



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

**PROYECCIONES DE EVENTOS EXTREMOS BAJO NUEVOS ESCENARIOS
DE CAMBIO CLIMÁTICO CMIP6 EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE PARA
EL PERÍODO 2025-2085.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIEGO ALEJANDRO PINTO GARAY

PROFESOR GUÍA:
MIGUEL ÁNGEL LAGOS ZÚÑIGA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PABLO ANDRÉS MENDOZA ZÚÑIGA
HAYDEE XIMENA VARGAS MESA

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: DIEGO ALEJANDRO PINTO GARAY
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: MIGUEL ÁNGEL LAGOS ZÚÑIGA

PROYECCIONES DE EVENTOS EXTREMOS BAJO NUEVOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO CMIP6 EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE PARA EL PERÍODO 2025-2085.

En las últimas décadas, el clima ha experimentado importantes variaciones debido al cambio climático y a la variabilidad natural del sistema. En Chile central, se han observado disminuciones de 7% de las precipitaciones y aumentos de 0,25°C por década en los períodos 1980-2010 y 1979-2006 respectivamente, incluyendo eventos extremos como la megasequía que se desarrolla desde el año 2010 a la actualidad. Según los últimos estudios, se espera que estas tendencias se mantengan, proyectándose además un alza en la frecuencia de eventos meteorológicos extremos. En este contexto, surge la necesidad de estudiar y proyectar la intensidad y ocurrencia de eventos meteorológicos e hidrológicos extremos en Chile central.

En el presente trabajo, se analizan proyecciones de eventos extremos de precipitación y sus temperaturas asociadas, en los períodos de futuro cercano (2025-2055) y futuro lejano (2055-2085), en tres cuencas nivales de Chile central: río Choapa en Cuncumén, río Aconcagua en Chacabuquito y río Maipo en el Manzano. Para esto, se utilizan seis modelos de circulación general bajo el escenario SSP5-8.5 del proyecto CMIP6, escalados estadísticamente al producto meteorológico grillado CR2Met 2.0. Se realiza un análisis de frecuencia para las precipitaciones máximas diarias proyectadas, y un análisis en base al índice SPI para las sequías meteorológicas. Por otra parte, se estudian las consecuencias hidrológicas de los eventos extremos meteorológicos, en cuanto a crecidas y sequías, mediante la implementación del modelo hidrológico HBV en las tres cuencas de estudio. Para las crecidas, se realiza un análisis de frecuencia de caudales máximos, mientras que para las sequías, se estudian caudales medios diarios que son excedidos el 85% y 95% del tiempo.

Las proyecciones realizadas muestran en promedio, aumentos de temperatura por sobre los 3°C, y disminuciones de precipitación cercanas al 10% en las tres cuencas. En particular, se proyecta un aumento de hasta un 20% en la magnitud de la precipitación máxima diaria anual para períodos de retorno de 50 años hacia finales de siglo. El análisis del índice de sequías SPI no presenta tendencias claras en la duración, magnitud y frecuencia de eventos de sequías. Por otro lado, los caudales medios diarios máximos anuales muestran aumentos de hasta un 191% para el período de lluvias y disminuciones de hasta 66% para el período de deshielo, atribuibles a la disminución de acumulación de nieve y cambios en la estacionalidad del caudal. Finalmente, se esperan aumentos de entre 25 y 150 días secos y días consecutivos de sequía al año con respecto a los caudales medios diarios observados en el período histórico.

En conclusión, se proyectan cambios importantes en la magnitud y frecuencia de eventos extremos meteorológicos e hidrológicos. La temperatura asociada a eventos extremos de precipitación juega un rol fundamental, afectando los almacenamientos de nieve, y provocando así aumentos en crecidas hidrológicas en los meses de lluvias.

Tabla de Contenido

1.	Introducción	1
1.1.	Motivación	1
1.2.	Objetivos	1
2.	Revisión de antecedentes	3
2.1.	Cambio climático	3
2.1.1.	Antecedentes generales	3
2.1.2.	Cambio climático en Chile	6
2.2.	Estudios de eventos extremos en Chile	6
2.3.	Modelación hidrológica	9
3.	Zona de estudio	12
3.1.	Antecedentes generales	12
3.2.	Información disponible	13
3.2.1.	Información meteorológica	13
3.2.2.	Información fluviométrica	14
4.	Metodología	15
4.1.	Forzantes meteorológicas	15
4.1.1.	Período histórico	16
4.1.2.	Forzantes meteorológicas futuras	17
4.2.	Modelo hidrológico y calibración	18
4.3.	Eventos meteorológicos extremos	20
4.3.1.	Precipitaciones máximas	20
4.3.2.	Sequías	20
4.4.	Eventos extremos hidrológicos	21
4.4.1.	Crecidas	21
4.4.2.	Sequías	21
5.	Resultados	23
5.1.	Forzantes meteorológicas	23
5.1.1.	Periodo histórico	23
5.1.2.	Período futuro	25
5.2.	Calibración y validación del modelo hidrológico	26
5.2.1.	Cuenca del río Choapa en Cuncumén	26
5.2.2.	Cuenca del río Aconcagua en Chacabuquito	28
5.2.3.	Cuenca del río Maipo en el Manzano	29
5.3.	Eventos meteorológicos extremos	30
5.3.1.	Precipitaciones máximas	30
5.3.2.	Sequía meteorológica	33
5.4.	Eventos extremos hidrológicos	35
5.4.1.	Crecidas	35

5.4.2.	Sequías hidrológicas	37
6.	Discusiones	40
6.1.	Forzantes meteorológicas	40
6.1.1.	Producto grillado de precipitaciones	40
6.1.2.	Proyecciones de precipitación y temperatura	40
6.2.	Modelación hidrológica	41
6.3.	Análisis de eventos extremos	42
6.3.1.	Eventos extremos meteorológicos	42
6.3.2.	Crecidas	43
6.3.3.	Sequías hidrológicas	45
7.	Conclusiones	47
8.	Bibliografía	49
	ANEXOS	55
A. Corrección del CR2Met		56
B. Evaluación de los GCMs en el período histórico		58
C. Temperatura y precipitación proyectadas		61
C.1.	Río Choapa en Cuncumén	61
C.2.	Río Aconcagua en Chacabuquito	62
C.3.	Río Maipo en El Manzano	63
D. Calibración del modelo hidrológico		65
E. Caudales proyectados		67
E.1.	Caudales medios anuales proyectados	67
E.2.	Caudales máximos anuales proyectados	68
E.3.	Caudales anuales con probabilidad de excedencia de 95 % proyectados	70
F. Análisis de frecuencia de la precipitación máxima anual		72
G. Frecuencia de índice SPI para los períodos históricos, futuro cercano y lejano		76
H. Series de SPI		78
H.1.	Cuenca río Choapa en Cuncumén	78
H.1.1.	SPI 12	78
H.2.	Cuenca río Aconcagua en Chacabuquito	79
H.2.1.	SPI 12	80
H.3.	Cuenca río Maipo en el Manzano	81
H.3.1.	SPI 12	81
I. Análisis de frecuencia de caudal medio diario máximo anual		83

Índice de Tablas

2.1.	Descripción de parámetros del modelo hidrológico HBV.	11
3.1.	Características generales de las cuencas de estudio	13
3.2.	Medias anuales de variables hidro-meteorológicas para las cuencas en estudio	13
3.3.	Estaciones fluviométricas utilizadas en el estudio.	14
5.1.	Propiedades de los 6 GCMs escogidos.	25
5.2.	Variación de precipitaciones y temperatura en los periodos futuro cercano y futuro lejano, en relación al periodo histórico, en las tres cuencas de estudio.	26
5.3.	Variación porcentual entre las precipitaciones asociadas a cada periodo de retorno entre los periodos futuros y el periodo histórico, para cada cuenca de estudio	33
5.4.	Variación porcentual de los caudales asociados a cada período de retorno entre el periodo histórico y los periodos futuros, en el período de lluvias (abril-septiembre), para las tres cuencas de estudio.	37
5.5.	Variación porcentual de los caudales asociados a cada periodo de retorno entre el periodo histórico y los periodos futuros, en el período de deshielos (octubre-marzo), para las tres cuencas de estudio.	37
B.1.	RMSE anual (suma del RMSE por mes) de las precipitaciones estacionales normalizadas por la precipitación media anual de cada GCM con respecto al CR2Met corregido. En verde, los GCMs escogidos.	60
D.1.	Parámetros calibrados por cuenca y el rango utilizado.	65
D.2.	Métricas de diagnóstico del modelo hidrológico en las tres cuencas de estudio, para los periodos de calibración y de validación.	65
F.1.	Análisis de frecuencia de la precipitación máxima anual en el río Choapa en Cuncumén	73
F.2.	Análisis de frecuencia de la precipitación máxima anual en el río Aconcagua en Chacabuquito	74
F.3.	Análisis de frecuencia de la precipitación máxima anual en el río Maipo en el Manzano	75
I.1.	Análisis de frecuencia de caudal medio diario máximo anual en el río Choapa en Cuncumén, periodo nival.	84
I.2.	Análisis de frecuencia de caudal medio diario máximo anual en el río Choapa en Cuncumén, periodo pluvial.	85
I.3.	Análisis de frecuencia de caudal medio diario máximo anual en el río Aconcagua en Chacabuquito, periodo nival.	86
I.4.	Análisis de frecuencia de caudal medio diario máximo anual en el río Aconcagua en Chacabuquito, periodo pluvial.	87
I.5.	Análisis de frecuencia de caudal medio diario máximo anual en el río Maipo en el Manzano, periodo nival.	88

I.6.	Análisis de frecuencia de caudal medio diario máximo anual en el río Maipo en el Manzano, periodo pluvial.	89
------	--	----

Índice de Ilustraciones

2.1.	Emisiones de gases de efecto efecto invernadero de origen antropogénico en el período 1970-2010. Fuente: IPCC (2014)	4
2.2.	Variaciones de la temperatura global en la superficie para los cuatro escenarios RCP. Fuente: IPCC (2014)	4
2.3.	Proyecciones de (a) temperatura y (b) precipitación global para el siglo XXI, bajo escenarios del proyecto CMIP6. Adaptado de Tebaldi et al. (2021).	5
2.4.	Precipitaciones y caudales máximos en 3 días para distintos períodos de retorno para el futuro cercano y lejano. Se realiza el ajuste con la función de distribución General de Valores Extremos (GEV). Adaptado de Demaria et al. (2013).	7
2.5.	Proyecciones de caudales máximos instantáneos asociados a períodos de retorno T=10, 20 y 50 años, para el período 2015-2045 (izquierda) y 2046-2075 (Derecha) según el escenario RCP 8.5 y cuatro modelos de circulación general. Fuente: Lagos et al. (2015)	8
2.6.	:(a) Mapas de cambio de intensidad diaria de precipitación (% , anual) para el periodo 2021-2050, con respecto al periodo histórico con resoluciones de 50 km y (b) 10 km según los escenarios RCP2.6 y RCP8.5. Fuente: CR2 (2018)	9
2.7.	Esquema ilustrativo del modelo HBV. Adaptado de Seibert y Vis (2012).	10
3.1.	Mapa de ubicación de las tres cuencas de estudio, sus rangos de elevación, y los ciclos mensuales de la precipitación, escorrentía y temperatura, entre abril/1979 y marzo/2020. Para el climograma se utiliza el producto grillado de precipitaciones y temperaturas del CR2Met, y para los caudales las estaciones fluviométricas de la DGA.	12
3.2.	Productos de precipitación y temperatura CR2MET y la ubicación de las estaciones disponibles	14
4.1.	Diagrama de flujo de la metodología.	15
4.2.	Esquema de corrección de la precipitación del producto CR2Met, mediante la metodología de Cressman (Adaptado de DOH, 2020).	16
4.3.	Bandas de elevación en las tres cuencas de estudio: (a) cuenca del río Maipo en el Manzano, (b) cuenca del río Aconcagua y (c) cuenca del río Choapa.	18
4.4.	Diagrama de flujo de la metodología seguida para el análisis de frecuencia.	20
5.1.	Evaluación de las precipitaciones del producto CR2Met bruto y corregido con estaciones: (A) mapa de distribución del estadístico NRMSE y (B) estadísticos R^2 , RMSE, NRMSE y PBIAS promedio en la extensión del mapa.	24
5.2.	Corrección producto de precipitaciones CR2Met en cuanto a precipitaciones diarias máximas anuales	24
5.3.	GCMs seleccionados y eliminados según su capacidad de reproducir la estacionalidad en la zona de estudio.	25

