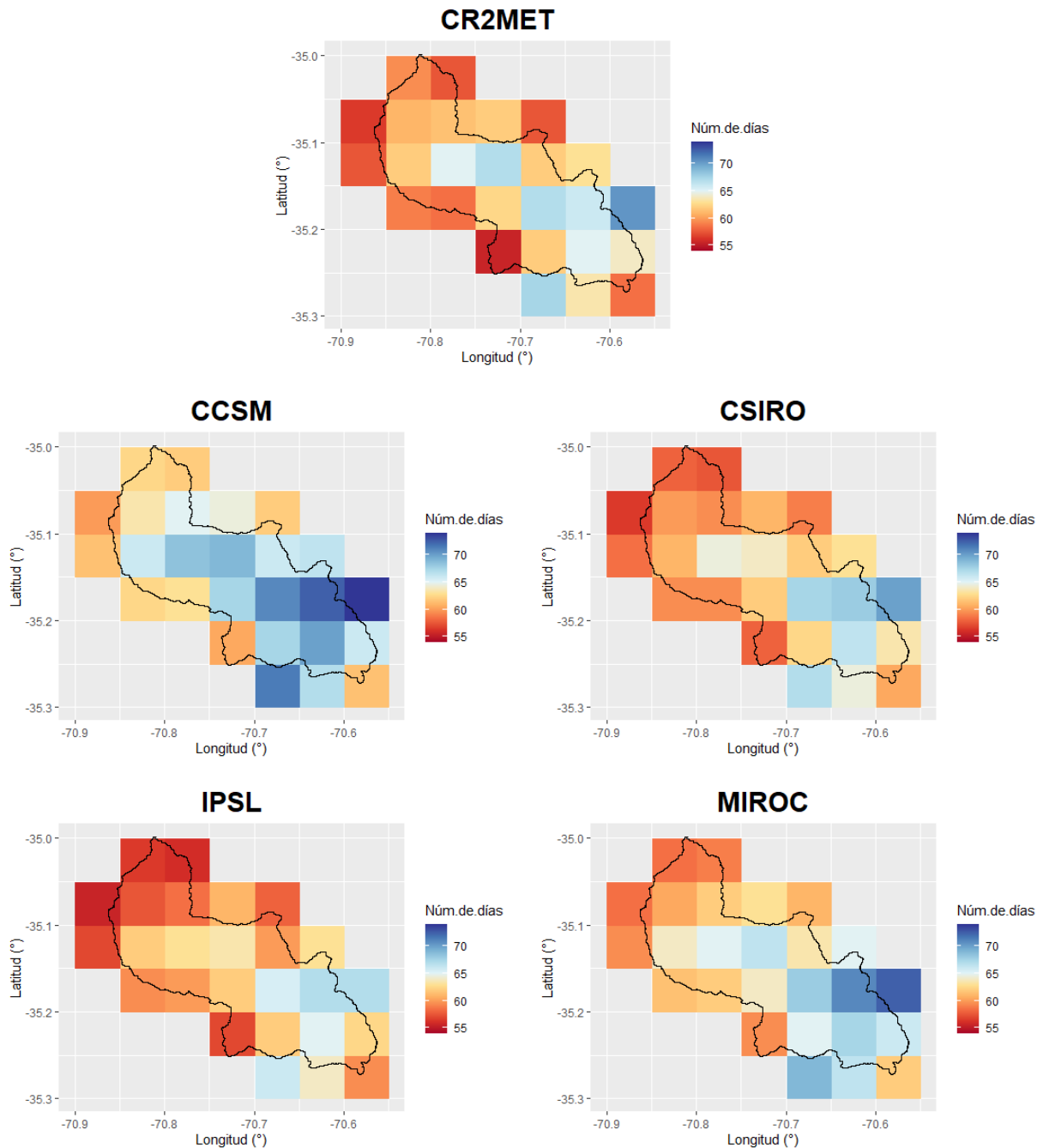


Figura C.1: Mediana del número de días con precipitación mayor a 0,5 mm al año en cada píxel de la cuenca del Río Claro en los Queñes. Se muestran los resultados obtenidos en CR2MET y en los cuatro GCM's durante el período de calibración.

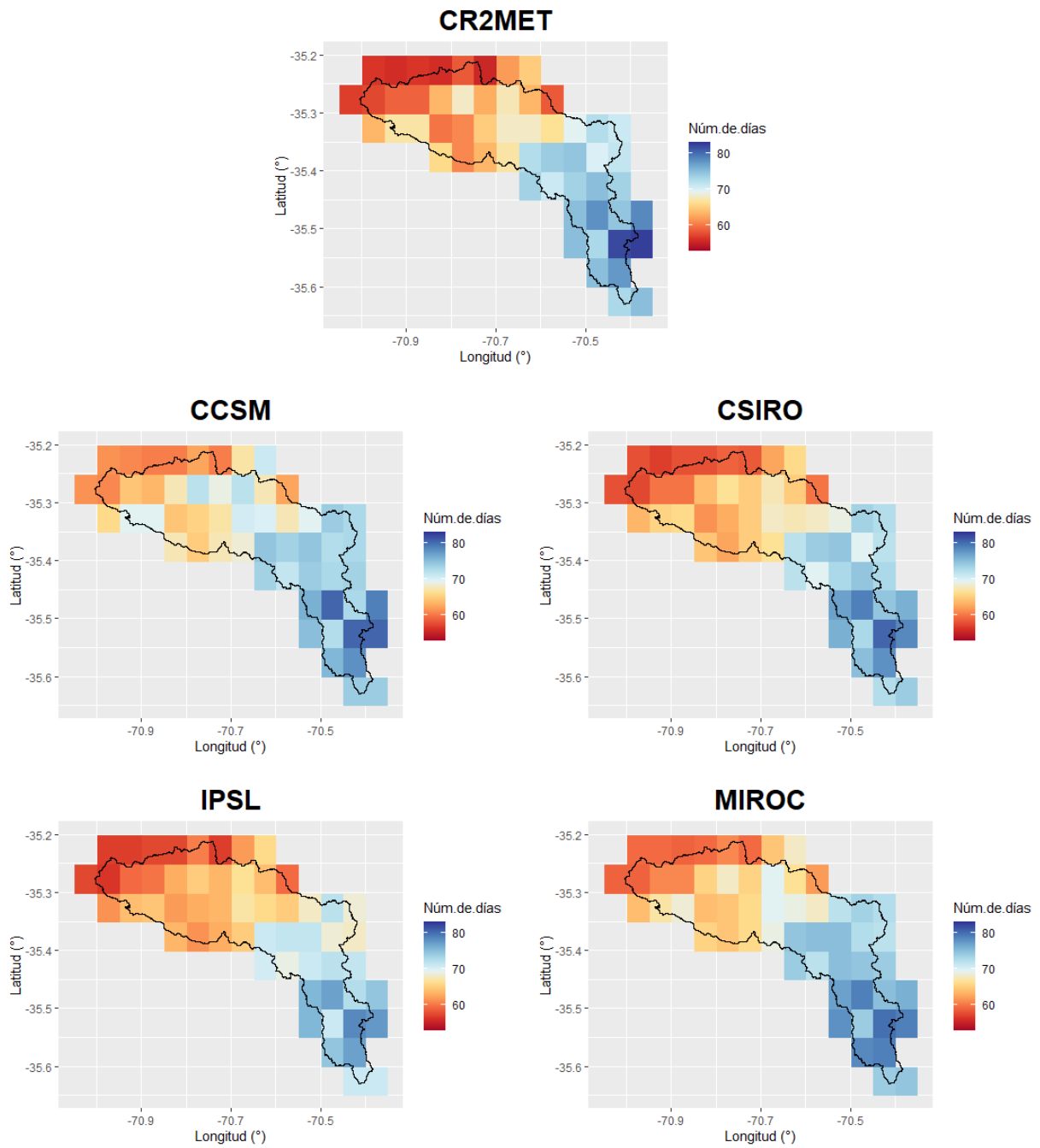


Figura C.2: Mediana del número de días con precipitación mayor a 0,5 mm al año en cada píxel de la cuenca del Río Colorado en junta con Palos. Se muestran los resultados obtenidos en CR2MET y en los cuatro GCM's durante el periodo de calibración.

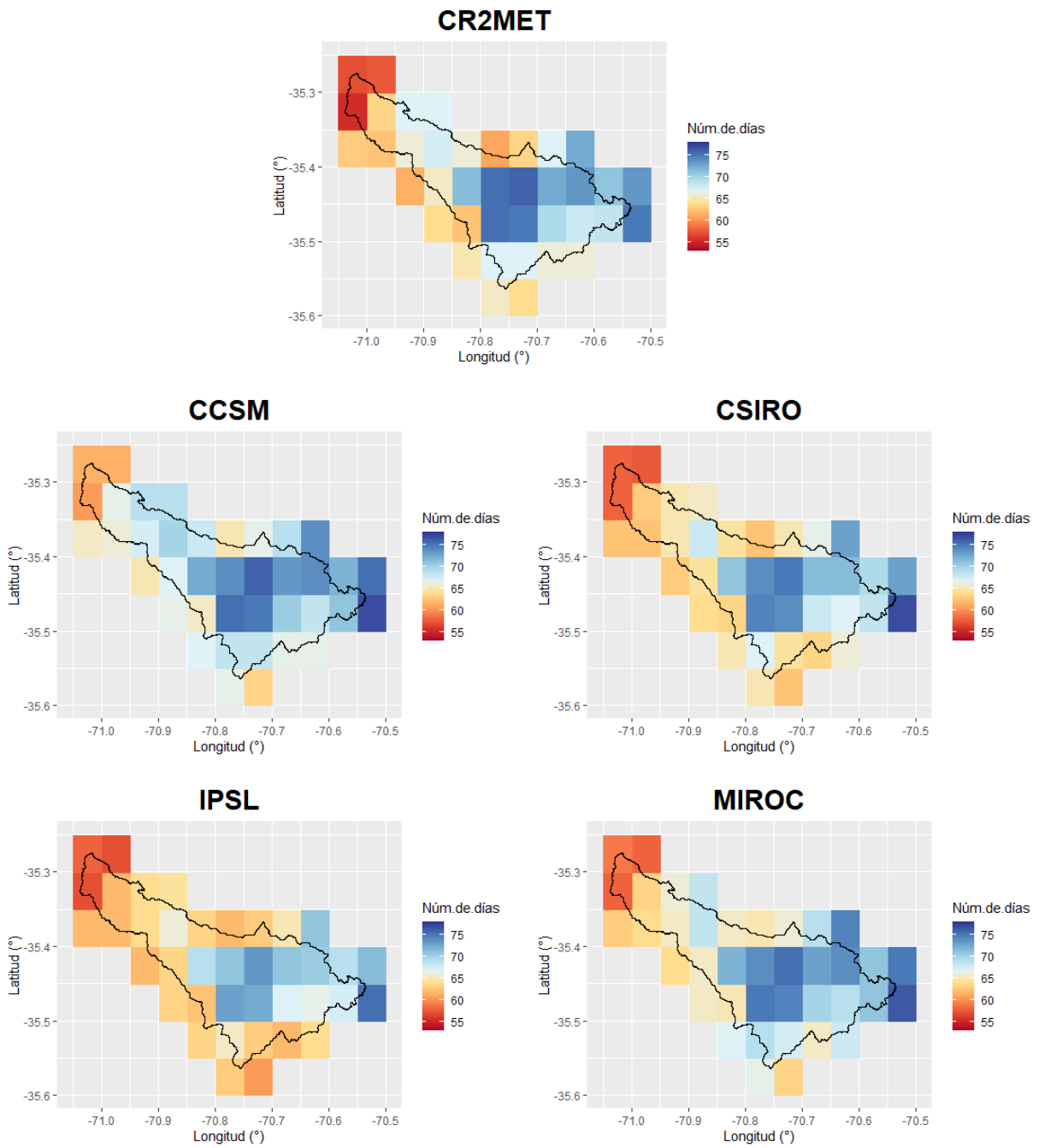


Figura C.3: Mediana del número de días con precipitación mayor a 0,5 mm al año en cada píxel de la cuenca del Río Palos en junta con Colorado. Se muestran los resultados obtenidos en CR2MET y en los cuatro GCM's durante el periodo de calibración.

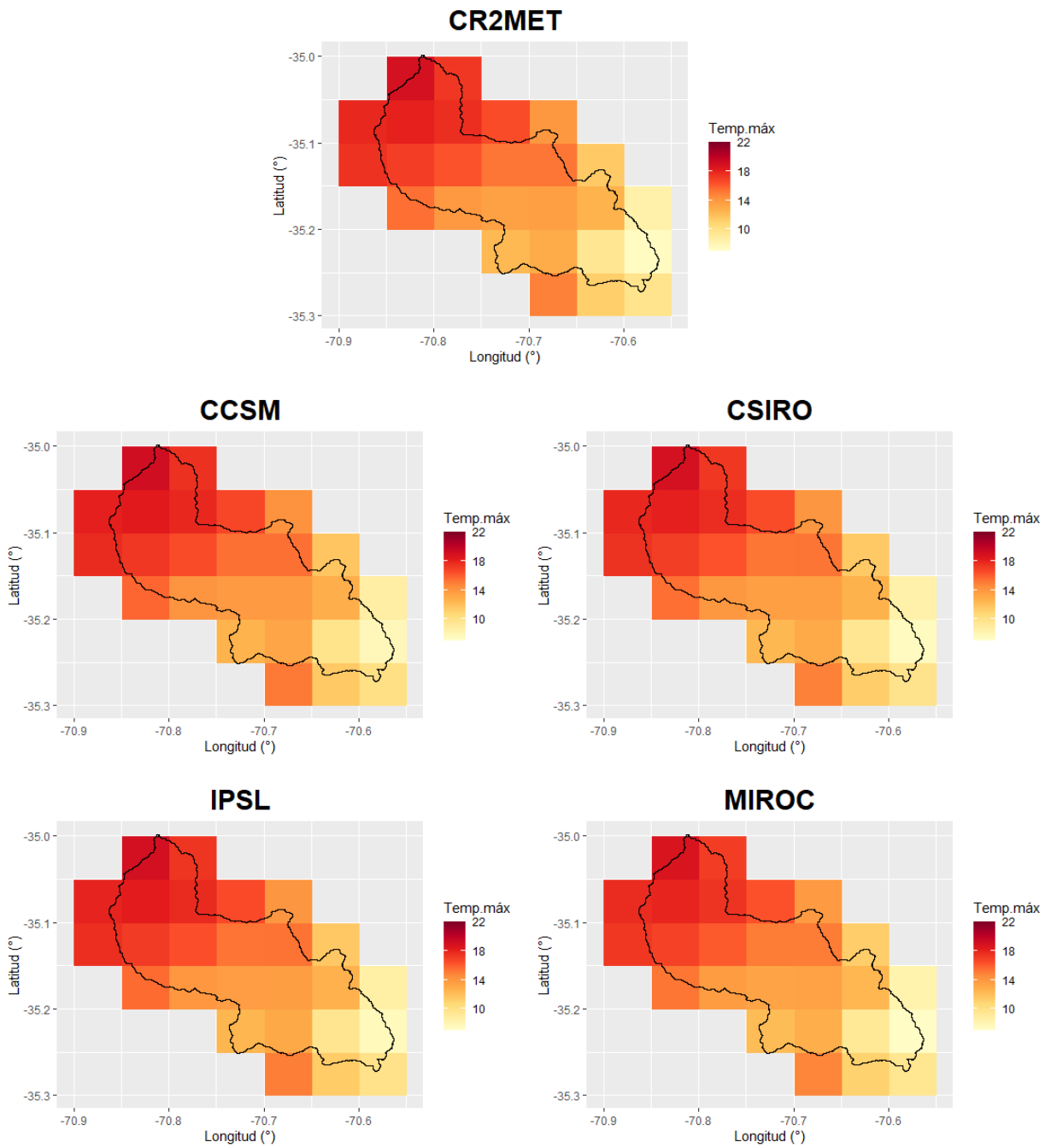


Figura C.4: Mediana de temperatura máxima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Claro en los Queñes. Se muestran los resultados obtenidos en CR2MET y en los cuatro GCM's durante el período de calibración.

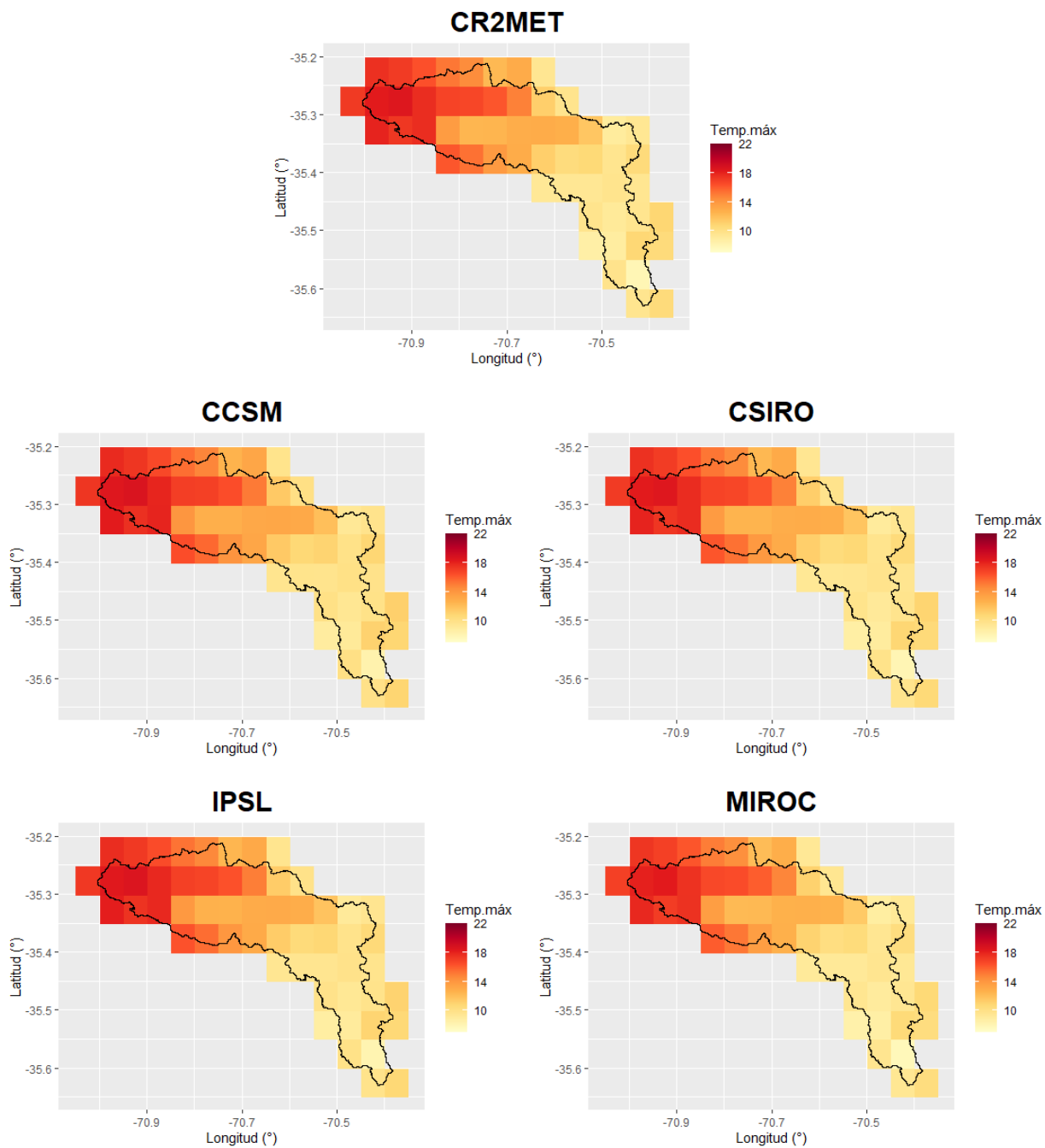


Figura C.5: Mediana de temperatura máxima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Colorado en junta con Palos. Se muestran los resultados obtenidos en CR2MET y en los cuatro GCM's durante el período de calibración.

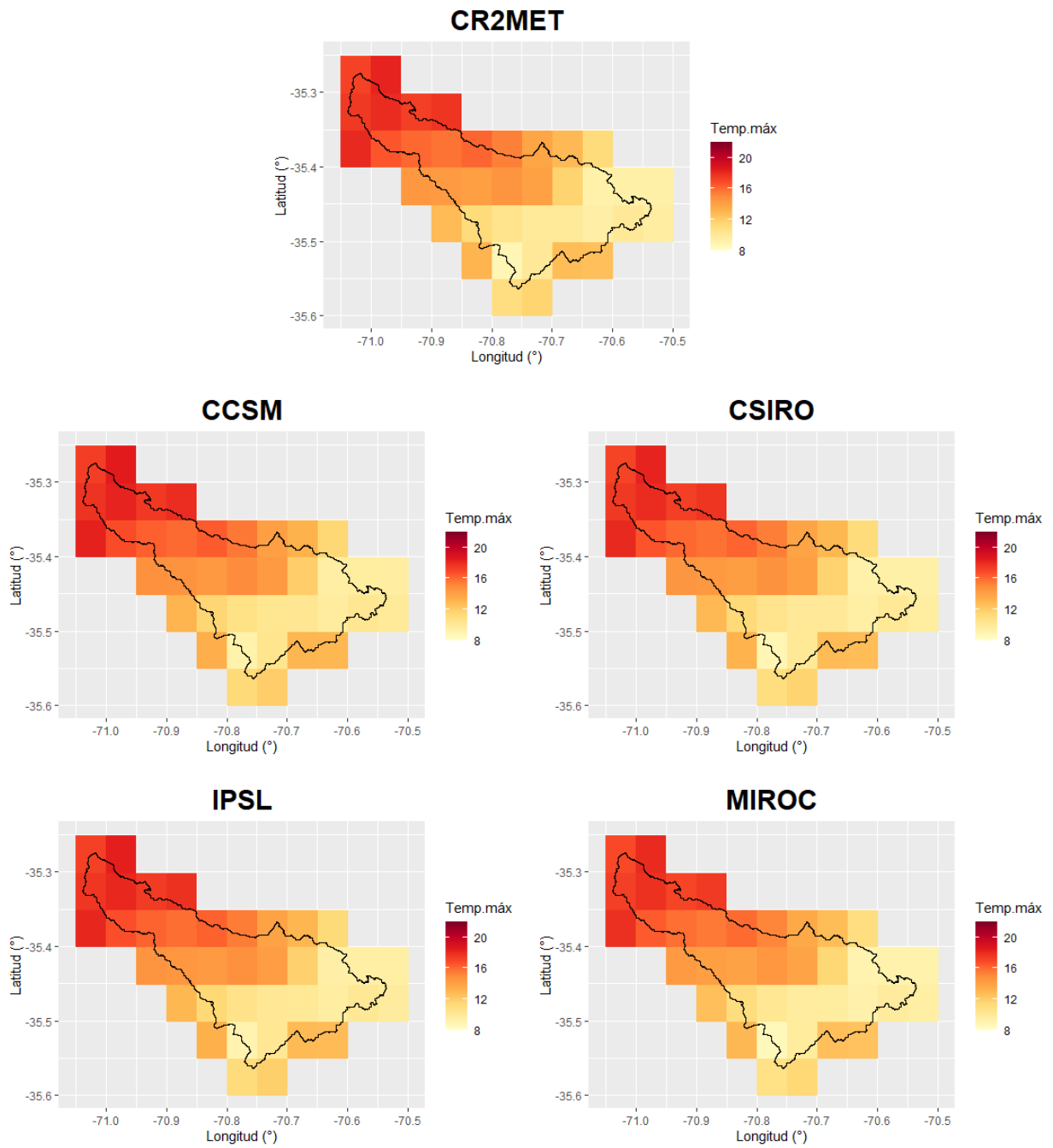


Figura C.6: Mediana de temperatura máxima diaria en cada píxel de la cuenca del Palos en junta con Colorado. Se muestran los resultados obtenidos en CR2MET y en los cuatro GCM's durante el período de calibración.