5.4.	Series de caudales medios diarios observados y simulados en los períodos de validación y calibración en la cuenca río Choapa en Cuncumén	27
5.5.	Curva de duración observada y simulada en el período de calibración y validación en la cuenca río Choapa en Cuncumén	27
5.6.	Ajustes del modelo en cuanto a caudales medios diarios máximos anuales y caudales medios diarios con 95 % de probabilidades de excedencia en cada año, para períodos de calibración y validación en la cuenca río Choapa en Cuncumén	27
5.7.	Series de caudales medios diarios observados y simulados en los períodos de validación y calibración en la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito.	28
5.8.	Curva de duración observada y simulada en el período de calibración y validación en la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito	28
5.9.	Ajustes del modelo en cuanto a caudales medios diarios máximos anuales y caudales medios diarios con 95 % de probabilidades de excedencia en cada año, para períodos de calibración y validación en la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito	29
5.10.	Series de caudales medios diarios observados y simulados en los períodos de validación y calibración en la cuenca río Maipo en el Manzano	29
5.11.	Curva de duración observada y simulada en el período de calibración y validación en la cuenca río Maipo en el Manzano	30
5.12.	Ajustes del modelo en cuanto a caudales medios diarios máximos anuales y caudales medios diarios con 95 % de probabilidades de excedencia en cada año, para períodos de calibración y validación en la cuenca río Maipo en el Manzano	30
5.13.	Precipitaciones máximas anuales y sus temperaturas asociadas, para el período histórico (abr/1985-mar/2014), futuro cercano (abr/2025-mar/2055) y lejano (abr/2055-mar/2055) para las tres cuencas en estudio. Los círculos representan los valores anuales, con cada color un GCM; los círculos rellenos el promedio climatológico por GCM durante el periodo; y los valores en rojo el valor promedio entre todos los GCMs para cada periodo.	31
5.14.	Desviación estándar de la precipitación diaria máxima anual y de su temperatura asociada, por GCM, para las tres cuencas y los tres períodos de estudio. Los puntos y las líneas punteadas representan el promedio de todos los GCM para cada período.	32
5.15.	Resultado análisis de frecuencia para las precipitaciones máximas anuales en las tres cuencas en estudio	33
5.16.	Variaciones de eventos de sequías para índices de SPI menores a 1 en las tres cuencas de estudio. Cada color representa un GCM diferente, y el punto negro representa el promedio de todos ellos.	34
5.17.	Caudales máximos medios diarios para períodos pluvial y nival para distintos períodos de retorno en el futuro cercano y lejano para la cuenca Río Choapa en Cuncumén	36
5.18.	Caudales máximos medios diarios para período pluvial y nival para distintos períodos de retorno en el futuro cercano y lejano para la cuenca Río Aconcagua en Chacabuquito	36
5.19.	Caudales máximos medios diarios para período pluvial y nival para distintos períodos de retorno en el futuro cercano y lejano para la cuenca Río Maipo en el Manzano	36

5.20.	Cambios proyectados de días secos al año para el período futuro cercano y lejano con respecto al histórico para las tres cuencas en estudio.	38
5.21.	Cambios proyectados de días secos consecutivos para el período futuro cercano y lejano con respecto al histórico para las tres cuencas en estudio.	39
6.1.	Almacenamientos de SWE estacionales simulados con los distintos GCM para cada período y las tres cuencas en estudio.	44
6.2.	Curva de variación estacional proyectada para el futuro cercano y lejano para las tres cuencas en estudio. La línea roja representa el observado históricamente, y la azul corresponde al promedio de las simulaciones para cada GCM en el periodo correspondiente.	45
A.1.	Estadísticos de validación cruzada para calibración del radio de influencia en la zona de estudio.	56
A.2.	Resultados corrección de cr2met en cuanto a las precipitaciones medias anuales en la zona de estudio.	57
C.1.	Proyecciones de temperatura media anual en la cuenca del río Choapa, y sus variaciones relativas al periodo histórico.	61
C.2.	Proyecciones de precipitación anual en la cuenca del río Choapa, y sus variaciones relativas al periodo histórico.	62
C.1.	Proyecciones de temperatura media anual en la cuenca del río Aconcagua, y sus variaciones relativas al periodo histórico.	62
C.2.	Proyecciones de precipitación anual en la cuenca del río Aconcagua, y sus variaciones relativas al periodo histórico.	63
C.1.	Proyecciones de temperatura media anual en la cuenca del río Maipo, y sus variaciones relativas al periodo histórico.	63
C.2.	Proyecciones de precipitación anual en la cuenca del río Maipo, y sus variaciones relativas al periodo histórico.	64
D.1.	Comparación de valores de Q máximos anuales y Q95 para cada GCM con lo observado en el período histórico en la cuenca río Choapa en Cuncumén . . .	66
D.2.	Comparación de valores de Q máximos anuales y Q95 para cada GCM con lo observado en el período histórico en la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito	66
D.3.	Comparación de valores de Q máximos anuales y Q95 para cada GCM con lo observado en el período histórico en la cuenca Maipo en el Manzano	66
E.1.	Caudales medios anuales proyectados para la cuenca río Choapa en Cuncumén	67
E.2.	Caudales medios anuales proyectados para la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito	67
E.3.	Caudales medios anuales proyectados para la cuenca río Maipo en el Manzano	68
E.1.	Caudales máximos anuales proyectados para la cuenca río Choapa en Cuncumén	68
E.2.	Caudales máximos anuales proyectados para la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito	69
E.3.	Caudales máximos anuales proyectados para la cuenca río Maipo en el Manzano	69
E.1.	Caudales anuales con probabilidad de excedencia de 95 % proyectados para la cuenca río Choapa en Cuncumén	70
E.2.	Caudales anuales con probabilidad de excedencia de 95 % proyectados para la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito	70
E.3.	Caudales anuales con probabilidad de excedencia de 95 % proyectados para la cuenca río Maipo en el Manzano	71

G.1.	Frecuencias de valores de SPI para cada período en la cuenca río Choapa en Cuncumén	76
G.2.	Frecuencias de valores de SPI para cada período en la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito	77
G.3.	Frecuencias de valores de SPI para cada período en la cuenca Maipo en el Manzano	77
H.1.	Serie mensual de índices SPI 12 para el período histórico en la cuenca río Choapa en Cuncumén	78
H.2.	Serie mensual de índices SPI 12 para el período futuro cercano (2025-2055) en la cuenca río Choapa en Cuncumén	79
H.3.	Serie mensual de índices SPI 12 para el período futuro lejano (2055-2085) en la cuenca río Choapa en Cuncumén	79
H.1.	Serie mensual de índices SPI 12 para el período histórico en la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito	80
H.2.	Serie mensual de índices SPI 12 para el período futuro cercano (2025-2055) en la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito	80
H.3.	Serie mensual de índices SPI 12 para el período futuro lejano (2055-2085) en la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito	81
H.1.	Serie mensual de índices SPI 12 para el período histórico en la cuenca río Maipo en el Manzano	81
H.2.	Serie mensual de índices SPI 12 para el período futuro cercano (2025-2055) en la cuenca río Maipo en el Manzano	82
H.3.	Serie mensual de índices SPI 12 para el período futuro lejano (2055-2085) en la cuenca río Maipo en el Manzano	82

1. Introducción

1.1. Motivación

La emisión de gases de efecto invernadero desde la época pre-industrial ha tenido consecuencias en el clima que son evidentes: un aumento en la temperatura global, pérdidas de volúmenes de hielo, cambios en los patrones de precipitación global y un aumento en la ocurrencia de eventos extremos, entre otros efectos (IPCC, 2014). En este contexto, surge la necesidad de estudiar los cambios futuros en el comportamiento del sistema climático, y, en particular, de los recursos hídricos: su disponibilidad, las variaciones en su almacenamiento, y la frecuencia de eventos extremos, como las sequías y las crecidas.

Las crecidas, definidas por un aumento significativo del caudal en un río, pueden provocar inundaciones tanto en zonas rurales como en zonas urbanas, pudiendo generar pérdidas materiales, y más importante aún, de vidas humanas (Rojas et al., 2014; Valdés-Pineda et al., 2017). Por otro lado, las sequías tienen un gran impacto en diversas actividades económicas, como la industria y la agricultura, así como en la calidad de vida de los habitantes. En particular, en Chile central, en donde se concentra el 75 % de la agricultura del país (Demaría et al., 2013b), se desarrolla, desde el 2010, la megasequía, con importantes consecuencias sociales y económicas en la zona (Garreaud et al., 2020).

Existen diversos estudios sobre cambios de eventos extremos en Chile central debido al cambio climático. Demaría et al. (2013b) estudió la cuenca del río Mataquito, encontrando aumentos tanto en las precipitaciones como en los caudales máximos en periodos de tres días para distintos escenarios futuros. Por otro lado, Lagos et al. (2015) proyectan aumentos de hasta 100 % en las magnitudes de caudales máximos instantáneos para distintos periodos de retorno en la cuenca del río Maipo en el Manzano y en el río Maule para el período 2046-2075.

Por otra parte, la Dirección General de Aguas, mediante la actualización del balance hídrico nacional (DGA, 2017), concluye que, en cuencas de Chile central como por ejemplo las de los ríos Aconcagua, Maipo y Rapel, el caudal ha disminuido entre 13 y 37 % en las últimas décadas. Además, proyectaron disminuciones de más de 50 % del caudal para el periodo 2030-2060.

Dadas estas proyecciones, y la disponibilidad de nuevas conceptualizaciones de cambio global, se plantea en este trabajo de título un estudio de proyecciones de eventos extremos de temperatura, precipitación, crecidas y sequías en Chile central para el período futuro cercano (2025-2055) y lejano (2055-2085), bajo el nuevo escenario de cambio climático SSP5-8.5, del proyecto CMIP6 (Eyring et al., 2016). Para esto, se implementa un modelo hidrológico conceptual Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV; Bergström, 1976; Bergström, 1995), para proyectar la respuesta hidrológica de las cuencas frente a cambios en el clima.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este estudio consiste en analizar proyecciones de eventos extremos de precipitación y temperatura y sus implicancias hidrológicas en cuanto a crecidas y sequías,

bajo el escenario de cambio climático SSP5-8.5 en cuencas de Chile central, para el periodo 2025-2085, utilizando el modelo hidrológico HBV.

Los objetivos específicos son:

1. Mediante un análisis de frecuencia para distintos períodos de retorno, analizar cambios de frecuencia y magnitud de precipitaciones máximas anuales.
2. A partir del índice de sequías SPI, determinar cambios de frecuencia y magnitud de sequías meteorológicas en el futuro.
3. Estudiar cambios en eventos de crecidas en períodos pluviales y nivales mediante análisis de frecuencia.
4. Estimar proyecciones de sequías hidrológicas mediante cambios en caudales de alta probabilidad de excedencia.

2. Revisión de antecedentes

Frente a la importancia que tiene el cambio climático, y sus distintas consecuencias en las respuestas hidrológicas de las cuencas de Chile y el mundo, surge la necesidad de estudiar las variaciones de precipitaciones y temperaturas en Chile central, en particular, los eventos extremos y sus posibles implicancias en las respuestas hidrológicas en el futuro. Esto significa estudiar posibles cambios en magnitudes y frecuencias de eventos de crecidas y sequías hidrológicas.

En esta sección, en primer lugar, se definen conceptos generales de cambio climático, y revisar avances en cuanto a su estudio. Luego, se analizan los estudios sobre eventos extremos realizados en Chile. Por último, se realiza una revisión sobre modelos hidrológicos, y, en particular, del modelo HBV y su implementación en diversos estudios.

2.1. Cambio climático

2.1.1. Antecedentes generales

Debido a avances tecnológicos y la revolución industrial del siglo XIX, los sistemas de producción de energía actuales se basan principalmente en la utilización de combustibles fósiles. Si bien los gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono pueden existir por razones naturales, la tala de bosques y quema de combustibles fósiles han aumentado considerablemente sus concentraciones en la atmósfera (Caballero et al., 2007). En la Figura 2.1 se pueden observar las emisiones de GEI de origen antropogénico en los últimos 40 años, en donde se evidencia un aumento constante, siendo el CO_2 el que presenta mayores incrementos. Este aumento, aun teniendo una concentración mucho menor que otros gases, como el nitrógeno u oxígeno, afecta directamente al clima y la temperatura global (IPCC, 2014). Esto se debe principalmente a que estos gases interfieren en el balance energético terrestre, logrando que la Tierra capture más energía debido a la mayor capacidad de la atmósfera de absorber energía emitida desde la superficie terrestre.

En este contexto, se forma el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático (IPCC por sus siglas en inglés) en el año 1988. El IPCC tiene como objetivo comprender las bases científicas del cambio climático, buscando aportar en términos de adaptación y mitigación. En el último informe realizado, se establece que las principales causas de los aumentos de temperatura son los aumentos de los gases de efecto invernadero. Además, estos cambios en el clima podrían tener otros efectos tales como aumento en eventos extremos de precipitación, aumento en nivel del mar, aumento en olas de calor, etc. (IPCC, 2014).

Con el objetivo de realizar proyecciones climáticas, se generan diferentes escenarios futuros, dependiendo de las emisiones de GEI, llamados Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Existe un escenario pesimista, donde el forzamiento radiativo aumenta a lo largo del siglo XXI (RCP8.5), dos escenarios intermedios (RCP4.5 y RCP6) y un escenario optimista (RCP2.6), en donde se tiene un alto grado de mitigación (Moss et al, 2010). Por otro lado, se generan cinco escenarios basados en Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP, por sus siglas en inglés, Riahi et al., 2016), siendo SSP1 el

más optimista, y SSP5 el más pesimista.