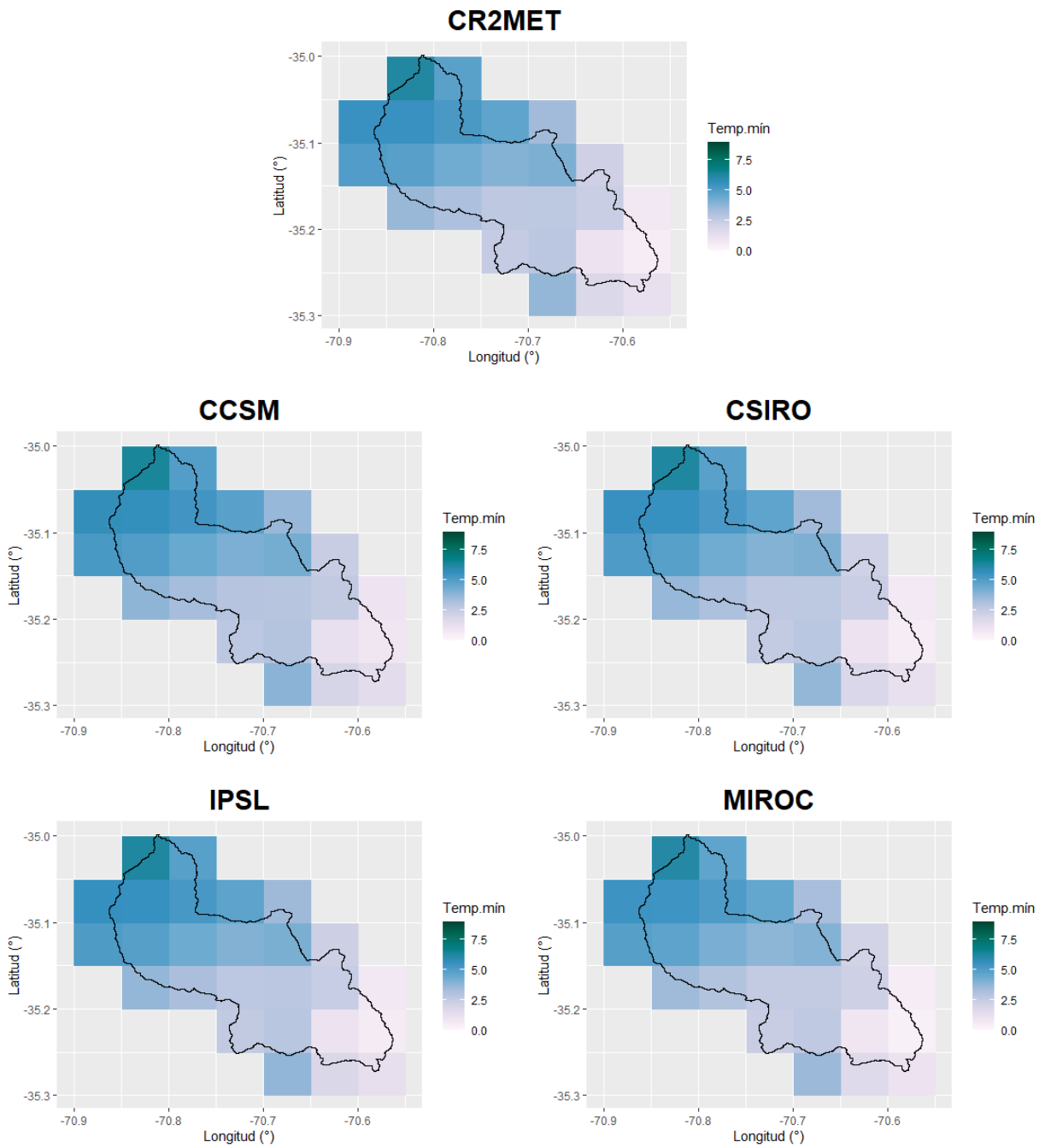


Figura C.7: Mediana de temperatura mínima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Claro en los Queñes. Se muestran los resultados obtenidos en CR2MET y en los cuatro GCM's durante el período de calibración.

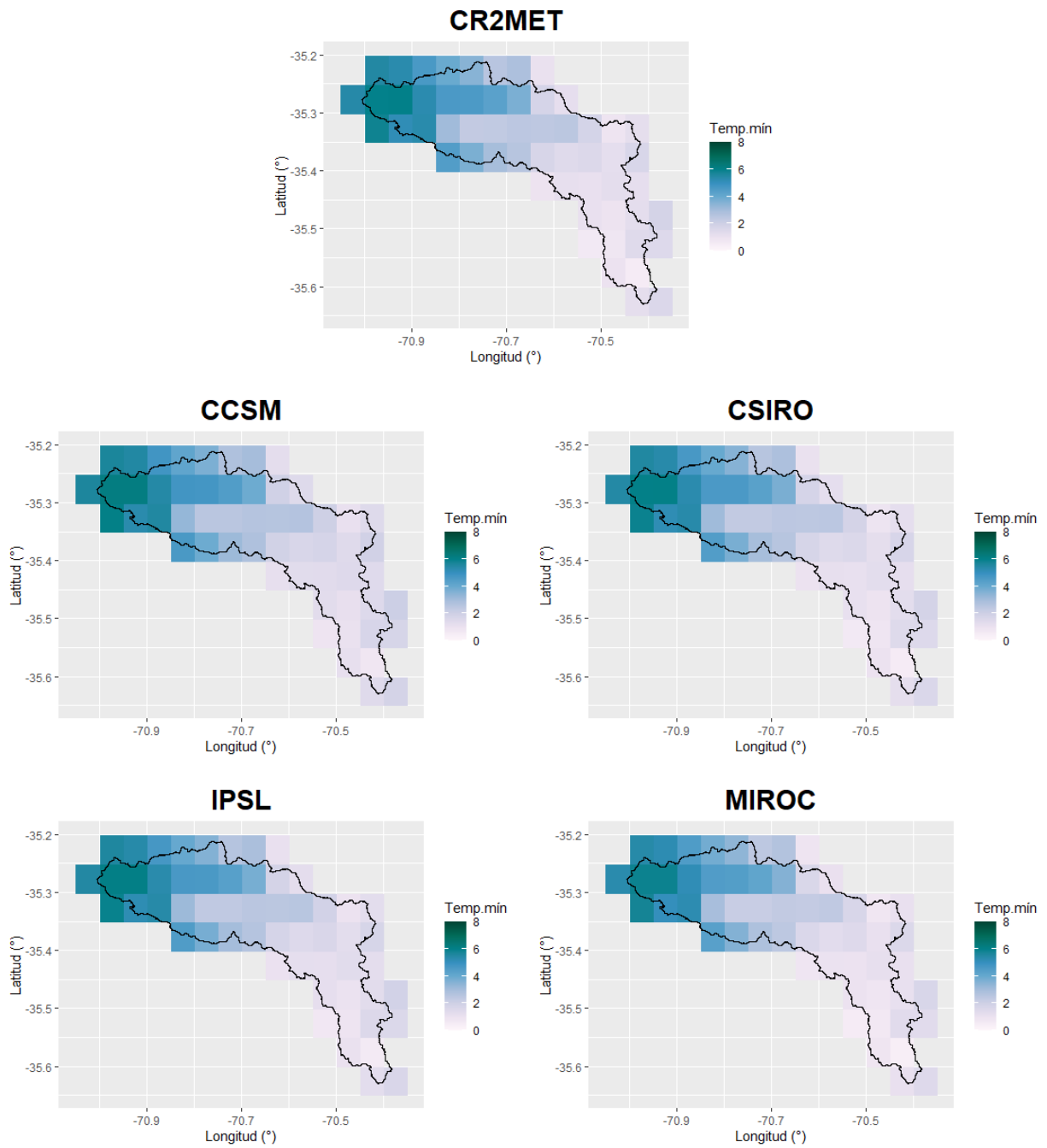


Figura C.8: Mediana de temperatura mínima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Colorado en junta con Palos. Se muestran los resultados obtenidos en CR2MET y en los cuatro GCM's durante el período de calibración.

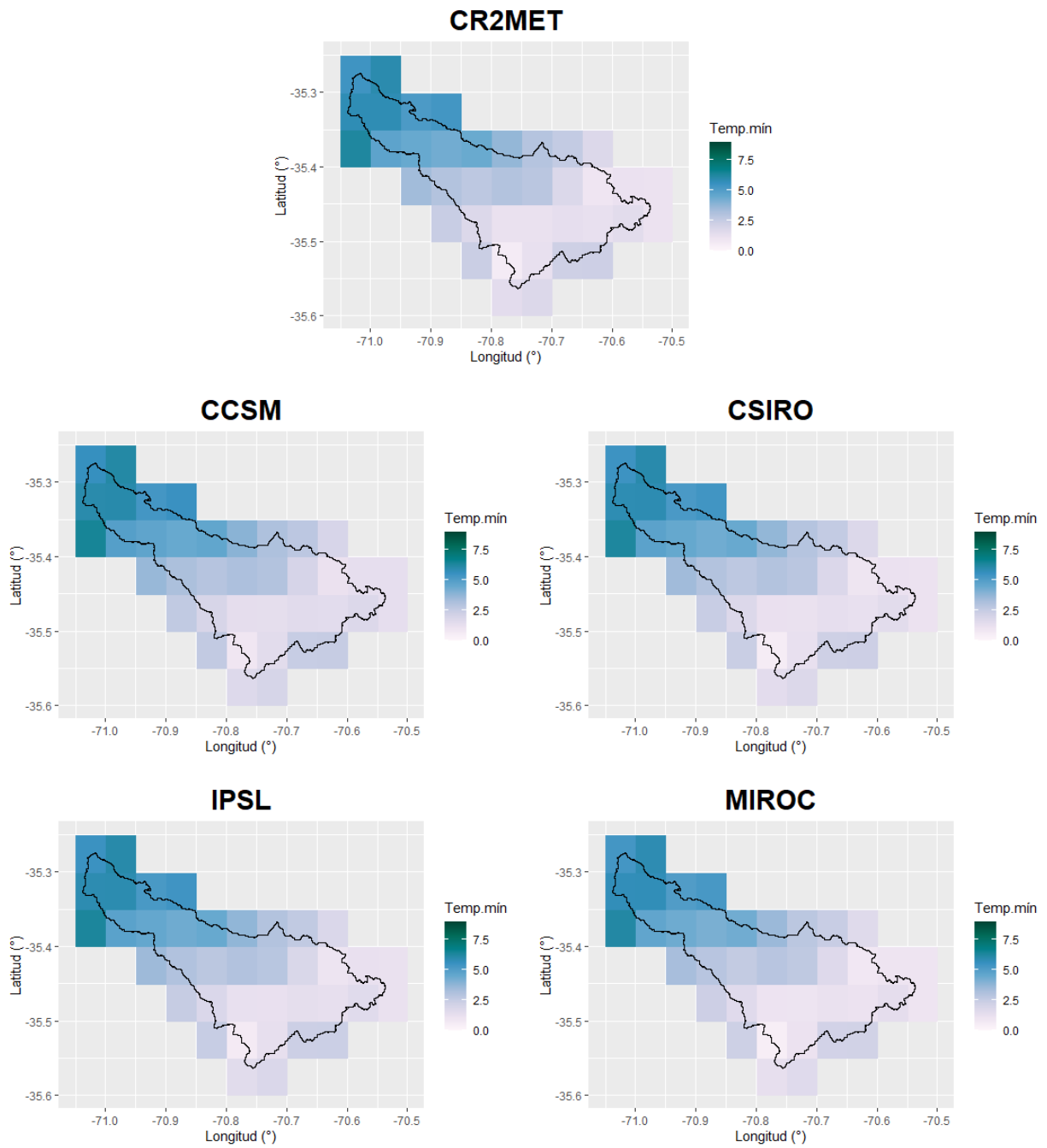


Figura C.9: Mediana de temperatura mínima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Palos en junta con Colorado. Se muestran los resultados obtenidos en CR2MET y en los cuatro GCM's durante el período de calibración.

C.2. Período de Proyección Futura (2030 – 2060).