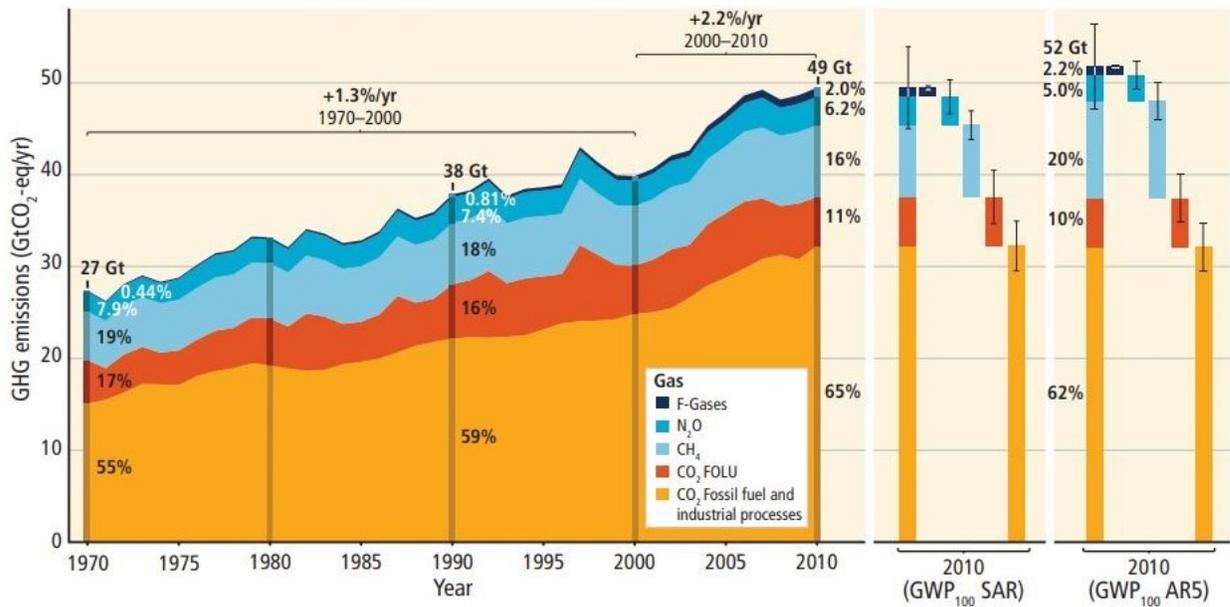


Figura 2.1: Emisiones de gases de efecto efecto invernadero de origen antropogénico en el período 1970-2010. Fuente: IPCC (2014)

Bajo todos los escenarios RCP, la temperatura media global en superficie aumentaría durante el siglo XXI (Figura 2.2). Las proyecciones indican que dicho calentamiento se daría en mayor medida en las zonas terrestres, y que el Ártico sería la zona que experimentaría un mayor calentamiento (IPCC, 2013). Estas simulaciones se obtienen a partir del Proyecto Internacional de Modelos (CMIP por sus siglas en inglés) en su versión 5 (CMIP5; Taylor et al., 2012). Este proyecto propone realizar un conjunto de simulaciones climáticas para comprender los cambios climáticos pasados y futuros, proporcionando un contexto de múltiples modelos para evaluar los mecanismos responsables de las diferencias de los modelos, explorar la capacidad de predicción climática y determinar por qué los modelos forzados similarmente producen diferentes respuestas climáticas (Taylor et al., 2012).

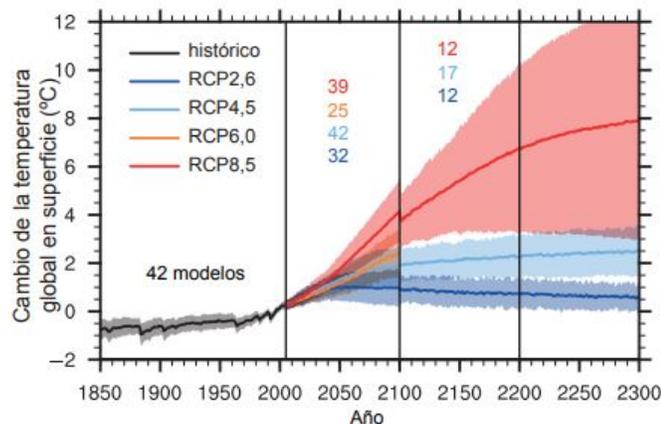


Figura 2.2: Variaciones de la temperatura global en la superficie para los cuatro escenarios RCP. Fuente: IPCC (2014)

La sexta versión del proyecto, CMIP6, utiliza escenarios que combinan los escenarios RCP y escenarios SSP. En la Figura 2.3 se presentan proyecciones de temperatura y precipitación global bajo los escenarios de CMIP6, obteniendo un alza de ambas variables bajo todos los escenarios.

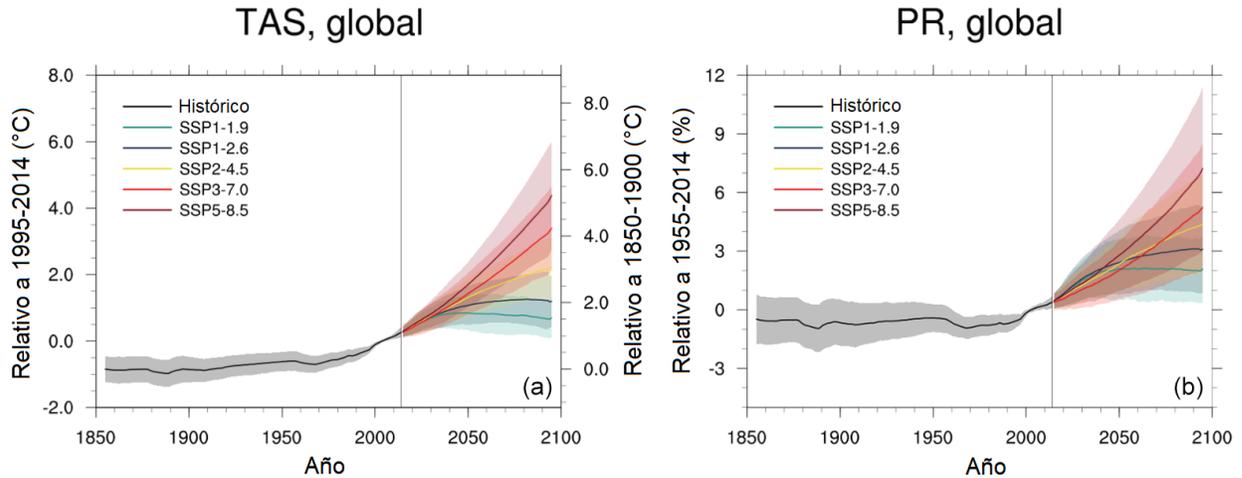


Figura 2.3: Proyecciones de (a) temperatura y (b) precipitación global para el siglo XXI, bajo escenarios del proyecto CMIP6. Adaptado de Tebaldi et al. (2021).

Para generar las proyecciones, se utilizan modelos de circulación general (GCM por sus siglas en inglés), que simulan flujos de energía, masa y cantidad de movimiento en el sistema terrestre, así como interacciones biológicas y químicas considerando la atmósfera, océanos, capas superiores de la litósfera y la criósfera. Con ellos, mediante integración temporal de los flujos mencionados anteriormente, es posible obtener los estados atmosféricos. Existen muchos modelos en la actualidad desarrollados por distintas universidades y centros de investigación. Los GCM entregan resultados en grillas generalmente gruesas (>100 km), y tienen, por lo tanto, dificultades para representar procesos a escala regional, especialmente en el caso de Chile, que cuenta con un terreno complejo, con diferencias orográficas importantes en la cordillera de los Andes (Sharma et al., 2007).

Debido a lo anterior, existen métodos de escalamiento estadísticos, que utilizan observaciones locales para determinar las relaciones entre variables regionales y globales, y métodos dinámicos, que se basan en modelos de circulación regionales. Los métodos estadísticos tienen menores costos computacionales. Entre ellos, existen los métodos de mapeo de cuantiles, que buscan corregir sesgos sistemáticos de los GCMs igualando las curvas de distribución acumulada de las observaciones y de los GCMs en el periodo histórico (Cannon et al., 2015). En particular, existen métodos de mapeo de cuantiles multivariados (e.g., Cannon et al., 2018) que, además de corregir los sesgos utilizando las funciones de distribución acumulada, consideran la covariabilidad entre las variables, usualmente, la precipitación y la temperatura, lo que resulta particularmente importante en días de precipitación sólida (Dionizis et al., 2021).

2.1.2. Cambio climático en Chile

En Chile se han llevado a cabo diversos estudios de proyecciones climáticas. Recientemente, la actualización del balance hídrico nacional (DGA, 2017) proyecta aumentos de temperaturas para todo el territorio nacional, alcanzando un calentamiento de 3°C en la zona austral. Se utilizaron cuatro modelos de circulación general y el escenario RCP8.5. En cuanto a las precipitaciones, se obtuvo una disminución de hasta un 15 % para la zona central del país, siendo más severa en la zona sur. Por otra parte, en la zona altiplánica se proyectaron aumentos de hasta un 8 %, proyectando además disminuciones de más de un 50 % en el caudal medio anual en el norte y centro de Chile.

Bozkurt et al. (2018), estudiaron las variaciones de temperatura y precipitación en Chile Central, utilizando los escenarios RCP2.6 y RCP8.5, y obtuvieron, para fines del siglo XXI, un aumento de temperaturas de 1,2°C y 3,5°C, y una disminución de 3 % y de 30 % en la precipitación, para los escenarios optimista y pesimista respectivamente. Además, proyectaron una disminución de un 40 % en los caudales de las cuencas de Chile central, así como una baja en el manto nival de las cuencas (75-85 % para escenarios más desfavorables), y un aumento en la severidad y la frecuencia de eventos hidroclimáticos extremos.

Por otra parte, Araya-Osses et al. (2020) en un estudio más reciente, analizaron temperaturas máximas y mínimas y precipitaciones en 400 lugares de Chile y obtuvieron que en la zona centro sur del país las precipitaciones invernales podrían disminuir hasta en un 40 % en el escenario más desfavorable (RCP 8.5) y aumentar hasta en un 60 % en la zona norte de los Andes.

2.2. Estudios de eventos extremos en Chile

Durante el período 1574-2012, el 71 % de las inundaciones en Chile fueron provocadas por eventos de precipitación y, además, se ve un aumento de inundaciones provocadas por procesos nivoglaciares en las últimas décadas (Rojas et al., 2014). Los aumentos de temperatura podrían inducir en derretimientos de nieves y glaciares afectando cuencas nivales. Por otro lado, eventos extremos de precipitación podrían generar crecidas pluviales en cuencas controladas por la lluvia.

Vicuña et al. (2013) llevaron a cabo estudios sobre eventos extremos en el río Mataquito durante el período 1976-2008. Determinaron una diferencia creciente de caudales en el período de lluvias comparado con el de deshielos, es decir, aumentan los caudales asociados a lluvias y disminuyen los caudales asociados a derretimientos. Dicha temporada se asocia a altas precipitaciones y altas temperaturas mínimas. Los autores concluyeron que es importante realizar estudios de este tipo debido a que, en las últimas décadas, se han presentado situaciones en la zona de estudio que concuerdan con las proyecciones de precipitaciones y temperaturas, es decir, con aumentos de temperatura, reducción de precipitación media y una menor acumulación de nieve.

En cuanto a eventos extremos de precipitación, durante los últimos 10 años se ha desarrollado la llamada Megasequía en Chile. Durante este período, se han registrado déficits de hasta un 40 % en Chile central, las que se atribuyen a variabilidad climática natural y a

factores antropogénicos (Garreaud, 2020).

En cuanto a proyecciones futuras, Demaria et al. (2013) analizó impactos del cambio climático en la cuenca del río Mataquito mediante la implementación del modelo hidrológico de base física *Variable Infiltration Capacity* (VIC; Liang et al., 1995) para distintos escenarios futuros para escenarios favorables y pesimistas de los proyectos CMIP3 y CMIP5. Bajo el escenario RCP8.5, determinaron aumentos tanto en la precipitación como caudales máximos en 3 días para distintos períodos de retorno, siendo mayor para el período de retorno de 100 años (Figura 2.4).

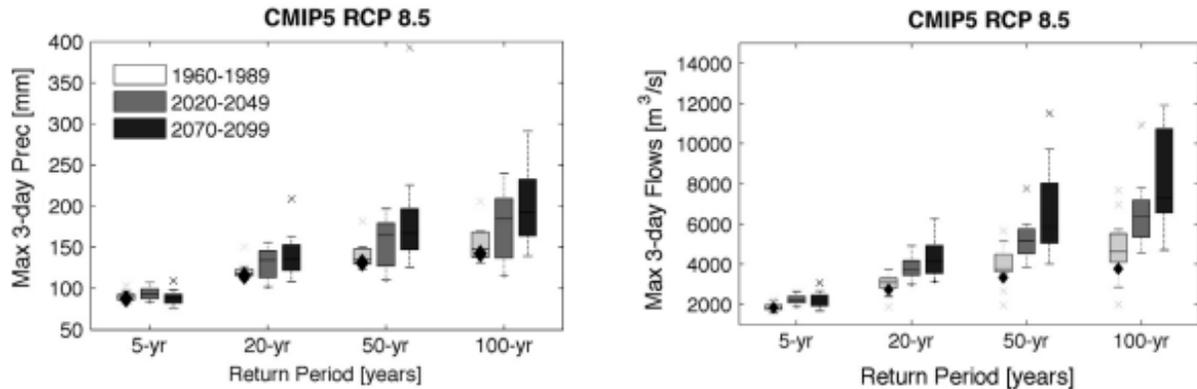


Figura 2.4: Precipitaciones y caudales máximos en 3 días para distintos períodos de retorno para el futuro cercano y lejano. Se realiza el ajuste con la función de distribución General de Valores Extremos (GEV). Adaptado de Demaria et al. (2013).

Lagos et al., (2015) llevaron a cabo un estudio de proyecciones de crecidas en tres cuencas nivales de Chile central (Maipo en el Manzano, Maule en bocatoma Central Pehuenche y Bío-Bío en Llanquén) bajo el escenario RCP 8.5. Para la determinación de caudales máximos utilizaron el modelo de precipitación escorrentía de Verni y King (1977), donde las precipitaciones se definen mediante análisis de frecuencia. Para considerar la variabilidad climática, se incluyeron estudios sobre el área pluvial en los períodos analizados. Se obtuvieron aumentos considerables en los caudales máximos (Figura 2.5) para el período futuro cercano y lejano considerando distintos períodos de retorno, sin embargo se tiene una gran dispersión en todos los casos para los distintos GCMs utilizados. Se obtuvieron aumentos de hasta 250 % del caudal máximo instantáneo para un período de retorno de 50 años en la cuenca del río Maipo en el Manzano (para el período 2046-2075).

Finalmente, el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2, 2018) realizó simulaciones mediante el modelo climático regional *Regional Climate Model System Versión 4* (RegCM4; Giorgi et al., 2012) utilizando los escenarios de emisiones RCP2.5 y RCP8.5 para el período 2006-2050 con resoluciones horizontales de 50 y 10 kilómetros. Se obtuvo que las olas de calor (5 o más días consecutivos que presentan un aumento de 5°C en la temperatura máxima con respecto a un valor de referencia) aumentarán para los dos escenarios, especialmente en la cordillera (CR2, 2018). En cuanto a las precipitaciones, hay un leve aumento en las intensidades diarias de precipitación para el territorio nacional bajo el escenario RCP8.5

, con excepción del norte grande, el norte chico y, en menor medida, el altiplano en la resolución de 10 km (CR2, 2018). Estos resultados se presentan en la Figura 2.6, en donde destaca que las variaciones son menos acentuadas para la resolución de 50 kilómetros, que para la grilla más fina.

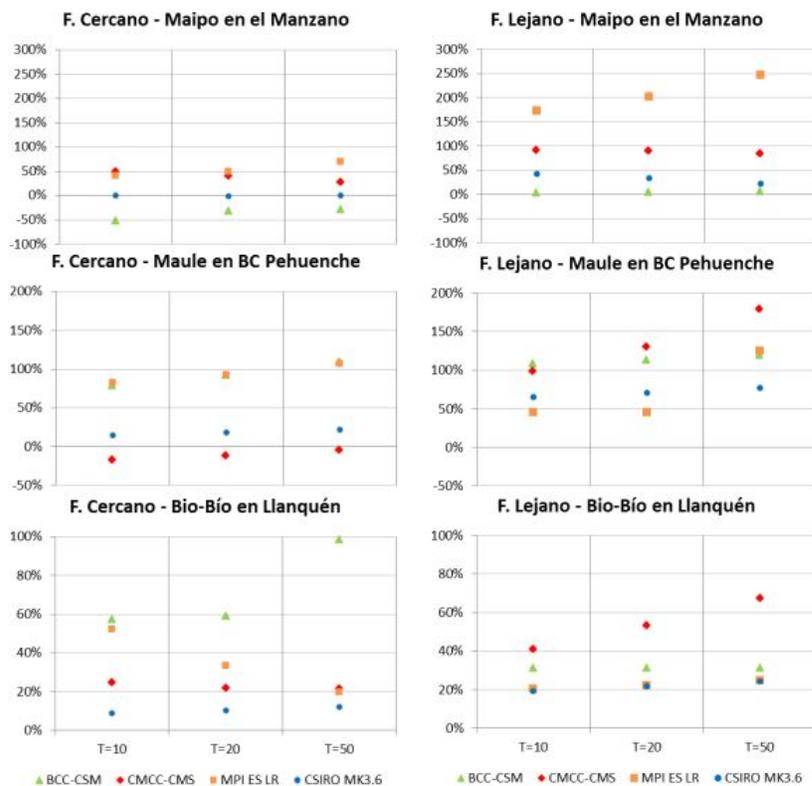


Figura 2.5: Proyecciones de caudales máximos instantáneos asociados a períodos de retorno $T=10$, 20 y 50 años, para el período 2015-2045 (izquierda) y 2046-2075 (Derecha) según el escenario RCP 8.5 y cuatro modelos de circulación general. Fuente: Lagos et al. (2015)

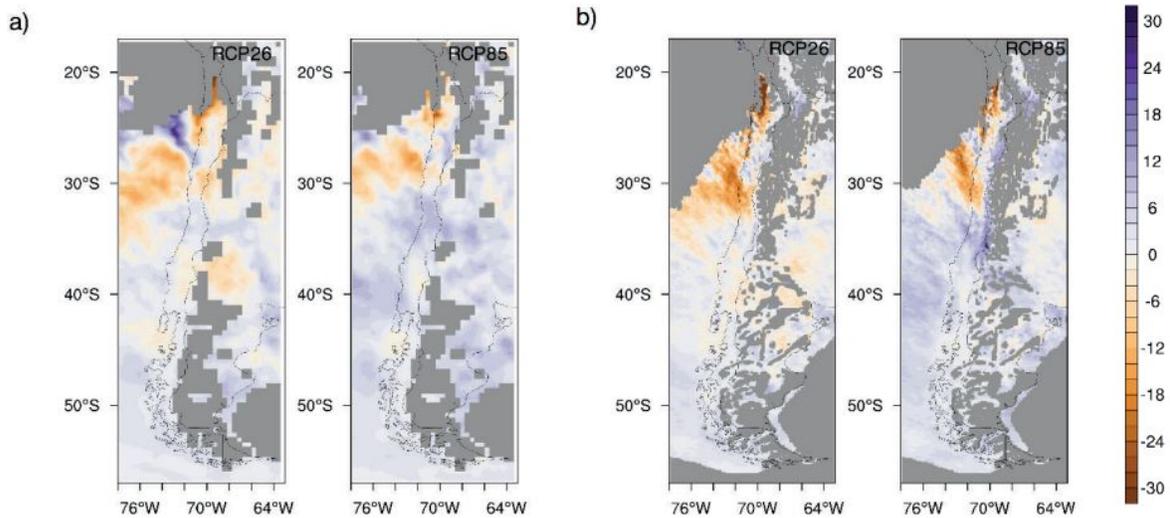


Figura 2.6: (a) Mapas de cambio de intensidad diaria de precipitación (% anual) para el periodo 2021-2050, con respecto al periodo histórico con resoluciones de 50 km y (b) 10 km según los escenarios RCP2.6 y RCP8.5. Fuente: CR2 (2018)

2.3. Modelación hidrológica

Los modelos hidrológicos son una representación de los procesos del ciclo hidrológicos de una zona, generalmente una cuenca, con los cuales se intenta emular la respuesta de la cuenca frente a eventos meteorológicos. Los modelos hidrológicos se dividen en modelos conceptuales y de base física: los primeros corresponden a una conceptualización simple de la realidad, con representaciones abstractas de los procesos; mientras que los segundos buscan representar los procesos a través de leyes físicas, e intentan simular explícitamente la mayor cantidad de procesos hidrológicos posibles (Hrachowitz y Clark, 2017). Además, los modelos hidrológicos se pueden diferenciar según su representación espacial: existen modelos concentrados, que consideran la zona de estudio como una unidad homogénea, y existen modelos distribuidos, los cuales dividen la zona de estudio en divisiones más pequeñas, y las ecuaciones del modelo están resueltas en cada una de estas subdivisiones.

El modelo hidrológico HBV es un modelo conceptual semi-distribuido en bandas de elevación, desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) en el año 1970 (Bergström, 1976; Bergström, 1995). El modelo ha sufrido modificaciones a lo largo de los años sin cambiar su estructura básica, incorporando algoritmos que varían en complejidad (e.g., Seibert, 2005; Aghakouchak y Habib, 2010). Estas variaciones pueden afectar el desempeño de la versión del modelo HBV utilizado, debido a diferencias en su estructura y simplificaciones matemáticas (Jansen et al., 2021). En este estudio se utiliza la versión modular implementada por el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) en el paquete *HBV.IANIGLA* en R (Toum, 2021).

El modelo HBV cuenta con tres módulos principales

- En el **módulo de acumulación** *SnowGlacier_HBV* se considera una temperatura umbral, la cual define si hay derretimiento o acumulación de nieve. Para la tasa de fu-

sión de nieve se utiliza el método grado-día, que depende del factor de derretimiento de grado día, la temperatura media diaria y umbral.

- En el **módulo de precipitación efectiva y humedad del suelo** *Soil_HBV*, se divide la precipitación en una parte que se infiltra y en otra que escurre superficialmente (efectiva). La infiltración se calcula según la humedad del suelo, utilizando parámetros tales como la capacidad de campo, un factor de corrección y la condición inicial de humedad del suelo.
- En el **módulo de escorrentía** *Routing_HBV* se tienen tres depósitos de almacenamiento en serie: uno de flujos superficiales, otro de subsuperficiales y otro de flujos subterráneos. Estos se relacionan mediante las tasas de infiltración y de percolación. La escorrentía total es la suma de las tres salidas mencionadas anteriormente. Para ajustar el momento de la descarga se utiliza una función de transferencia triangular.

La Figura 2.7 muestra un esquema general del modelo HBV, sus almacenamientos y sus flujos. La Tabla 2.1 muestra una descripción de los parámetros del modelo.

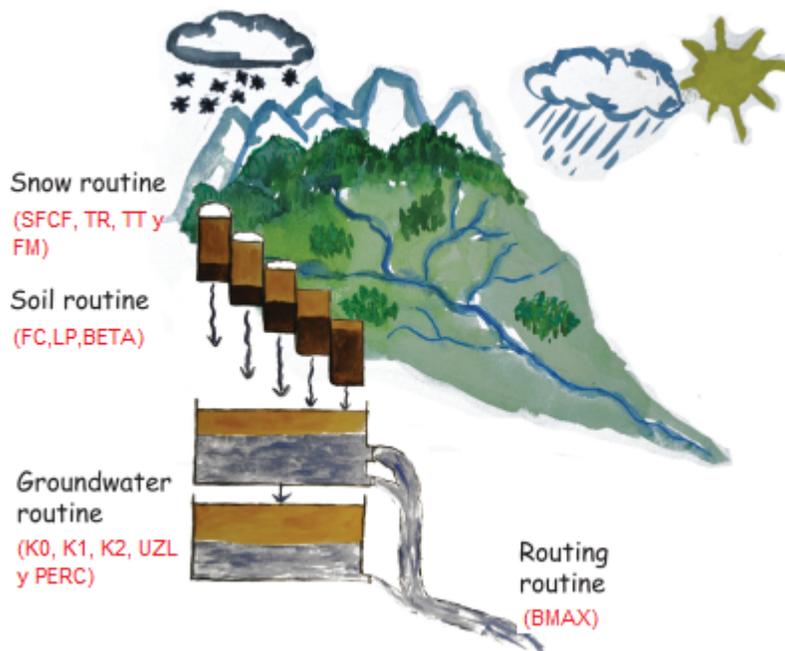


Figura 2.7: Esquema ilustrativo del modelo HBV. Adaptado de Seibert y Vis (2012).

Tabla 2.1: Descripción de parámetros del modelo hidrológico HBV.

Parámetro	Unidad	Descripción
SFCF	[-]	Factor de corrección de nieve
Tr	[°C]	Temperatura umbral
Tt	[°C]	Temperatura de derretimiento
fin	[mm/C día]	Factor de derretimiento de nieve
fc	[mm]	Capacidad de campo del suelo
lp	[-]	Factor para obtención de la ET
Beta	[-]	Coefficiente no lineal que relaciona entradas de agua y escorrentía directa
K0	1/día	Constante de almacenamiento reservorio superficial
K1	1/día	Constante de almacenamiento reservorio intermedio
K2	1/día	Constante de almacenamiento reservorio subterráneo
UZL	mm/día	Máximo flujo entre el reservorio superficial y el intermedio
PERC	mm/día	Máximo flujo entre el reservorio intermedio y el subterráneo
Bmax	día	Longitud de la base de la función de transferencia

En Chile, el modelo HBV ha sido implementado en diversas cuencas, y con diferentes objetivos. Parra et al. (2019) compararon diferentes configuraciones de HBV para reproducir los flujos bajos en cuencas de Chile centro-sur, determinando que la elección de la estructura del modelo depende de las características geológicas y topográficas de la cuenca. Medina y Muñoz (2020) utilizaron el modelo HBV para estimar tendencias en flujos máximos y mínimos en cuencas con registros escasos.

Álvarez-Garretón et al. (2021) implementaron el modelo HBV en 106 cuencas de Chile, estudiando su memoria hidrológica y su respuesta frente a déficit de precipitaciones. Concluyeron que la memoria hidrológica de las cuencas influye fuertemente en la propagación de sequías: las cuencas nivales, con memoria más larga, se ven más afectadas por sequías largas, mientras que en las cuencas pluviales, con memoria más corta, el impacto de sequías cortas pero intensas es más importante.

Medina et al. (2022) analizaron la importancia de los diferentes procesos hidrológicos representados por HBV en diferentes escalas temporales, y para diferentes regímenes hidrológicos, en 88 cuencas de Chile centro-sur. Las conclusiones principales del estudio fueron, por una parte, que para las cuencas pluviales, a mayor escala temporal, mayor es la importancia de acumulación de agua en el suelo, y menor es la importancia de procesos de escorrentía superficial. Por otro lado, en cuencas nivales, determinaron que los procesos subterráneos son los más influyentes en escalas temporales largas.

3. Zona de estudio

3.1. Antecedentes generales

En este trabajo, se incluyen tres cuencas entre las latitudes 31°S y 35°S: río Choapa en Cuncumén, río Aconcagua en Chacabuquito y río Maipo en el Manzano, de norte a sur. En la Figura 3.1 se muestran las ubicaciones de las cuencas de estudio, junto a sus climogramas, incluyendo la escorrentía, para el período abril/1979 - marzo/2020. Las características generales de las cuencas se presentan en la Tabla 3.1. Las tres cuencas se ubican en la zona pre-cordillerana o cordillerana de Chile, y tienen rangos de elevaciones similares, siendo la del río Maipo la con mayor amplitud.