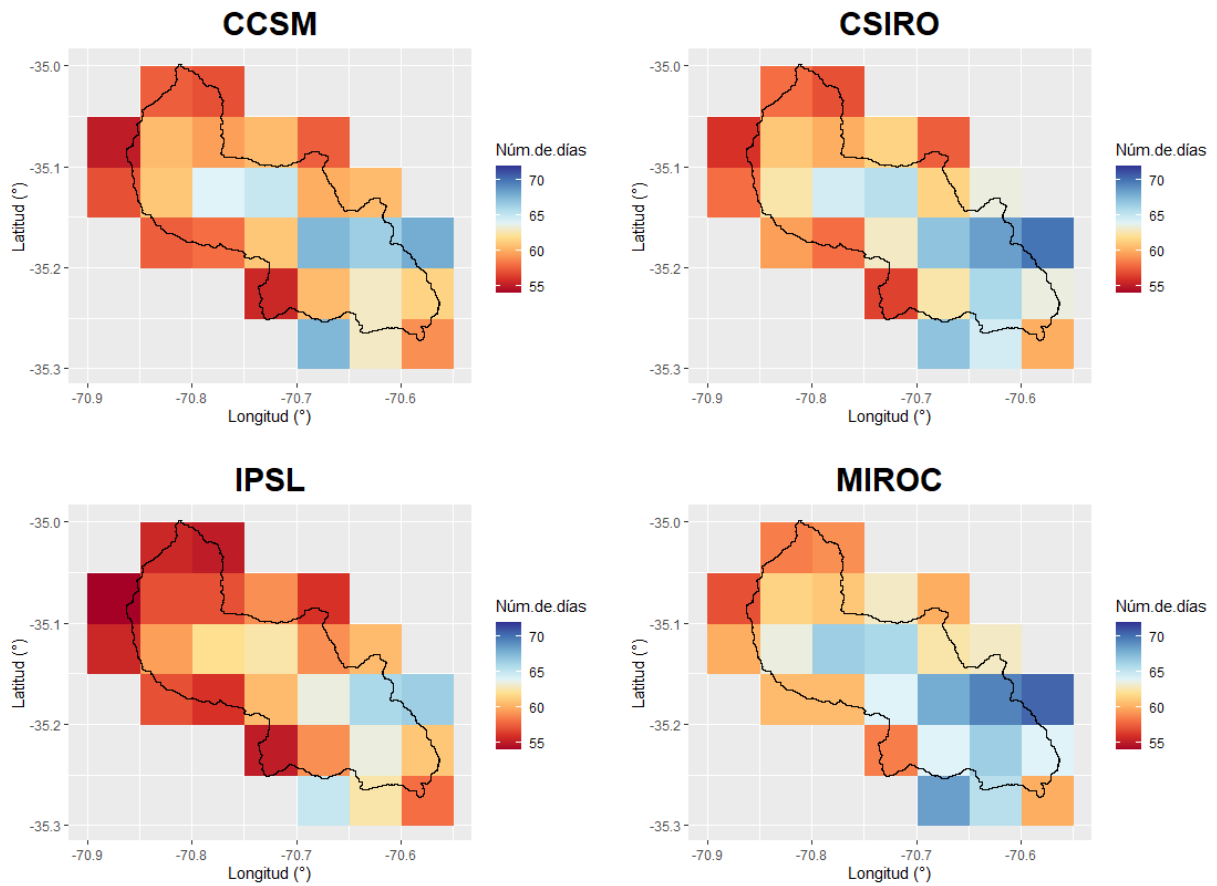


Figura C.10: Mediana del número de días con precipitación mayor a 0,5 mm al año en cada píxel de la cuenca del Río Claro en los Queñes. Se muestran los resultados obtenidos en los cuatro GCM's durante el período de proyección futura, bajo el escenario RCP 4.5.

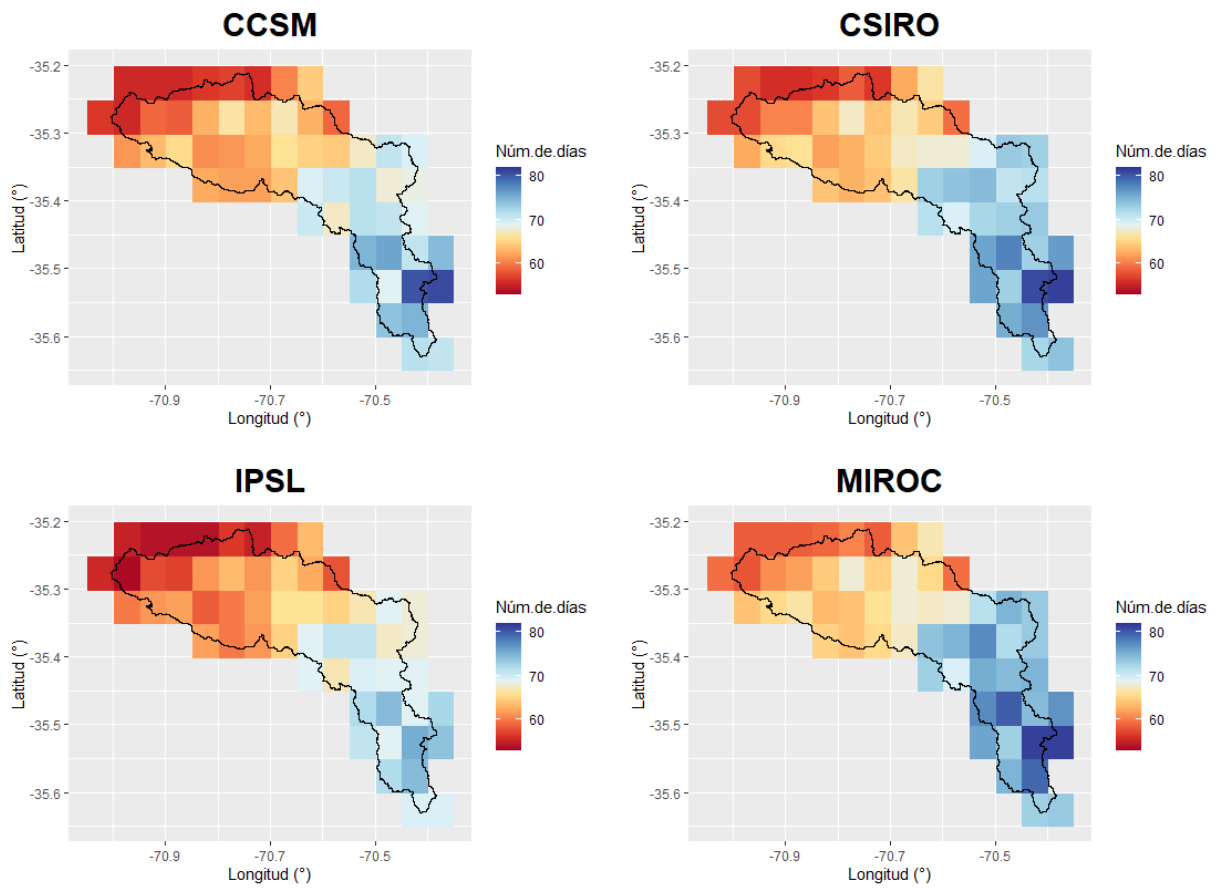


Figura C.11: Mediana del número de días con precipitación mayor a 0,5 mm al año en cada píxel de la cuenca del Río Colorado en junta con Palos. Se muestran los resultados obtenidos en los cuatro GCM's durante el período de proyección futura, bajo el escenario RCP 4.5.

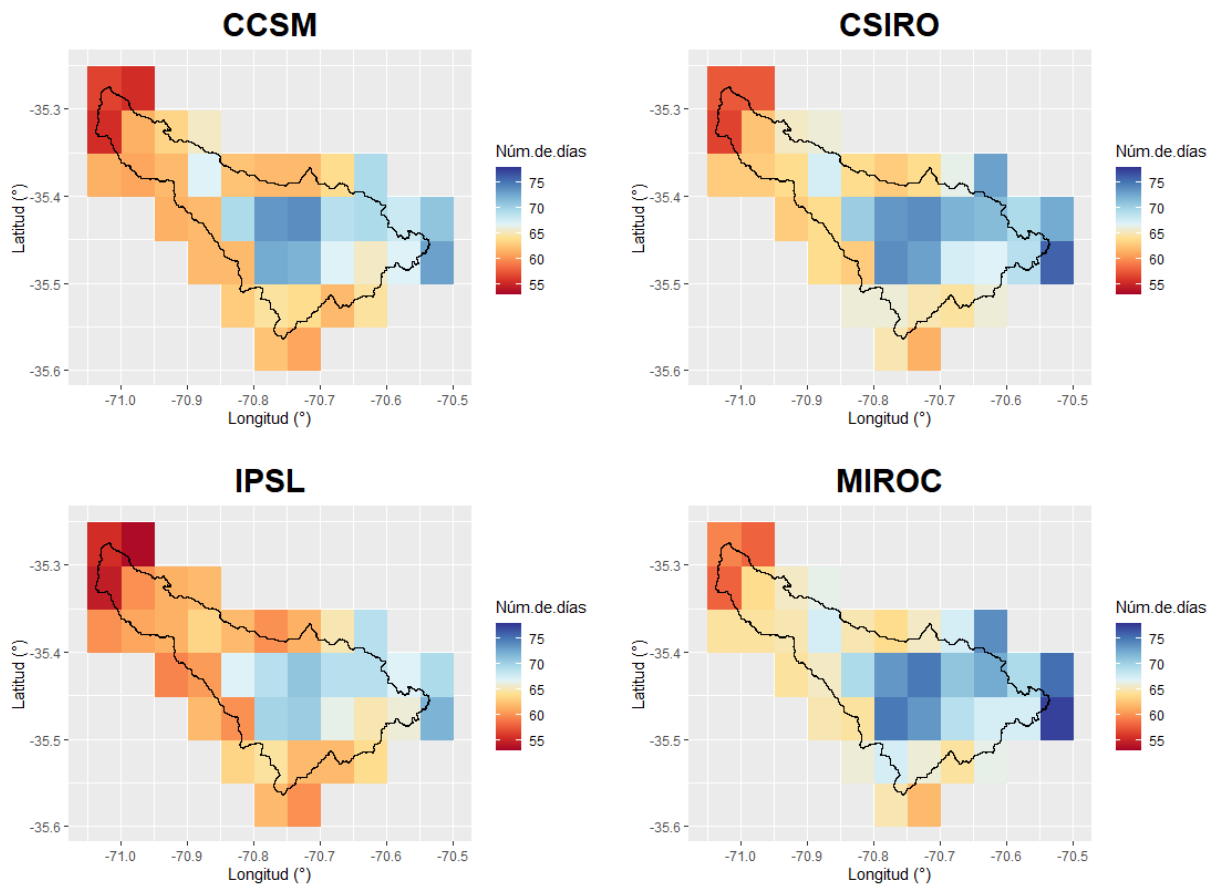


Figura C.12: Mediana del número de días con precipitación mayor a 0,5 mm al año en cada píxel de la cuenca del Río Palos en junta con Colorado. Se muestran los resultados obtenidos en los cuatro GCM's durante el período de proyección futura, bajo el escenario RCP 4.5.

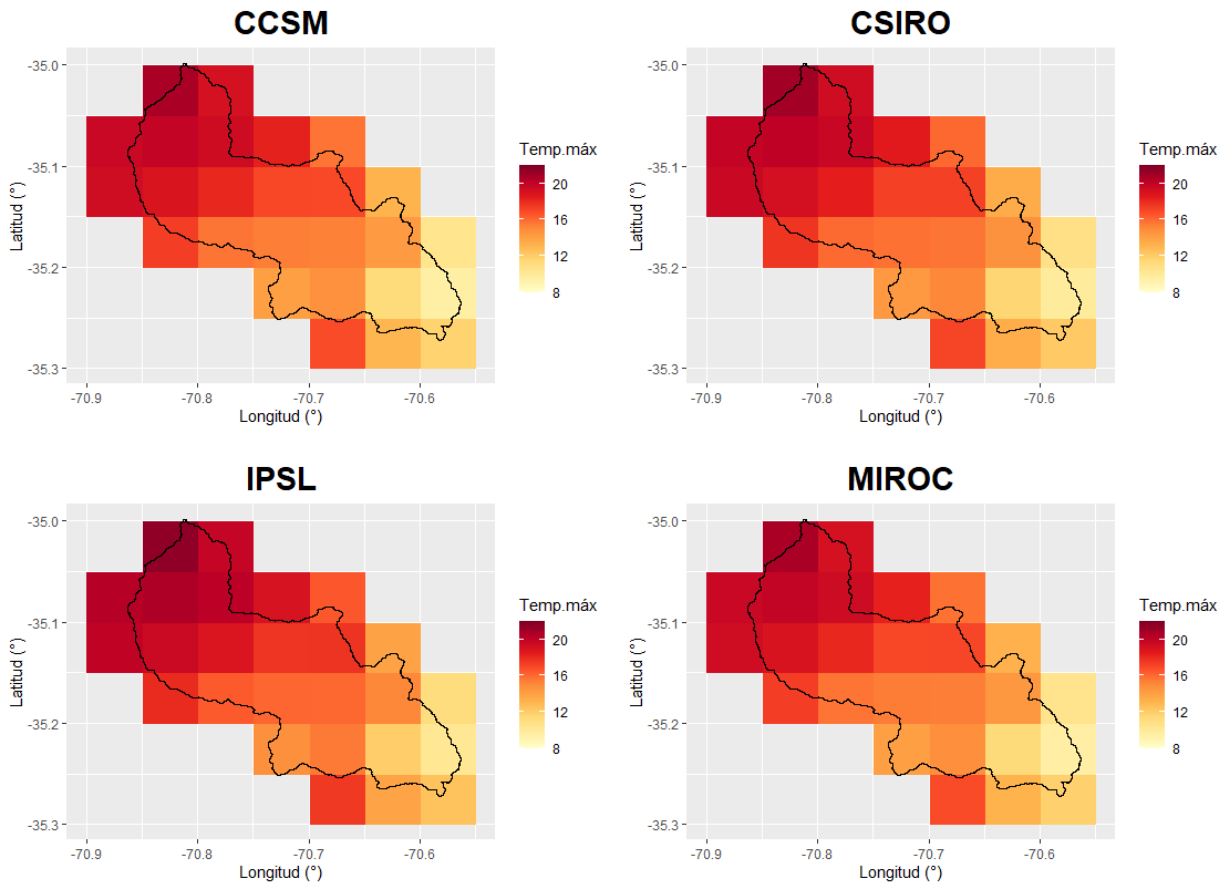


Figura C.13: Mediana de temperatura máxima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Claro en los Queñes. Se muestran los resultados obtenidos en los cuatro GCM's durante el periodo de proyección futura, bajo el escenario RCP 4.5.