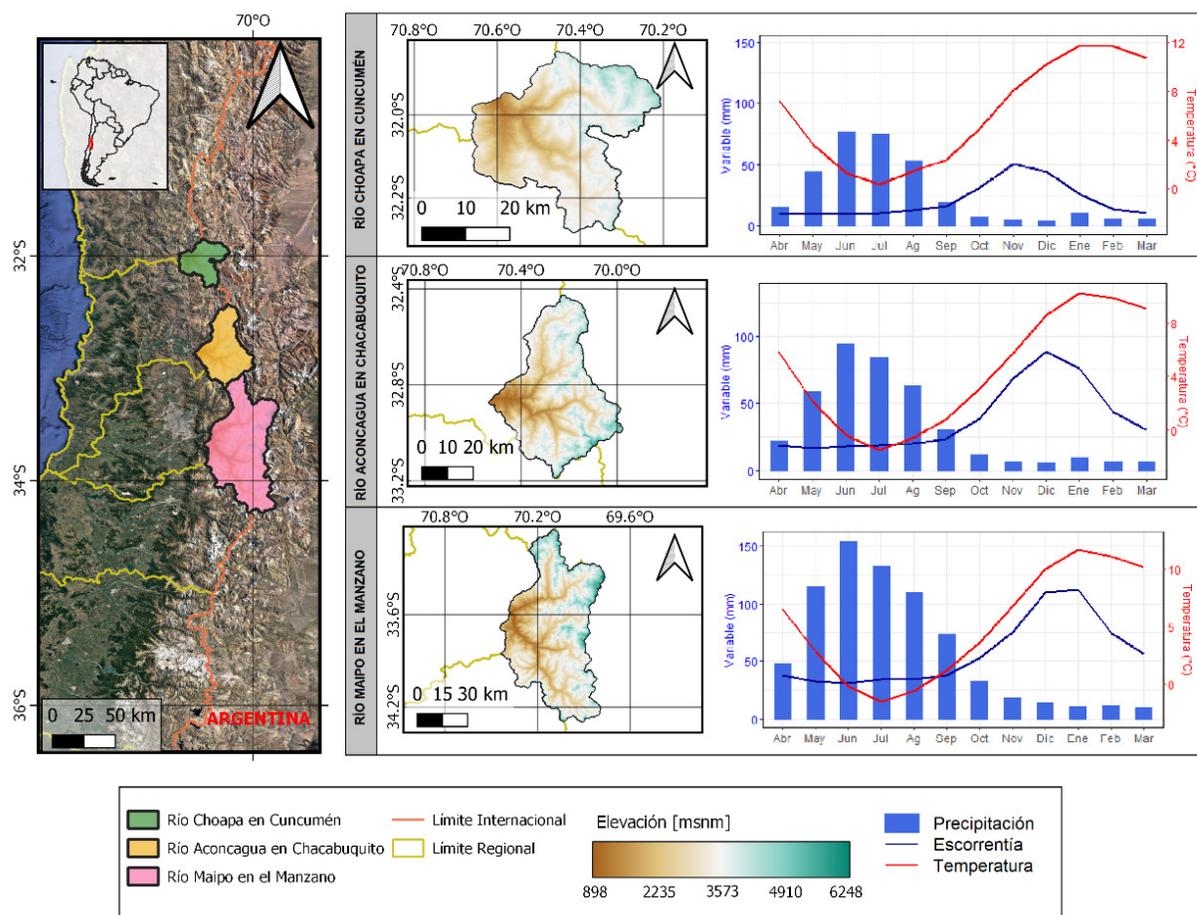


Figura 3.1: Mapa de ubicación de las tres cuencas de estudio, sus rangos de elevación, y los ciclos mensuales de la precipitación, escorrentía y temperatura, entre abril/1979 y marzo/2020. Para el climograma se utiliza el producto grillado de precipitaciones y temperaturas del CR2Met, y para los caudales las estaciones fluviométricas de la DGA.

Observando los climogramas de las cuencas y las medias anuales de las variables hidrometeorológicas (Tabla 3.2), destaca que las tres acumulan las precipitaciones entre abril y septiembre, con valores que aumentan de norte a sur. La cuenca del río Maipo es la más llu-

viosa, alcanzando una precipitación media anual de 821 milímetros, mientras que las cuencas del río Choapa y Aconcagua presentan precipitaciones medias anuales de 336 y 406 milímetros respectivamente. En cuanto a las temperaturas medias anuales, se tiene que la cuenca más cálida es la del río Choapa, alcanzando los 6,2 °C, mientras que la más fría es la cuenca del río Aconcagua con 4,4 °C. Los caudales medios anuales presentan diferencias más notorias: la cuenca del río Maipo alcanza los 113 m^3/s , mientras que las cuencas del río Choapa y Aconcagua presentan 9,1 y 31,8 m^3/s respectivamente. Finalmente, las tres cuencas presentan un régimen nival, sin embargo, los máximos tienen una temporalidad diferente: en Choapa, el *peak* está más adelantado, en noviembre, Aconcagua en diciembre, y finalmente, Maipo en enero.

Tabla 3.1: Características generales de las cuencas de estudio

Cuenca	Código BNA	Área [km^2]	Elev. mín-máx (media) [m.s.n.m.]	Pendiente media [%]
Río Choapa en Cuncumén	4703002	1131	1153-5038 (3142)	23,1
Río Aconcagua en Chacabuquito	5410002	2113	936-5924 (3177)	30,0
Río Maipo en el Manzano	5710001	4839	872-6550 (3181)	27,6

Tabla 3.2: Medias anuales de variables hidro-meteorológicas para las cuencas en estudio

Cuenca	Q [m^3/s]	T [°C]	Pp [mm]
Río Choapa	9,1	6,2	336
Río Aconcagua	31,8	4,4	406
Río Maipo	113	5,1	821

3.2. Información disponible

3.2.1. Información meteorológica

En este estudio se utiliza el producto grillado CR2Met 2.0 (Boisier et al., 2018), que corresponde a un producto de precipitación, temperaturas medias y extremas para el territorio de Chile. Su resolución espacial es de 0,05°latitud-longitud (aproximadamente 5 km), y su resolución temporal diaria, durante el periodo 1979-2020. Para la precipitación, el producto se construyó en base a una regionalización estadística del reanálisis atmosférico ERA5 (Hersbach et al., 2020), en base a modelos estadísticos que consideran la topografía local, y están calibrados con observaciones locales de precipitación. Por otro lado, la temperatura se generó a partir del producto de temperatura superficial de MODIS, de la temperatura en superficie de ERA5 e información local, como la topografía y observaciones en terreno.

Además, se utilizan las estaciones meteorológicas que cuentan con registros pluviométricos de distintas instituciones como la DGA, DMC, etc. Estas se utilizan para evaluar y corregir el producto grillado de precipitaciones del CR2met. En la Figura 3.2 se observa en el panel (A) la precipitación media anual del CR2Met y las estaciones disponibles que cuentan con datos de precipitación y en el panel (B) la temperatura media anual del CR2Met.

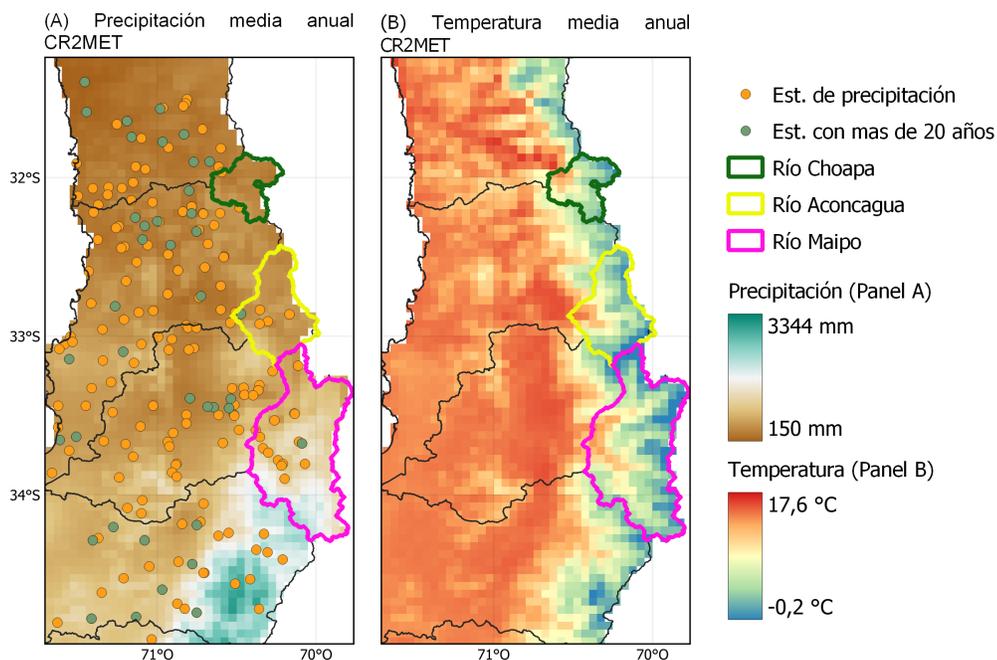


Figura 3.2: Productos de precipitación y temperatura CR2MET y la ubicación de las estaciones disponibles

3.2.2. Información fluviométrica

En la Tabla 3.3 se presentan las estaciones fluviométricas utilizadas, junto a su ubicación, elevación, y período de registro.

Tabla 3.3: Estaciones fluviométricas utilizadas en el estudio.

Estación	Lat [°S]	Lon [°O]	Elev. [m.s.n.m.]	Periodo de registro
Río Choapa en Cuncumén	31,97	70,59	1200	1965-2022
Río Aconcagua en Chacabuquito	32,85	70,51	950	1940-2022
Río Maipo en el Manzano	33,59	70,38	850	1945-2022

4. Metodología

En esta sección se detalla la metodología utilizada para (i) obtener un producto distribuido de precipitaciones diarias que se ajuste a las observaciones locales, (ii) la calibración y validación del modelo hidrológico, (iii) generar forzantes meteorológicas del período futuro, y (iv) analizar los cambios tanto de las forzantes meteorológicas como de la hidrología de eventos extremos. En la Figura 4.1 se muestra un diagrama de flujo que resume el procedimiento.

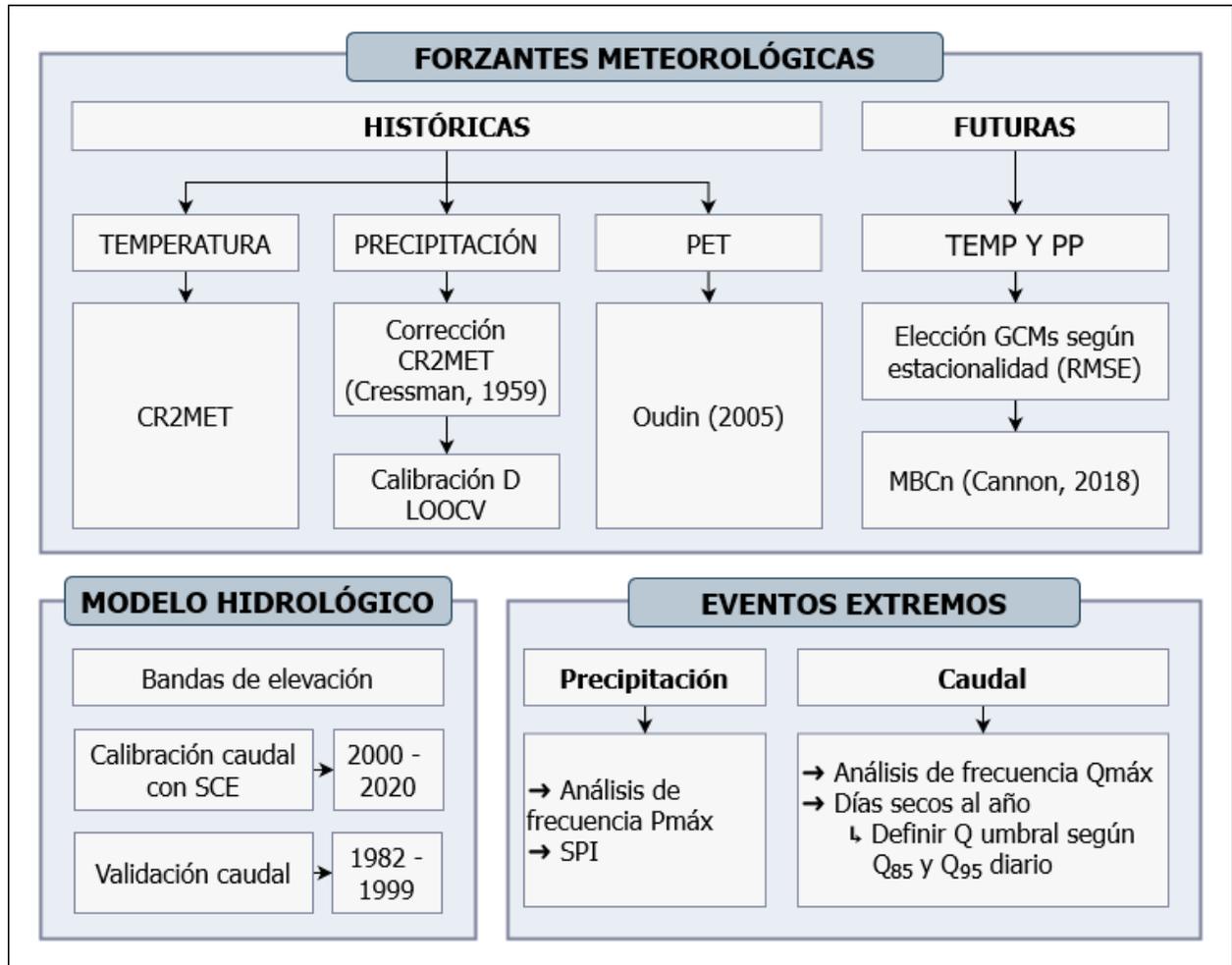


Figura 4.1: Diagrama de flujo de la metodología.

4.1. Forzantes meteorológicas

Para implementar el modelo hidrológico HBV son necesarias, a escala diaria y distribuidas en el espacio, las siguientes forzantes meteorológicas:

- Temperatura del aire
- Precipitación
- Evapotranspiración potencial

A continuación, se detalla el procedimiento para obtener las forzantes tanto en el período histórico como futuro.

4.1.1. Período histórico

La evapotranspiración potencial se obtiene utilizando el método de Oudin, el cual muestra ser un método simple pero eficiente, que depende sólo de la temperatura media diaria y la radiación extraterrestre según la latitud. Este método fue evaluado en cuatro modelos hidrológicos de tipo precipitación-escorrentía, entre los cuales se incluyó el modelo HBV (Oudin, 2005).

Para la precipitación y temperatura se utiliza el producto grillado CR2Met en su versión 2.0 (Boisier et al., 2018). Un estudio realizado por la DOH (2020) demostró que aunque el producto de precipitaciones tiene una buena capacidad de detección de eventos de precipitación, presenta sesgos importantes en cuanto a las series de precipitaciones máximas anuales en la región de Valparaíso. Por lo anterior, el producto de precipitaciones es corregido mediante observaciones, buscando representar de buena manera la distribución local de las precipitaciones.

Para conseguir un mejor ajuste del producto de precipitaciones CR2Met, este se corrige utilizando las estaciones meteorológicas disponibles en la zona de estudio (Figura 4.2). Se emplea la metodología de Cressman (1959), que consiste en aplicar una corrección a resolución diaria (C), basada en las diferencias entre las observaciones de las estaciones (P_{obs}) y el producto grillado ($P_{cr2s/corregir}$) y en la cercanía al punto a corregir, representada por un ponderador (W). Dicho ponderador depende de la distancia a la estación, y si es que este se encuentra dentro del radio de influencia (D).

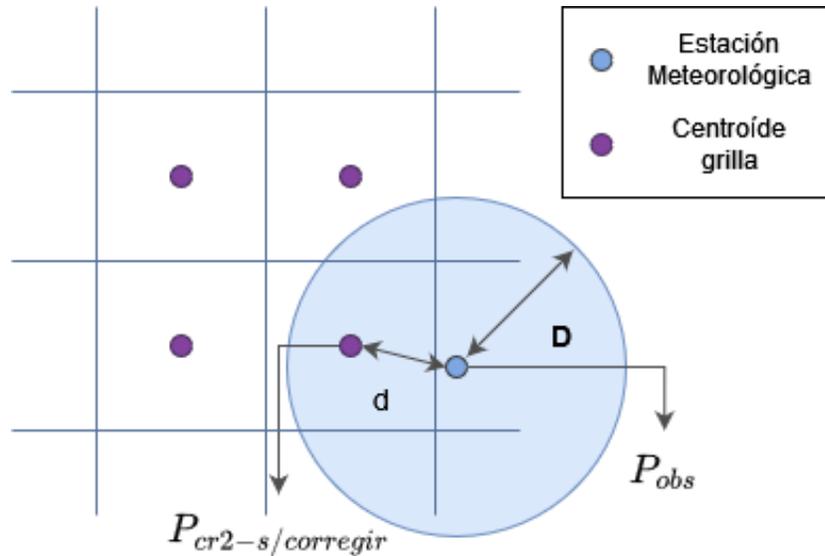


Figura 4.2: Esquema de corrección de la precipitación del producto CR2Met, mediante la metodología de Cressman (Adaptado de DOH, 2020).

Para cada estación meteorológica utilizada, se obtienen en primer lugar los pesos W que tiene sobre cada punto de la grilla dentro de su radio de influencia (Ecuación 4.1), en donde d es la distancia al centro de gravedad de cada grilla. La corrección C de cada estación en todos los píxeles dentro de su radio de influencia (Ecuación 4.3), se calcula como el producto

entre el peso W y el error $E_{obs-cr2}$ que corresponde a la diferencia entre la estimación del producto y la observación en la estación (Ecuación 4.2). Finalmente, en cada punto de la grilla, se corrige la precipitación con todas las estaciones que cumplan con la condición $d < D$ (Ecuación 4.4).

$$W = \frac{D^2 - d^2}{D^2 + d^2}, d < D \quad (4.1)$$

$$E_{obs-cr2} = P_{cr2s/corregir} - P_{obs} \quad (4.2)$$

$$C = -W \cdot E_{obs-cr2} \quad (4.3)$$

$$P_{cr2corregida} = P_{cr2s/corregir} + C \quad (4.4)$$

El radio de influencia D , que corresponde a la distancia sobre la cual se utiliza una estación para aplicar la metodología de corrección (Maglione et al., 2019), se calibra para la zona de estudio mediante validación cruzada dejando un valor afuera (LOOCV por sus siglas en inglés: Wilks, 2011). Para la calibración, se utilizan las métricas de evaluación R^2 , RMSE y el sesgo, y los radios de influencia estudiados son de 20, 30, 40 y 50 km. La validación cruzada se realiza en las estaciones que tienen más de 20 años de mediciones (estaciones en verde en la Figura 3.2).

4.1.2. Forzantes meteorológicas futuras

Para la precipitación y temperatura futuras, se utilizan las proyecciones realizadas por los GCMs correspondientes al escenario SSP5-8.5 del proyecto CMIP6. Se escogen seis GCMs según su capacidad de reproducir la estacionalidad de la precipitación en el dominio 31°S y 35°S en el período histórico, mediante el cálculo del RMSE de los ciclos mensuales normalizados por el valor medio anual. Serán seleccionados los seis GCMs que tengan menor RMSE, y serán los mismos para las tres cuencas en estudio.

Los GCMs tienen baja resolución espacial, y por esto, una gran dificultad para reproducir la distribución de las forzantes a escala local. Por lo anterior, se realiza, en primer lugar, una reducción de escala mediante el método del vecino más cercano, y posteriormente una corrección de sesgo mediante el método *Multivariate Quantile Mapping Bias Correction* (MBCn; Cannon, 2018) utilizando el producto grillado CR2Met (corregido en el caso de las precipitaciones). Se opta por un método multivariado debido a sus ventajas en la modelación de los procesos nivales, debido a la mejor representación de las precipitaciones sólidas/líquidas (Dionizis et al., 2021).

El método MBCn funciona de manera similar al método *Quantile Delta Mapping* (QDM; Cannon et al., 2015), que busca igualar las funciones de distribución acumulada de las series observada y modelada, pero considerando las series de precipitación y temperatura como co-variables no independientes. El método MBCn utiliza el algoritmo *N-Pdft* (Pitié, 2007) que corresponde a una transformación n-dimensional de las funciones de densidad de probabilidad de las variables. Entonces, se aplica iterativamente una rotación ortogonal aleatoria

a los datos, para luego aplicar el método *QDM* de las distribuciones marginales rotadas. EL método *QDM* mantiene los cambios relativos en los cuantiles proyectados por cada GCMs, corrigiendo al mismo tiempo los sesgos sistemáticos en los cuantiles de los GCMs con respecto a los valores observados.

4.2. Modelo hidrológico y calibración

En primer lugar, se obtienen las bandas de elevación de cada cuenca a partir del histograma de elevaciones de las cuencas, definiéndose cinco bandas en cada cuenca (Figura 4.3). Luego se obtienen las series de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial realizando promedios ponderados según el área de cada celda que está dentro de la banda de elevación:

$$V_{banda} = \sum_{c=1}^{NC} w_{ic} \cdot V_c \quad (4.5)$$

En donde:

- V_{banda} : valor de la variable en banda de elevación i .
- V_c : valor de la variable en la celda c .
- w_{ic} : fracción del área de la intersección entre la celda c y la banda de elevación i .
- NC : número total de celdas.

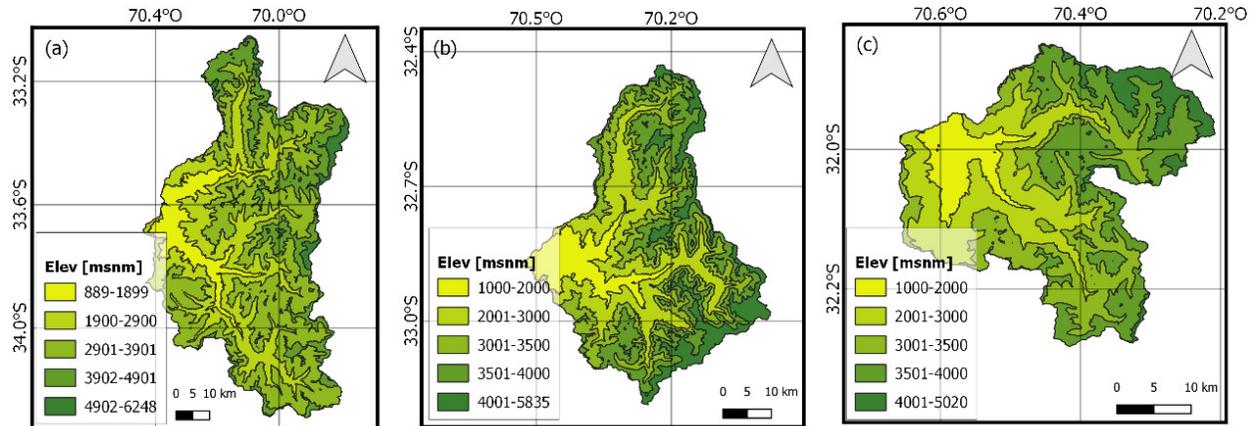


Figura 4.3: Bandas de elevación en las tres cuencas de estudio: (a) cuenca del río Maipo en el Manzano, (b) cuenca del río Aconcagua y (c) cuenca del río Choapa.

La calibración de los parámetros, se realiza mediante el algoritmo *Shuffled Complex Evolution* (SCE; Duan et al., 1993); método de optimización global que combina métodos probabilísticos y determinísticos. El algoritmo implementa una evolución sistemática de complejos de puntos buscando una mejora global aplicando el método *SIMPLEX*, combinando los puntos en los complejos evolucionados de forma competitiva. En este estudio se utilizan 10 complejos en la población inicial. Los rangos de parámetros se pueden ver en la Tabla D.1, los que son

similares a los utilizados por Seibert (2005).

La función objetivo para la calibración es el KGE (Ecuaciones 4.6 a 4.9; Gupta et al., 2009). Este es un índice de eficiencia que incluye (1) la correlación mediante el índice de correlación lineal r , (2) el sesgo representado por β obtenido como el cociente entre las desviaciones estándar (σ_s y σ_o) y (3) la variabilidad de la simulación representado por α obtenido como el cociente entre la media de la serie simulada y observada (μ_s y μ_o).

$$KGE = 1 - ED \quad (4.6)$$

$$ED = \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (4.7)$$

$$\alpha = \sigma_s / \sigma_o \quad (4.8)$$

$$\beta = \mu_s / \mu_o \quad (4.9)$$

Para analizar el desempeño del modelo, se utilizan las métricas de evaluación R^2 , RMSE, sesgo, índice de Nash-Sutcliffe (NSE) y métricas de evaluación de la curva de duración propuestas por Yilmaz et al. (2008). Estas incluyen las métricas BiasFMS que es un diagnóstico de la redistribución vertical del tramo medio de la curva de duración (entre las probabilidades de excedencia de 20 y 70) y los sesgos de los caudales altos (BiasFHV), caudales bajos (BiasFLV) y del caudal medio (BiasFMM):

$$R^2 = \left(\frac{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2}} \right)^2 \quad (4.10)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (4.11)$$

$$BiasFMS = \frac{(\log(Q_{sim-P_{0,2}}) - \log(Q_{sim-P_{0,7}})) - (\log(Q_{obs-P_{0,2}}) - \log(Q_{obs-P_{0,7}}))}{\log(Q_{obs-P_{0,2}}) - \log(Q_{obs-P_{0,7}})} \quad (4.12)$$

$$BiasFHV = \frac{\sum(Q_{sim} - Q_{obs})}{\sum Q_{obs}} \cdot 100, P_{exc} < 0,02 \quad (4.13)$$

$$BiasFLV = -100 \cdot \frac{\sum(\log(Q_{sim}) - \log(\min(Q_{sim}))) - \sum(\log(Q_{obs}) - \log(\min(Q_{obs})))}{\sum(\log(Q_{obs}) - \log(\min(Q_{obs})))}, P_{exc} > 0,7 \quad (4.14)$$

$$BiasFMM = \frac{\log(Q_{sim-med}) - \log(Q_{obs-med})}{\log(Q_{obs-med})} \quad (4.15)$$

En donde Q_{obs} es el caudal observado, Q_{sim} es el caudal simulado, \bar{Q}_{obs} y \bar{Q}_{sim} corresponden a la media de los caudales observados y simulados respectivamente, $Q_{obs-P_{0,2}}$, $Q_{sim-P_{0,2}}$, $Q_{obs-P_{0,7}}$ y $Q_{sim-P_{0,7}}$ los caudales observados y simulados con probabilidad de excedencia de 0,2 y 0,7, y finalmente, P_{exc} la probabilidad de excedencia.