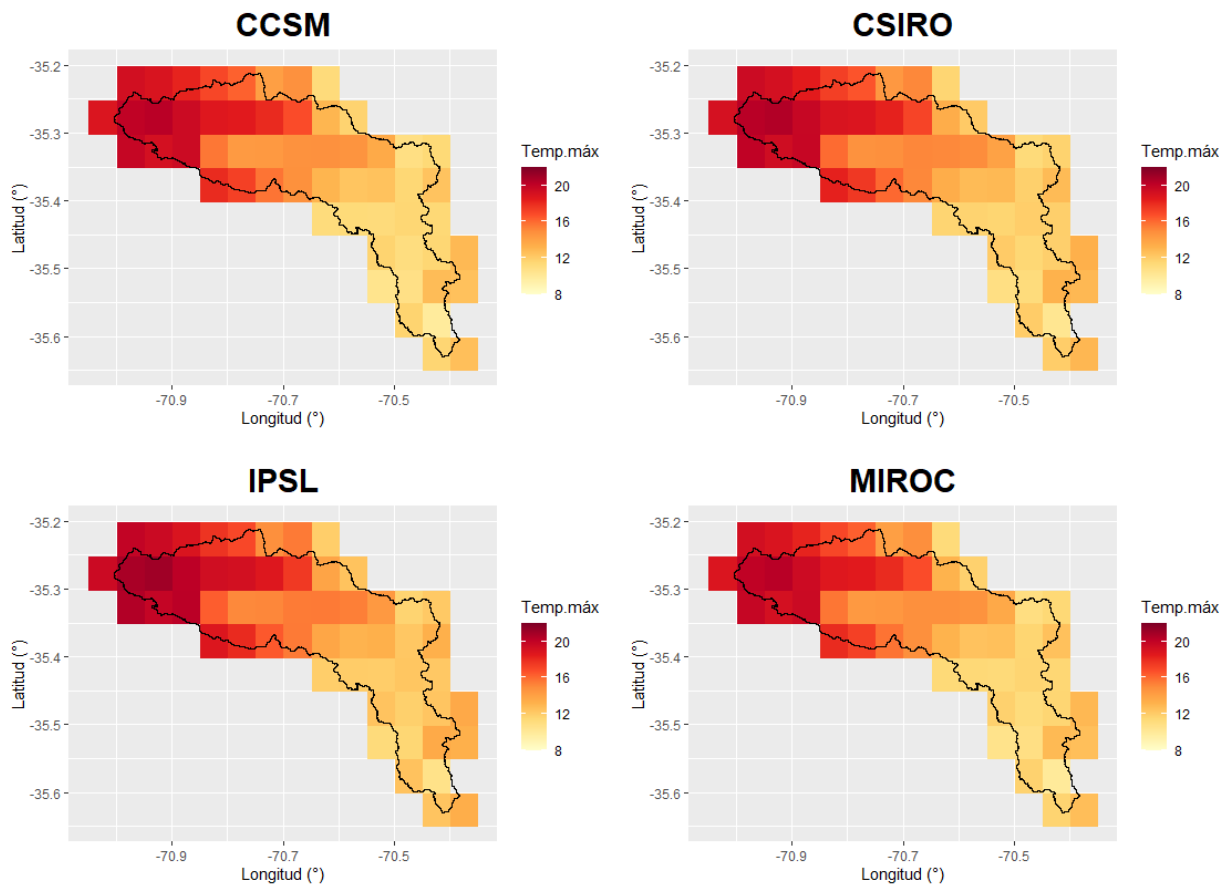


Figura C.14: Mediana de temperatura máxima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Colorado en junta con Palos. Se muestran los resultados obtenidos en los cuatro GCM's durante el periodo de proyección futura, bajo el escenario RCP 4.5.

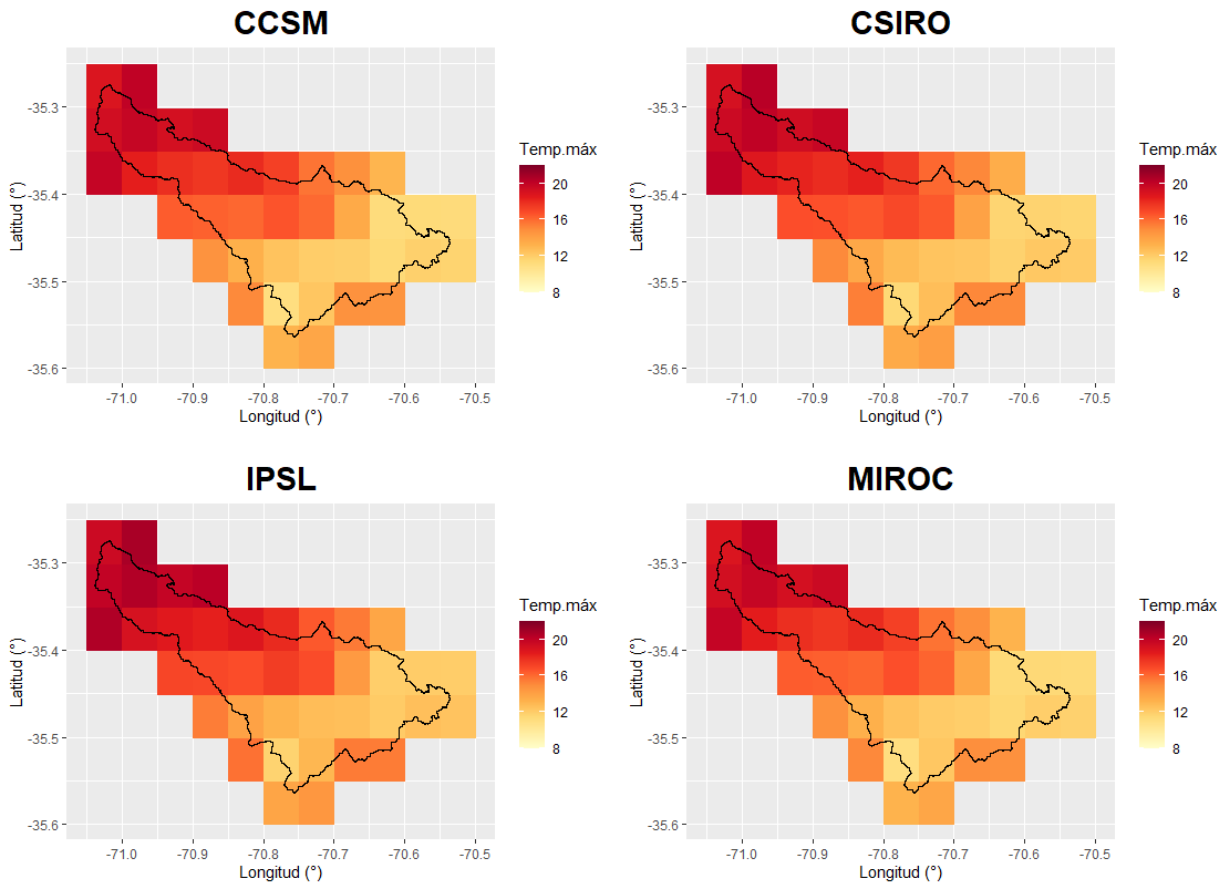


Figura C.15: Mediana de temperatura máxima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Palos en junta con Colorado. Se muestran los resultados obtenidos en los cuatro GCM's durante el período de proyección futura, bajo el escenario RCP 4.5.

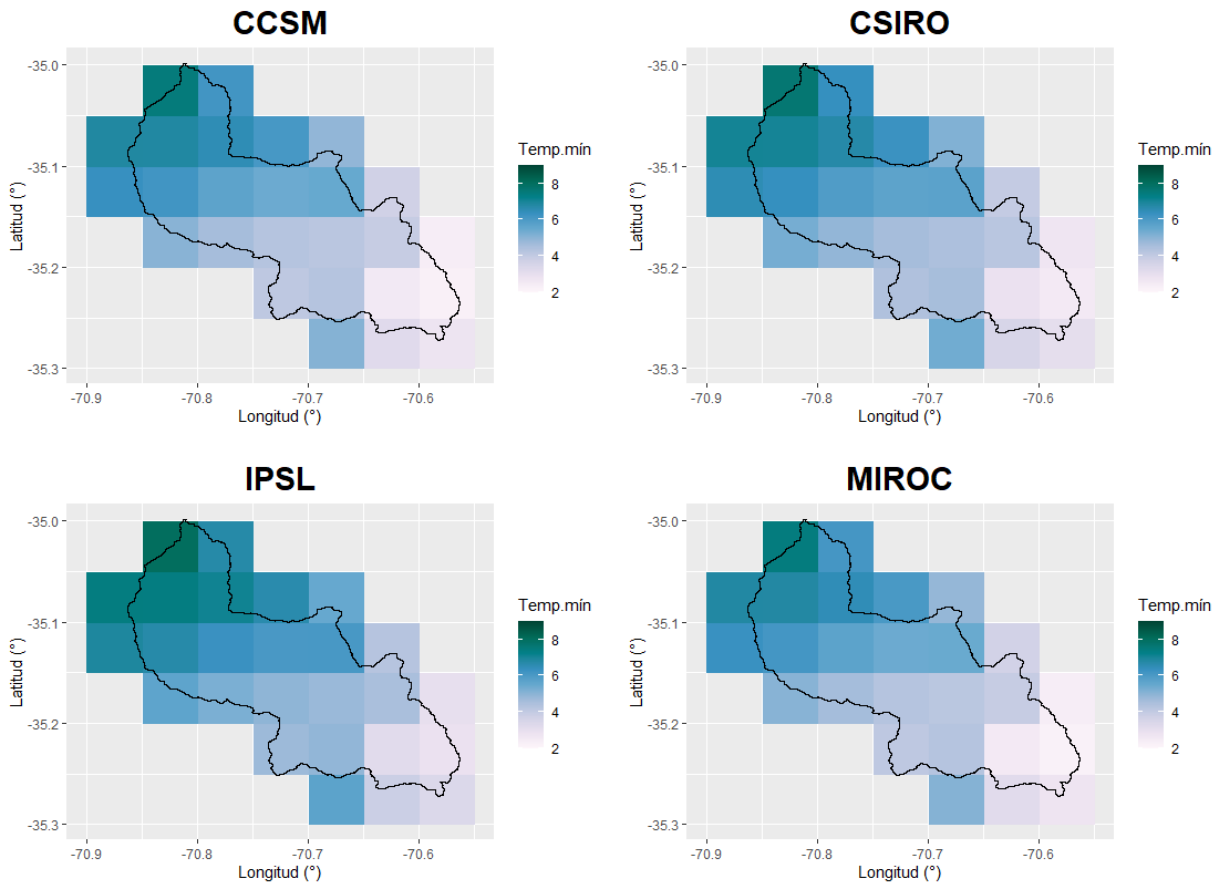


Figura C.16: Mediana de temperatura mínima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Claro en los Queñes. Se muestran los resultados obtenidos en los cuatro GCM's durante el periodo de proyección futura, bajo el escenario RCP 4.5.

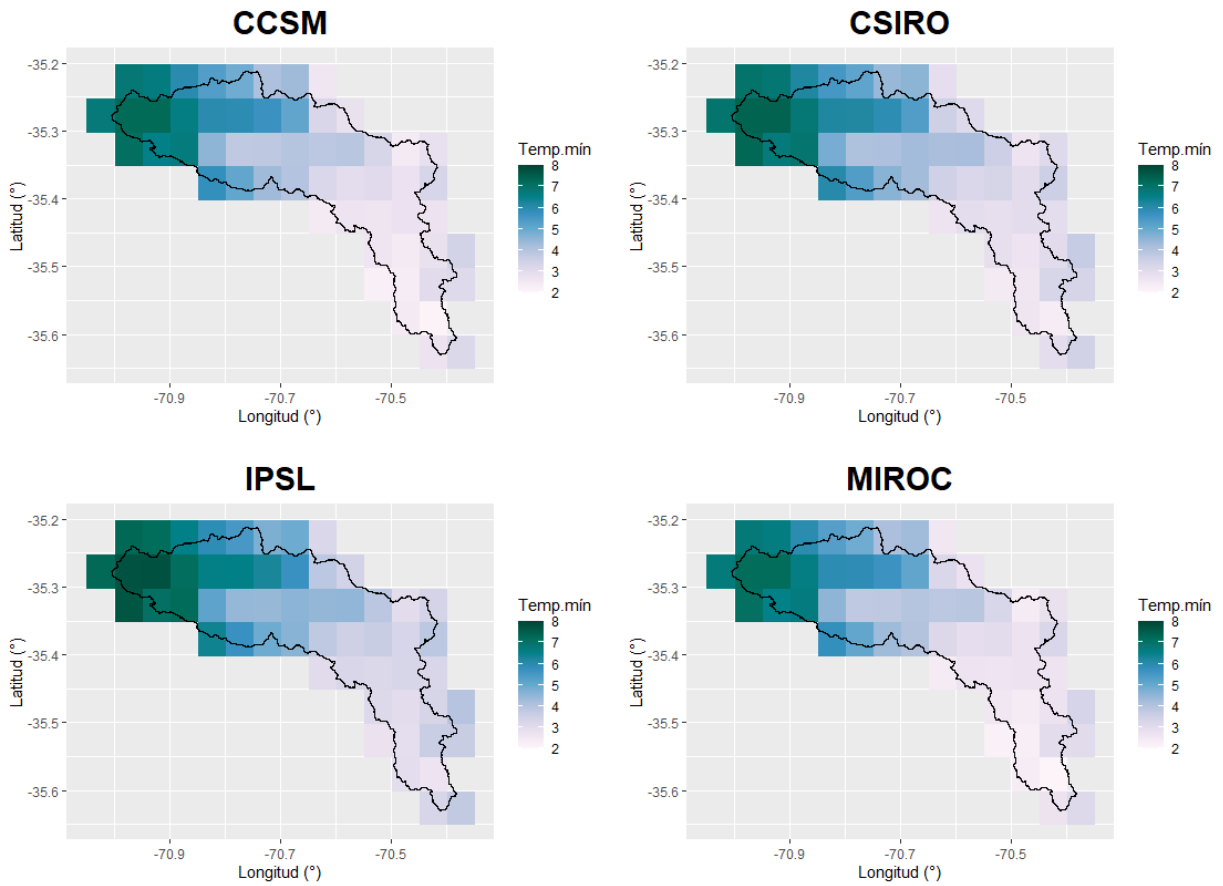


Figura C.17: Mediana de temperatura mínima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Colorado en junta con Palos. Se muestran los resultados obtenidos en los cuatro GCM's durante el período de proyección futura, bajo el escenario RCP 4.5.

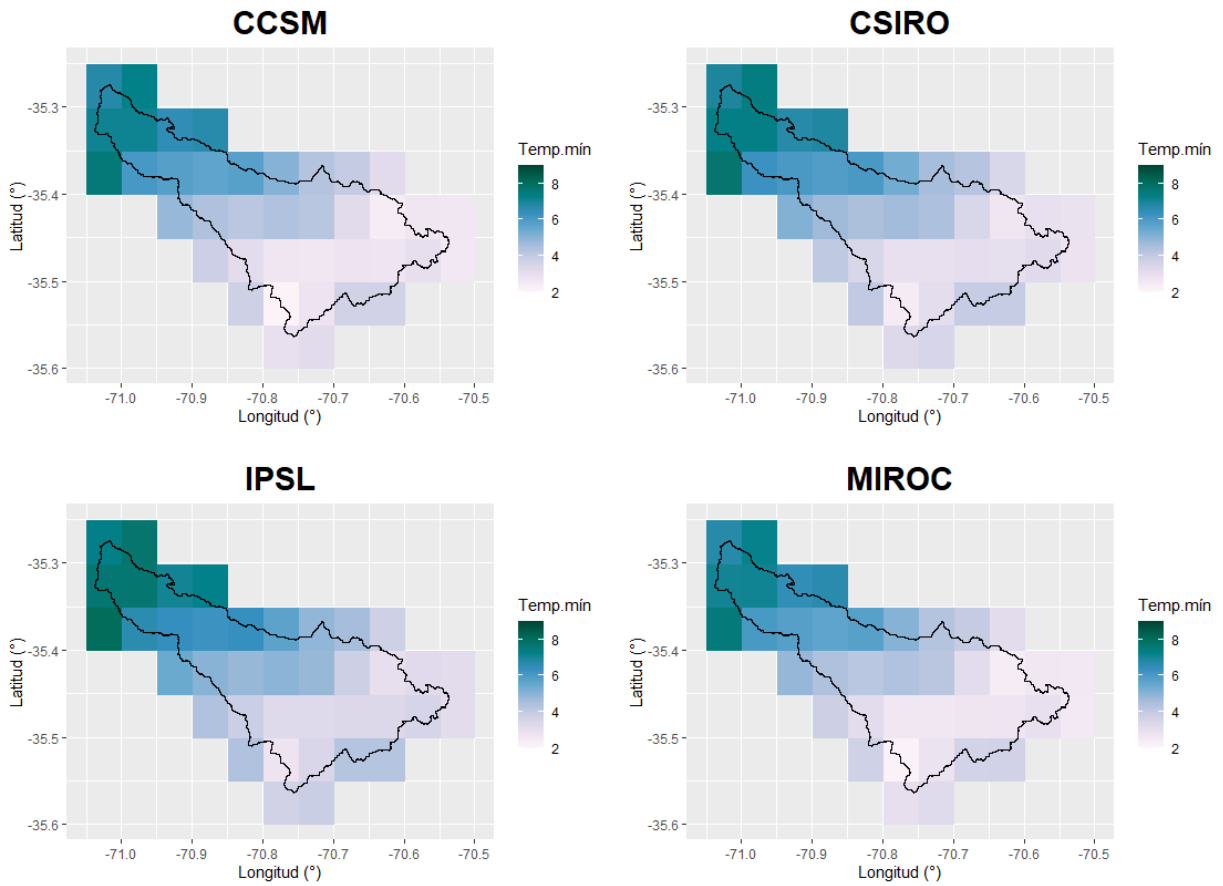


Figura C.18: Mediana de temperatura mínima diaria en cada píxel de la cuenca del Río Palos en junta con Colorado. Se muestran los resultados obtenidos en los cuatro GCM's durante el período de proyección futura, bajo el escenario RCP 4.5.

Anexo D: Resultados de proyecciones futuras de escorrentía

D.1. Curvas de Duración

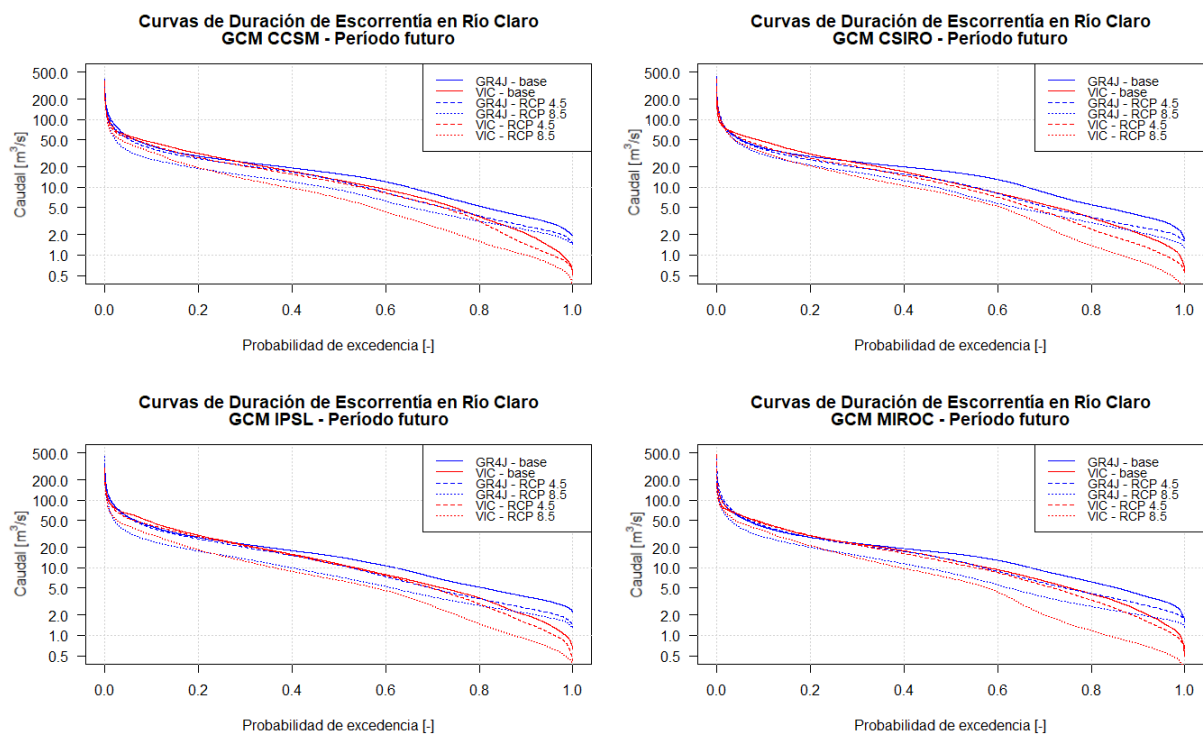


Figura D.1: Curvas de duración de escorrentía asociadas a cada GCM en la cuenca del Río Claro en los Queñes, comparación período base y proyecciones de RCP 4.5 y RCP 8.5.

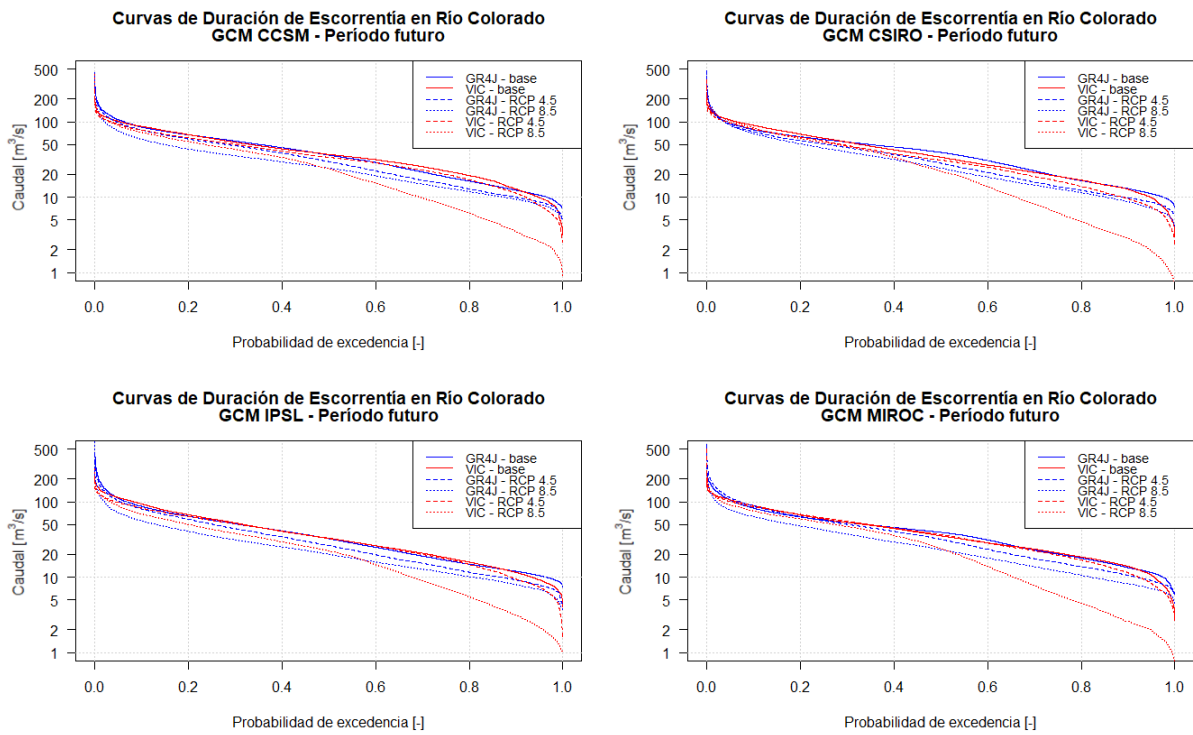


Figura D.2: Curvas de duración de escorrentía asociadas a cada GCM en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos, comparación período base y proyecciones de RCP 4.5 y RCP 8.5.