El período de calibración corresponde al periodo entre abril del 2000 y marzo de 2020,

que es un período hidrológicamente diverso que contiene la megasequía que se ha desarrollado desde el año 2010 (Garreaud et al., 2020). El periodo de calentamiento corresponde a abril/1979-marzo/1982, y el periodo de validación es abril/1982-marzo/2000.

4.3. Eventos meteorológicos extremos

Para el estudio de eventos extremos meteorológicos, se analizan las proyecciones de precipitación y temperaturas de los GCMs seleccionados, analizándose dos períodos: futuro cercano (abril/2025-marzo/2055) y futuro lejano (abril/2055-marzo/2085).

4.3.1. Precipitaciones máximas

En primer lugar, se estudian cambios en las precipitaciones diarias máximas anuales y sus temperaturas asociadas en el período histórico, futuro cercano y futuro lejano. Por otro lado, para estudiar cambios en la magnitud y frecuencia, se realiza un análisis de frecuencia a las series de precipitaciones diarias máximas anuales para los periodos de retorno de 2, 10, 20 y 50 años.

Para el análisis de frecuencia, se evalúan las distribuciones enumeradas en la Figura 4.4, utilizando el test de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) y el test χ^2 , ambos con un nivel de significancia de 0,05, para cada GCM y cada periodo. Para las distribuciones que pasan ambos tests, se calculan los indicadores de K-S y χ^2 , como el cociente entre el valor del test tabulado y el valor calculado, y el estadístico Anderson-Darling (AD) (Anderson y Darling, 1954). Luego, se escoge la distribución que pondere el mínimo entre los tres indicadores.

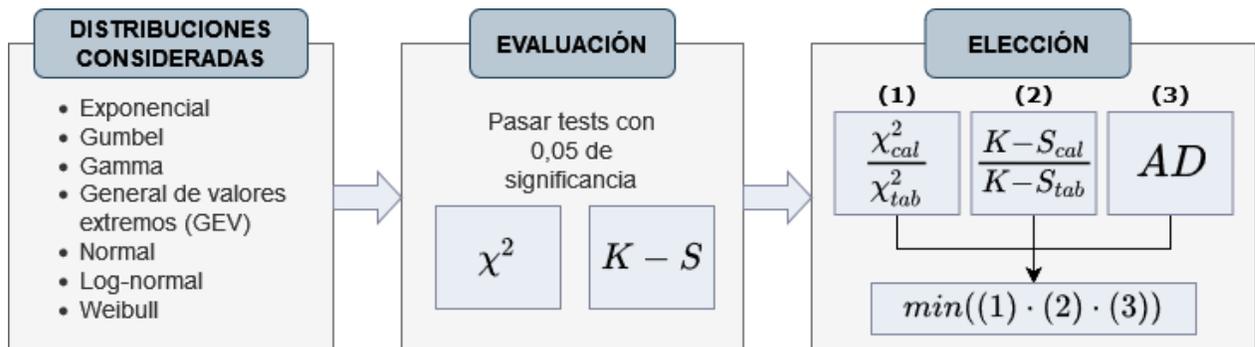


Figura 4.4: Diagrama de flujo de la metodología seguida para el análisis de frecuencia.

4.3.2. Sequías

Con el objetivo de analizar las sequías meteorológicas, se utiliza el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, por sus siglas en inglés; McKee et al., 1993), el que se basa únicamente en la precipitación, lo que lo hace simple de calcular. El SPI compara la precipitación mensual de una región durante un período, que puede ser de 1 a 36 meses (notación SPI-n, con n el número de meses), con la precipitación en esa misma región a largo plazo, de al menos 30

años idealmente. El SPI se calcula ajustando una distribución de probabilidad acumulada al registro de largo plazo, que es transformada a una distribución normal, por lo que la media del SPI es cero. Variaciones positivas en precipitación se traducen en índices SPI positivos, mientras que, el déficit de precipitación se traduce en valores negativos de SPI. Un evento de sequía se caracteriza por valores de SPI menores a -1.

En este trabajo, se calcula el SPI-12 para los períodos histórico, futuro cercano y futuro lejano, y se estudian cambios en los valores promedios de:

- **Magnitud:** el valor promedio del SPI en un evento de sequía.
- **Duración:** la duración de eventos de SPI menor a -1.
- **Intensidad:** la magnitud dividida por la duración.
- **Número de sequías** con SPI menor a -1.
- **Número de meses secos** con SPI menor a -1.
- **Sequía más larga** con SPI menor a -1.

4.4. Eventos extremos hidrológicos

4.4.1. Crecidas

Para estudiar los eventos de crecidas, se realiza el mismo análisis que para las precipitaciones máximas anuales (Sección 4.3.1; Figura 4.4), separando dos períodos al año: el período asociado a eventos de lluvia que dan origen a crecidas pluviales (abril a septiembre) y el período asociado a meses de bajas precipitaciones en el que ocurren crecidas de deshielo (octubre a marzo).

4.4.2. Sequías

Para el estudio de sequías hidrológicas, se calculan dos indicadores de caudales por debajo al observado históricamente: el primer indicador corresponde a número de días de sequía y el segundo a número de días consecutivos de sequías. Se compara la cantidad de días de cada índice resultantes entre los períodos históricos, futuro cercano y lejano.

Los días de sequía corresponden a los días del año para los cuales el caudal medio diario está por debajo del observado históricamente ese mismo día. Para esto, se define un caudal umbral de probabilidad de excedencia de 85 % (sequía moderada) y 95 % (sequía severa) durante el período histórico. Este valor umbral es diferente para cada día del año, calculado con 30 valores provenientes de 30 años hidrológicos, obteniéndose una curva anual de caudales umbrales de sequía moderada y severa. Luego, para la serie proyectada de caudales, se compara cada caudal medio diario con el caudal umbral del período histórico y se define si ese día corresponde a un día seco o no. El procedimiento anterior, se realiza por separado para las series simuladas para cada GCM. Es decir, se construye la serie umbral histórica para los caudales generados a partir de cada GCM, y se comparan sólo con las series futuras

proyectadas a partir del mismo GCM.

Para el indicador de número de días consecutivos secos, se calcula el máximo de días seguidos para los que se tiene una condición de sequía cada año. Luego, se comparan los promedios de días consecutivos secos para cada periodo de estudio y GCM.

5. Resultados

En esta sección se presentan, en primer lugar, los resultados de la corrección del producto grillado de precipitación del CR2Met. Luego, se presentan los GCMs seleccionados y las proyecciones diarias de precipitación y temperaturas en el período futuro obtenidas a partir del escalamiento. Después, se muestran los resultados de la calibración y validación del modelo HBV en las tres cuencas de estudio: río Choapa en Cuncumén, río Aconcagua en Chacabuquino y río Maipo en el Manzano. Posterior a esto, se muestran los resultados de proyecciones de eventos extremos de precipitación y temperatura. Finalmente, se muestran los resultados de análisis de frecuencia de caudales medios diarios máximos anuales y proyecciones de sequías hidrológicas.

5.1. Forzantes meteorológicas

5.1.1. Periodo histórico

A partir de la corrección del producto de precipitación del CR2Met, mediante el método de Cressman, se obtiene el producto de precipitación corregido del CR2Met (CR2Met corregido de ahora en adelante). El radio de influencia utilizado es de 30 kilómetros, el cual demostró ser el que minimiza el error cuadrático medio, disminuyendo el sesgo y aumentando la correlación R^2 sin mostrar valores *outliers*, como sucede con los diámetros de 40 y 50 kilómetros (Figura A.1).

En la Figura 5.1 se observa la evaluación del producto de precipitación CR2Met bruto, y luego de la corrección. El panel izquierdo muestra que el estadístico NRMSE disminuye luego de la corrección del producto CR2Met, sin embargo, esta disminución es menor en las zonas de mayor elevación. En general, todos los estadísticos mejoran al corregir el producto CR2Met (panel derecho): el R^2 se acerca a 1, el RMSE disminuye en promedio a 2 milímetros y, en general, el sesgo se acerca a 0 %.

El producto corregido (Figura 5.2) presenta zonas en donde las precipitaciones máximas anuales promedio disminuyen hasta en 12 milímetros y otras donde hay aumentos de hasta 16 milímetros. Particularmente, en la zona de estudio, la cuenca del río Maipo en el Manzano presenta disminuciones de hasta 7 milímetros. Las cuencas de los ríos Choapa y Aconcagua no presentan grandes correcciones, mostrando algunas celdas con variaciones de hasta 2 milímetros. En cuanto a la precipitación media anual, la cuenca río Maipo presenta variaciones de hasta 150 milímetros en ciertos píxeles, mientras que las otras dos cuencas presentan variaciones mínimas sin ser corregidas en su mayoría (Figura A.2).

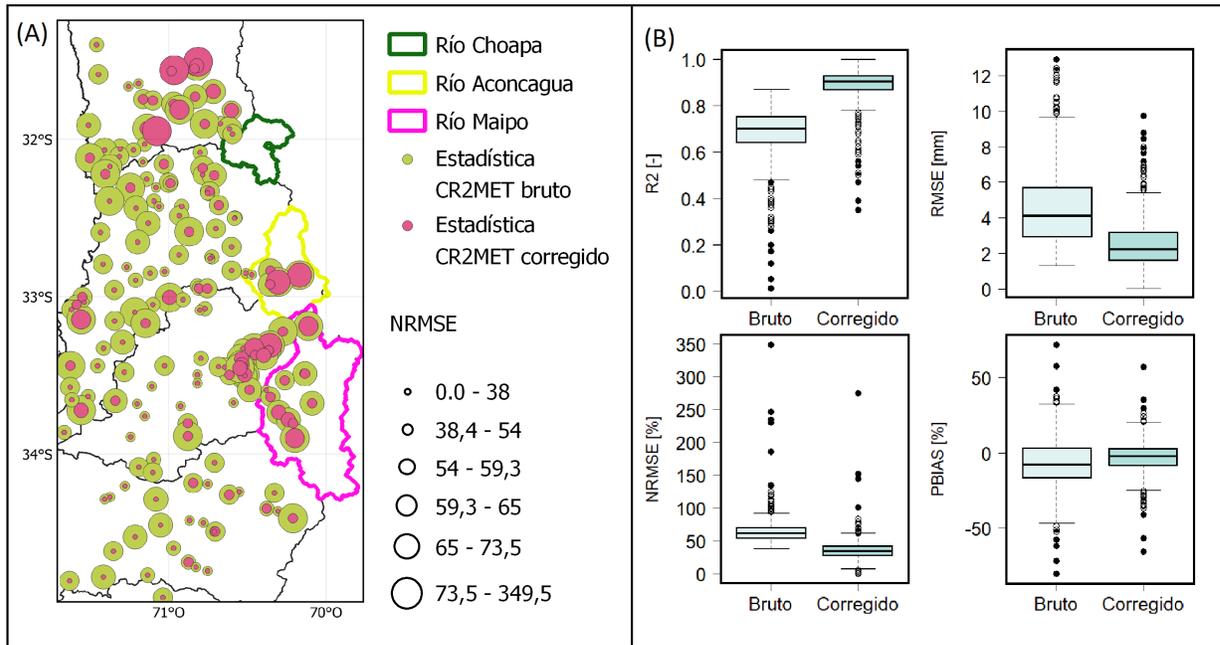


Figura 5.1: Evaluación de las precipitaciones del producto CR2Met bruto y corregido con estaciones: (A) mapa de distribución del estadístico NRMSE y (B) estadísticos R^2 , RMSE, NRMSE y PBIAS promedio en la extensión del mapa.

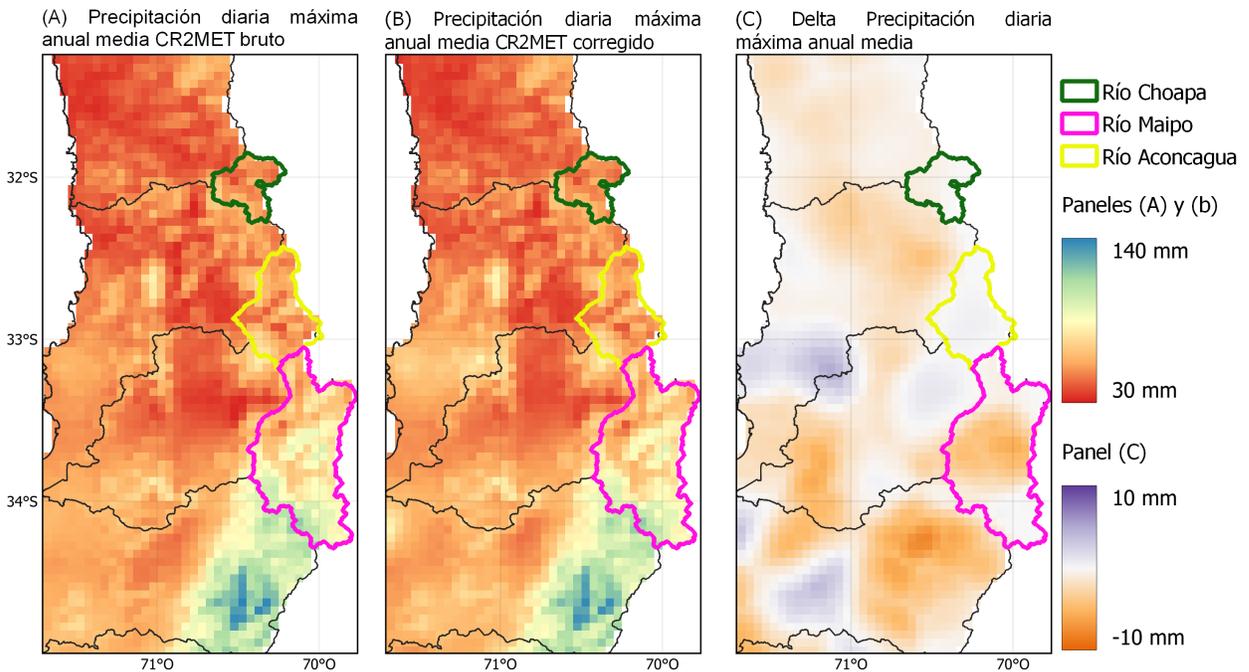


Figura 5.2: Corrección producto de precipitaciones CR2Met en cuanto a precipitaciones diarias máximas anuales

5.1.2. Período futuro

En la Figura 5.3 se muestran los GCMs seleccionados y eliminados crudos (previos al escalamiento). Los estadísticos (RMSE) de la evaluación de los GCMs se presentan en el Anexo B. Se seleccionaron los con mayor capacidad de reproducir la estacionalidad de la precipitación, minimizando la suma del RMSE en los valores estacionales de la precipitación normalizada por la precipitación media anual. Los GCMs seleccionados muestran valores de RMSE acumulado menores a 0,002 milímetros (Tabla B.1). Se puede apreciar que todos los GCMs estudiados sobrestiman la temperatura durante el año. En cuanto a la precipitación, los GCMs eliminados presentan leves sesgos positivos de precipitación en los meses de verano. En la Tabla 5.1 se muestran los GCMs seleccionados, las instituciones a cargo y la resolución espacial de cada producto.