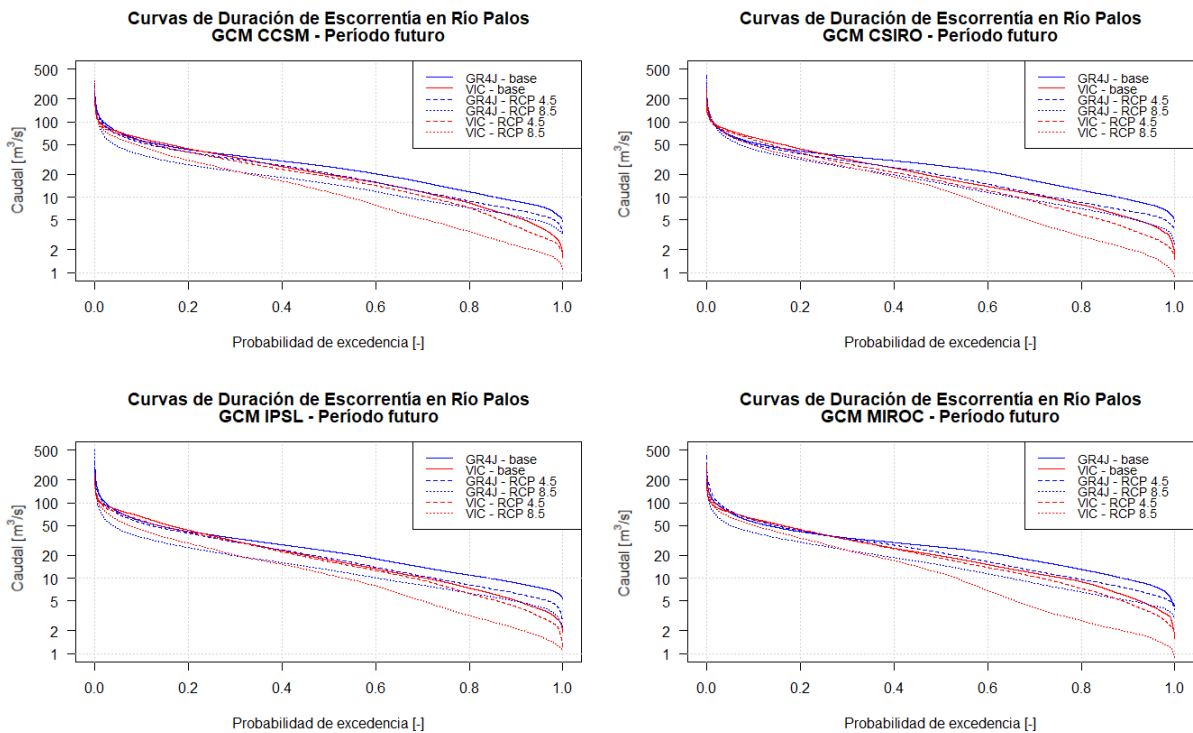


Figura D.3: Curvas de duración de escorrentía asociadas a cada GCM en la cuenca del Río Palos en junta con Colorado, comparación período base y proyecciones de RCP 4.5 y RCP 8.5.

D.2. Curvas de Variación Estacional

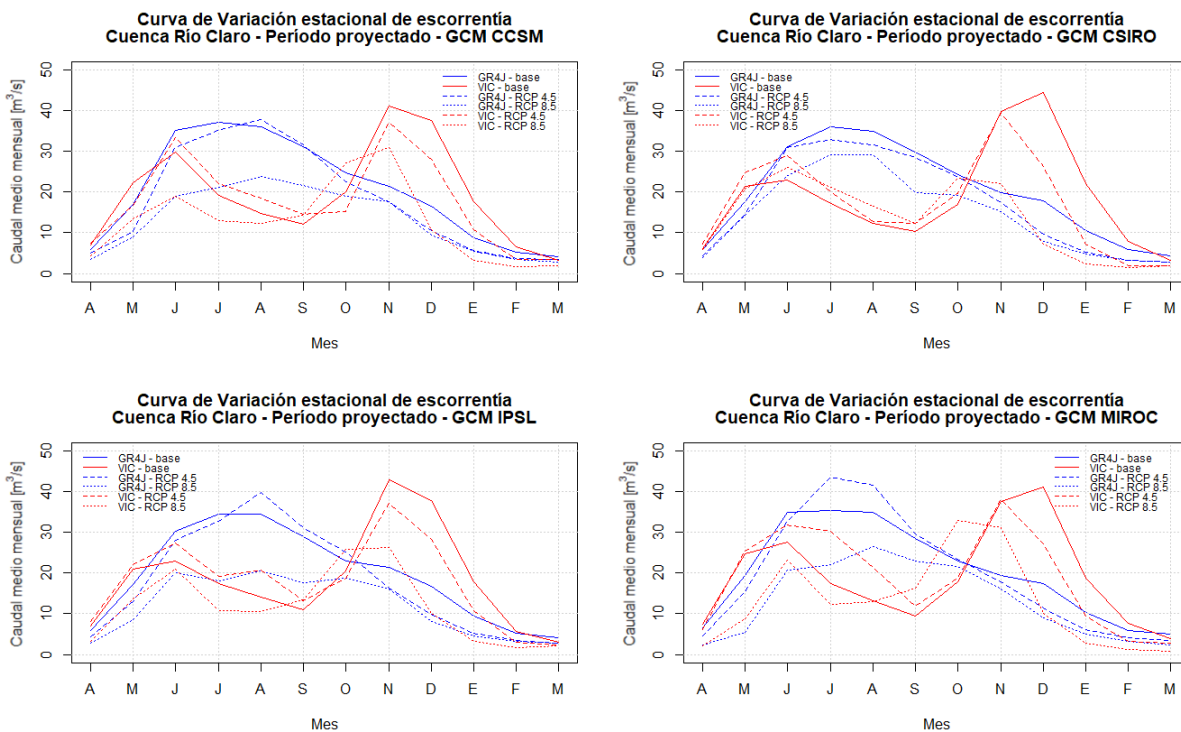


Figura D.4: Curvas de variación estacional de escorrentía asociadas a cada GCM en la cuenca del Río Claro en los Queñes, comparación período base y proyecciones de RCP 4.5 y RCP 8.5.

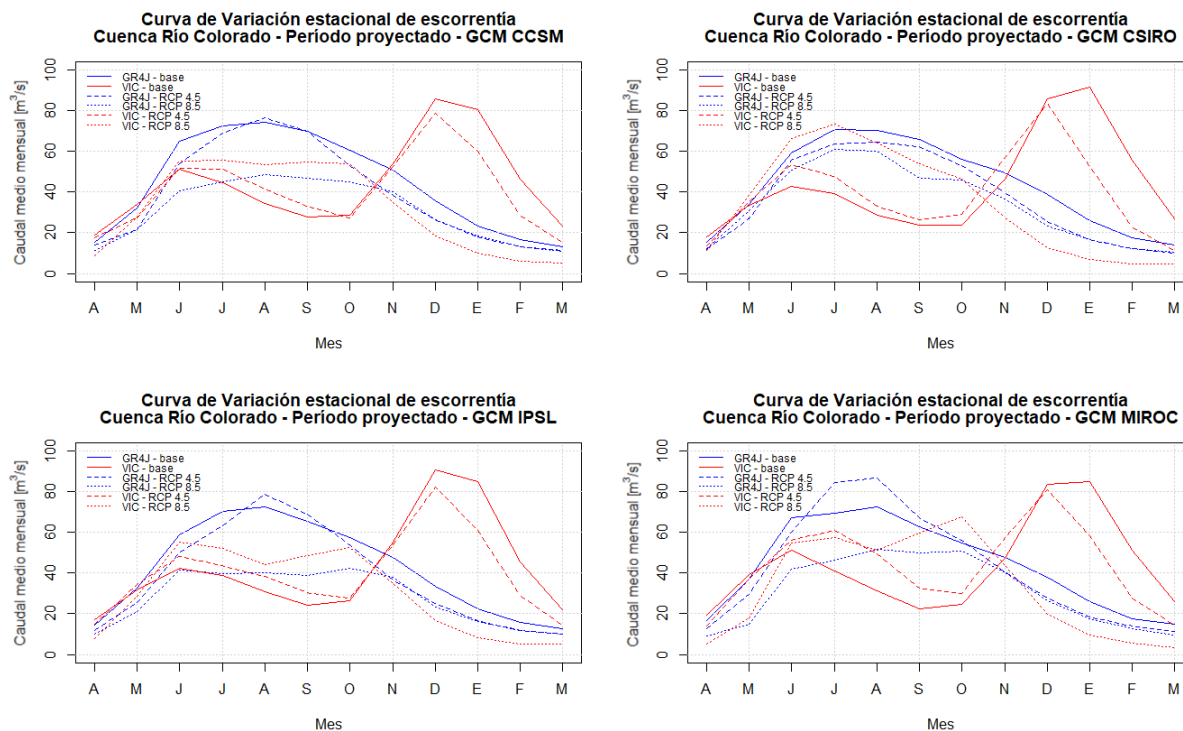


Figura D.5: Curvas de variación estacional de escorrentía asociadas a cada GCM en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos, comparación período base y proyecciones de RCP 4.5 y RCP 8.5.

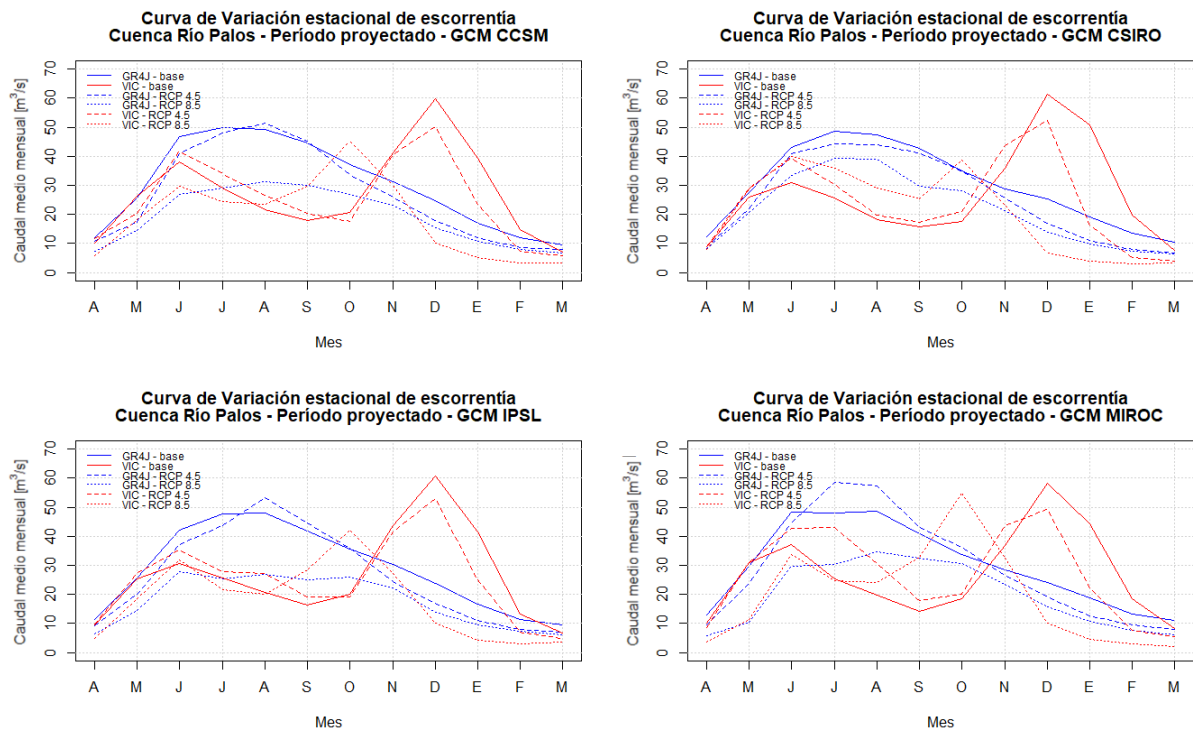


Figura D.6: Curvas de variación estacional de escorrentía asociadas a cada GCM en la cuenca del Río Palos en junta con Colorado, comparación período base y proyecciones de RCP 4.5 y RCP 8.5.

D.3. Series anuales

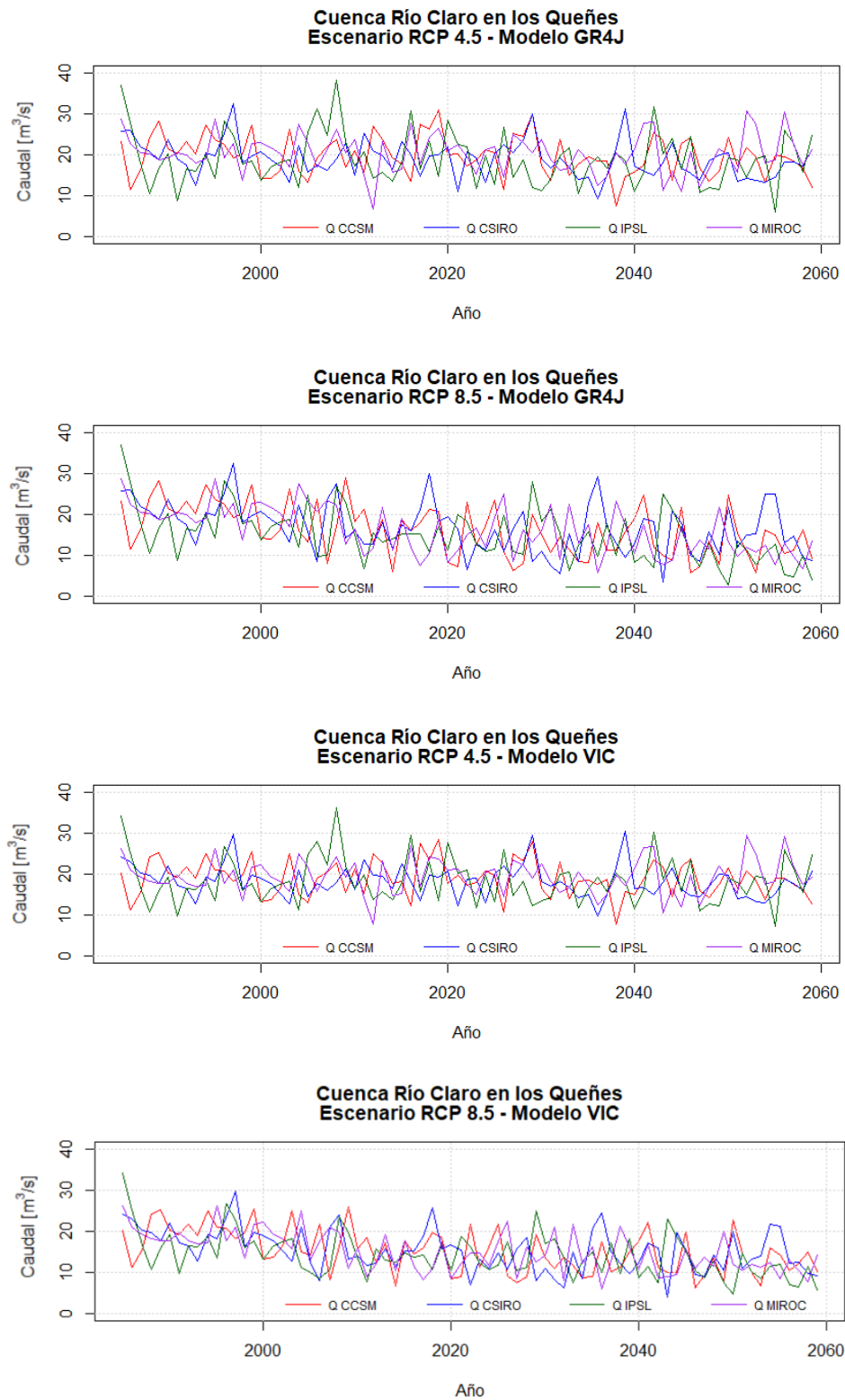


Figura D.7: Series anuales completas de escorrentía asociadas a cada GCM en la cuenca del Río Claro en los Queñes, se muestran resultados por modelo hidrológico y escenario proyectado.

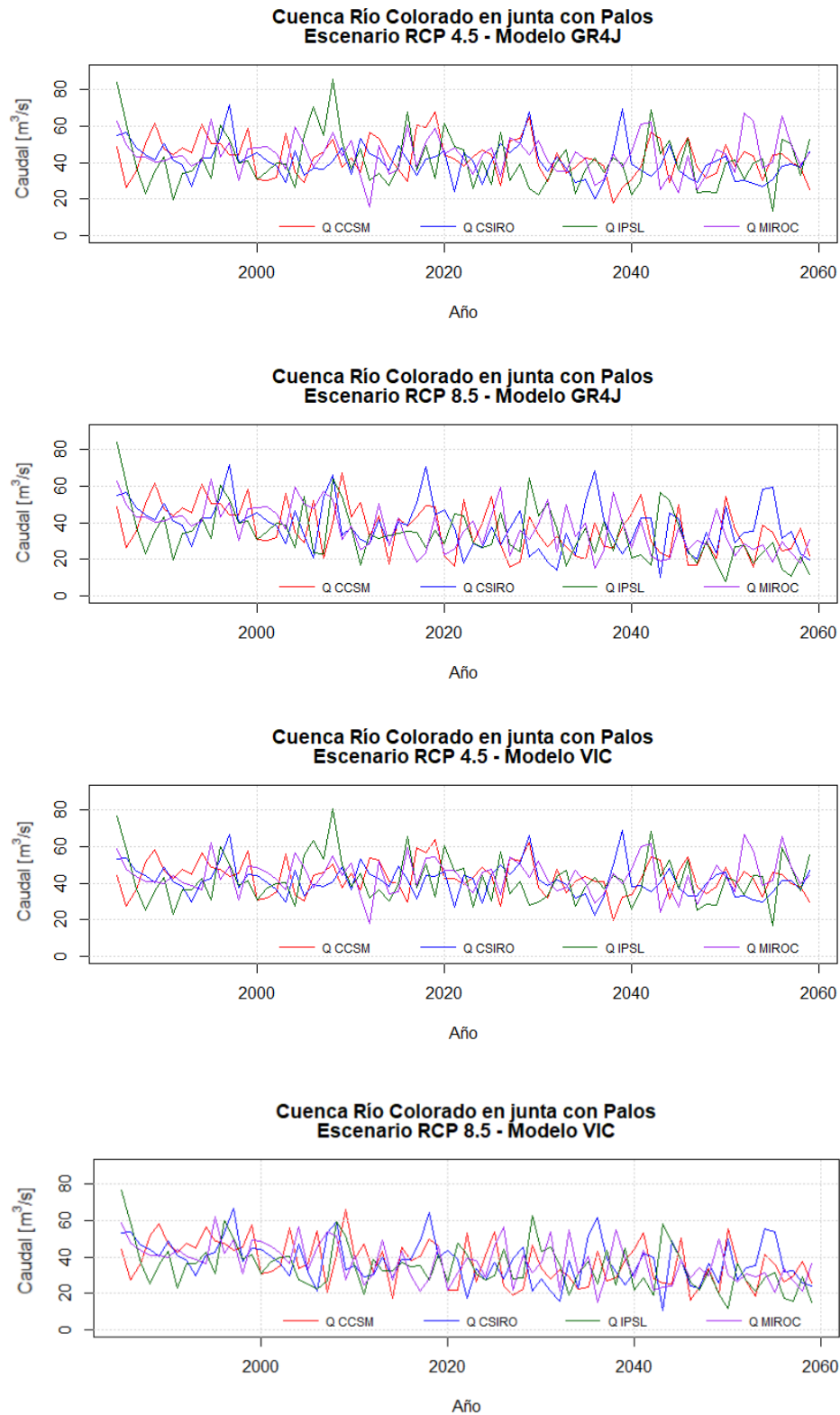


Figura D.8: Series anuales completas de escorrentía asociadas a cada GCM en la cuenca del Río Colorado en junta con Palos, se muestran resultados por modelo hidrológico y escenario proyectado.

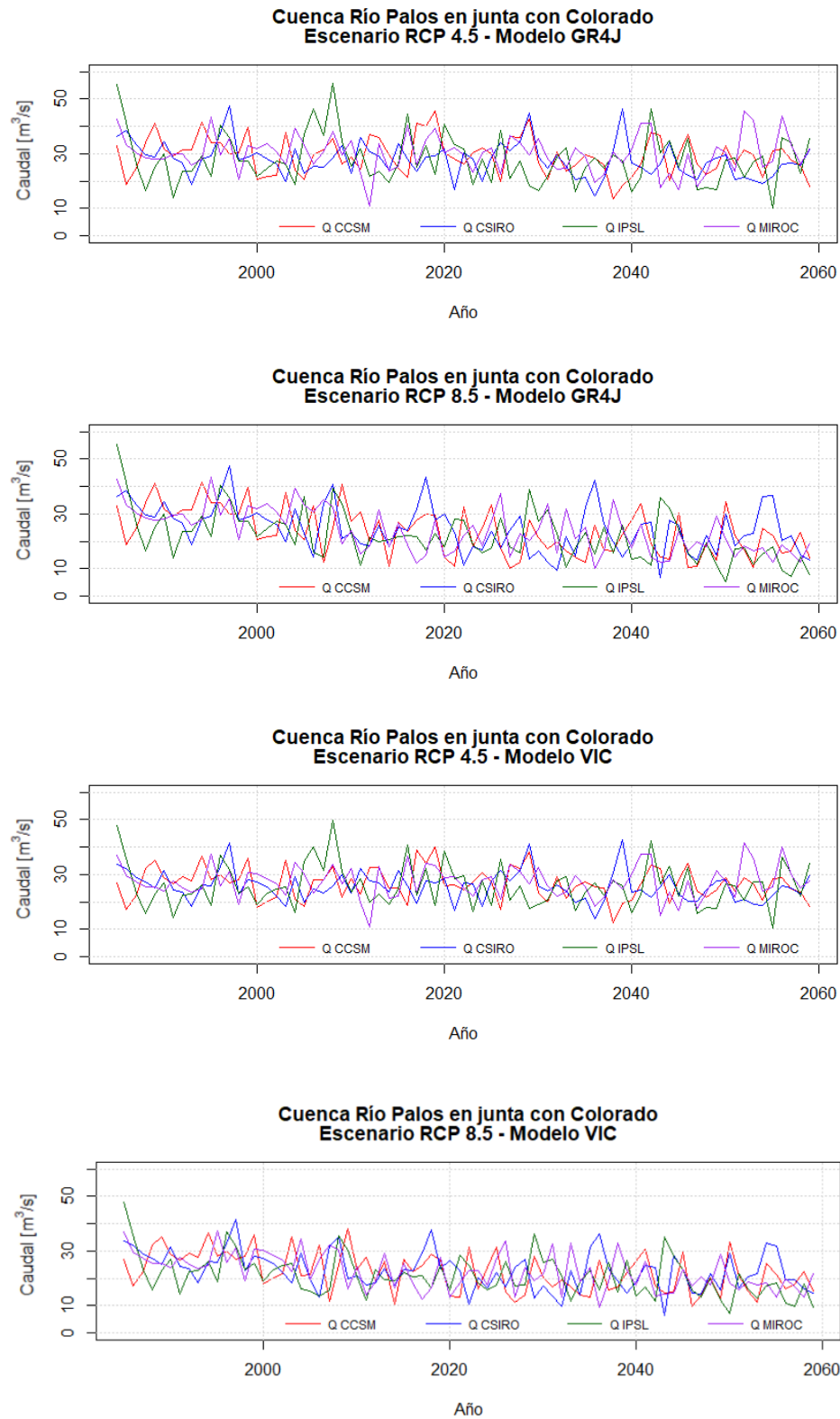


Figura D.9: Series anuales completas de escorrentía asociadas a cada GCM en la cuenca del Río Palos en junta con Colorado, se muestran resultados por modelo hidrológico y escenario proyectado.

Anexo E: Anexo Digital

En el siguiente enlace se encuentra un Anexo Digital en el cual se presentan de forma ordenada los resultados más relevantes obtenidos en la presente memoria de título:

https://drive.google.com/drive/folders/1jFaL0RCmZDQmbsL9HXwPvsOpi_tEmUNQ?usp=sharing

Específicamente, en el Anexo se podrá encontrar los siguientes archivos:

1. Series diarias de los caudales simulados de las tres cuencas estudiadas, clasificadas según escenario climático (RCP 4.5 y RCP 8.5), modelo hidrológico (GR4J y VIC) y GCM.
2. Resultados obtenidos en el proceso de *downscaling* de series meteorológicas utilizando el método Quantile Delta Mapping. Las series obtenidas se presentan de forma desagregada por píxel y también de forma agregada a nivel de cuenca.
3. Archivos que contienen las series diarias de forzantes climáticas (precipitación, velocidad de viento, temperatura media y humedad relativa) utilizadas como datos de entrada en la modelación hidrológica de VIC bajo el escenario RCP 4.5, durante el período 1979 – 2060. Las series se ordenan y clasifican según píxel y según GCM.
4. Archivos que contienen las series de las variables de salida obtenidas como resultado de la modelación hidrológica en VIC bajo el escenario RCP 4.5 (escorrentía, precipitación, SWE, humedad del suelo, entre otros). Las series se ordenan y clasifican según píxel y GCM.