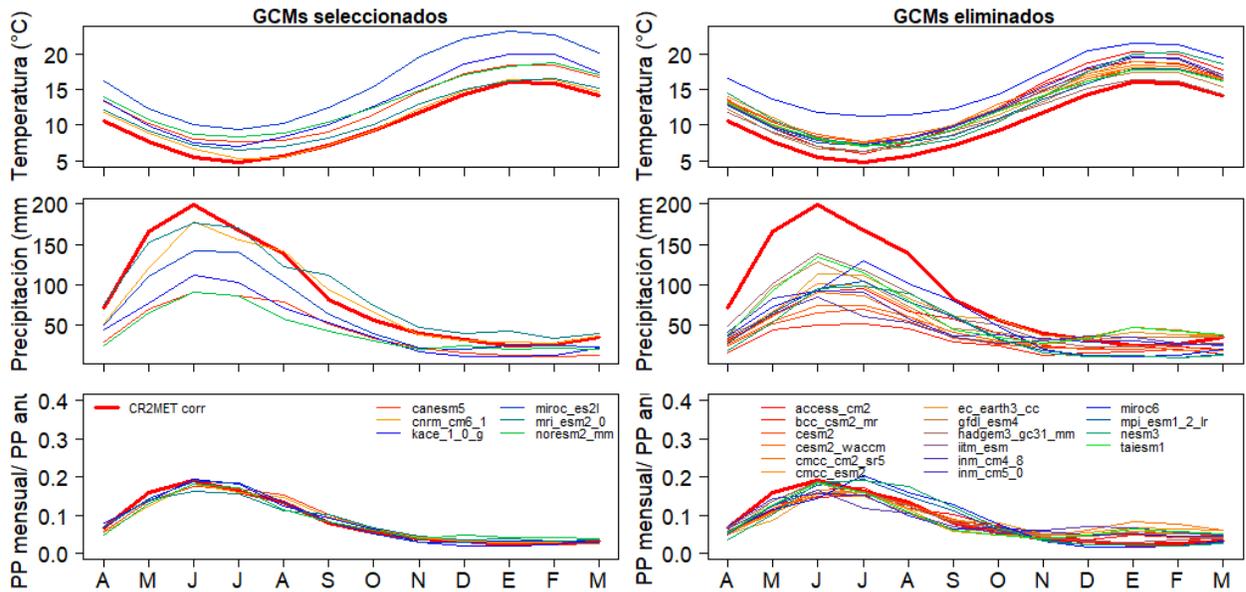


Figura 5.3: GCMs seleccionados y eliminados según su capacidad de reproducir la estacionalidad en la zona de estudio.

Tabla 5.1: Propiedades de los 6 GCMs escogidos.

Nombre GCM	Centro de modelación	Resolución [lon x lat]
Can ESM5	Canadian Centre for Climate Modelling an Analysis	2,8x2,8°
CNRM-CM6	Centre National de Recherches Meteorologiques	1,4x1,4°
KACE-1-0-G	National Institute of Meteorological Sciences-Korea	1,875x1,25°
MIROC-ES2L	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	1,4x1,4°
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute	1,12x1,12°
NorESM2-MM	NorESM Climate modeling Consortium	2,5x1,875°

Luego de realizar el escalamiento estadístico con el método multivariado, se obtienen series diarias de precipitación y temperatura con una resolución espacial de 5 kilómetros. Las series anuales proyectadas para cada cuenca se pueden ver en el Anexo C. En la Tabla 5.2 se muestran las variaciones de precipitaciones y temperaturas para las cuencas en estudio, para los períodos del futuro cercano y futuro lejano, en relación al período histórico. En el futuro cercano no existen grandes variaciones en la precipitación media anual en ninguna cuenca,

aumentando entre 0,6 y 3,2 %, y, por otro lado, se observan aumentos de cerca de 1,7°C en las tres cuencas. En el período futuro lejano las precipitaciones medias anuales sufren una disminución importante, alcanzando hasta un 12 % menos en la cuenca del río Maipo. Por otro lado, se proyectan aumentos de más de 3 °C para el período 2055-2085, en las tres cuencas de estudio.

Tabla 5.2: Variación de precipitaciones y temperatura en los periodos futuro cercano y futuro lejano, en relación al periodo histórico, en las tres cuencas de estudio.

Período	Futuro cercano 2025-2055		Futuro lejano 2055-2085	
	ΔP [%]	ΔT [°C]	ΔP [%]	ΔT [°C]
Choapa	+3,2	+1,7	-9,5	+3,3
Aconcagua	+2,0	+1,7	-9,4	+3,3
Maipo	+0,6	+1,6	-12,9	+3,2

5.2. Calibración y validación del modelo hidrológico

El modelo HBV se calibra y valida en las tres cuencas de estudio, obteniendo los parámetros y las métricas de diagnóstico presentados en el Anexo D. A continuación, se presenta el detalle de la implementación del modelo HBV por cuenca.

5.2.1. Cuenca del río Choapa en Cuncumén

La Figura 5.4 muestra la serie de caudales medios diarios observada y simulada en los períodos de calentamiento, validación y calibración. Para el período de calibración, se obtiene un buen ajuste, con índices KGE y NSE sobre 0,7, los que disminuyen en el período de validación, manteniéndose un buen desempeño (valores sobre 0,6) para ambos índices.

En la curva de duración (Figura 5.5) se evidencia la dificultad del modelo de reproducir los caudales bajos, presentando sesgos de -86 % en el índice BiasFLV en el período de calibración, lo que se agudiza aún más en el período de validación alcanzando valores de -113 %. En cuanto a los caudales altos, el modelo tiene un buen desempeño en el período de calibración (BiasFHV de 3,88 %), no así en el período de validación, alcanzando un 29 %. Finalmente, los caudales del tramo medio, presentan sesgos (BiasFMS) menores al 2 % tanto para el período de calibración como de validación.

Los resultados anteriores se complementan con la exploración de ajustes de los caudales máximos anuales y caudales bajos con 95 % de probabilidad de excedencia (Figura 5.6). Se observa que los caudales máximos anuales tienen un buen ajuste (R^2 mayor a 0,8 para período de calibración y validación), mientras que los caudales bajos son subestimados por el modelo tanto en el período de calibración como de validación presentando sesgos negativos que rodean el 50 %.

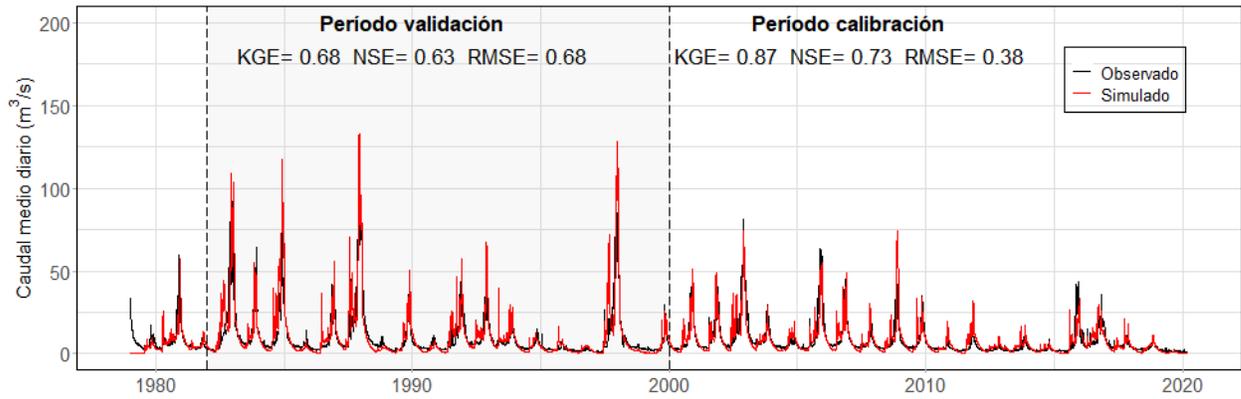


Figura 5.4: Series de caudales medios diarios observados y simulados en los períodos de validación y calibración en la cuenca río Choapa en Cuncumén

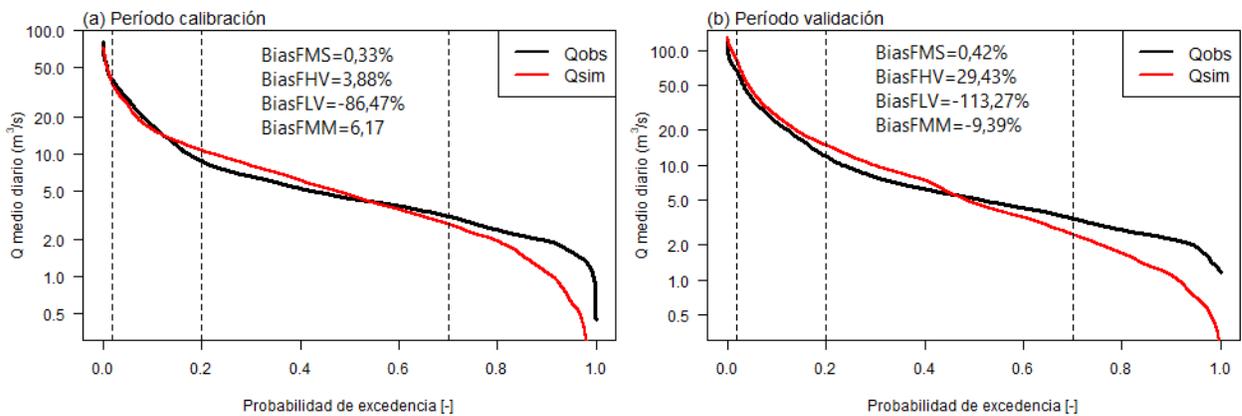


Figura 5.5: Curva de duración observada y simulada en el período de calibración y validación en la cuenca río Choapa en Cuncumén

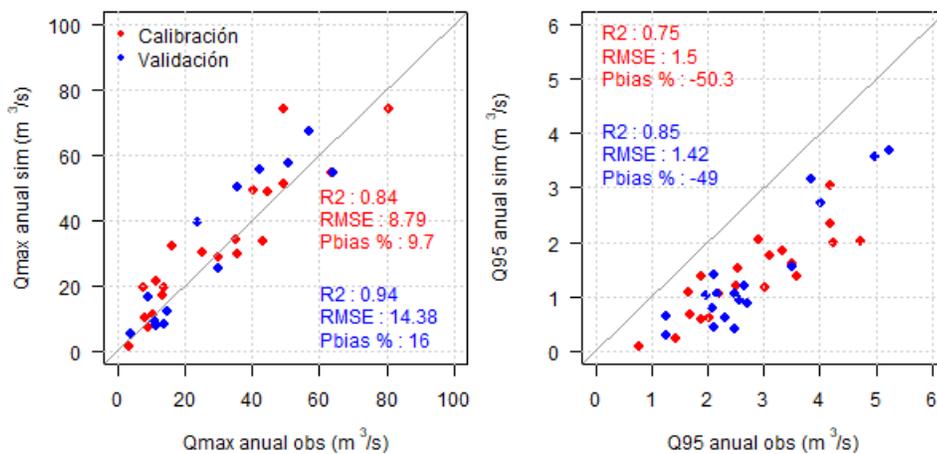


Figura 5.6: Ajustes del modelo en cuanto a caudales medios diarios máximos anuales y caudales medios diarios con 95 % de probabilidades de excedencia en cada año, para períodos de calibración y validación en la cuenca río Choapa en Cuncumén

5.2.2. Cuenca del río Aconcagua en Chacabquito

En la Figura 5.7, se observan las series diarias simuladas y observadas para la cuenca río Aconcagua en Chacabquito. Para el período de calibración se obtiene un buen ajuste, con índices KGE y NSE sobre 0,84, los que disminuyen en el período de validación, manteniéndose un buen desempeño con valores sobre 0,69 para ambos índices. En la curva de duración (Figura 5.8) se evidencia la dificultad del modelo de reproducir los caudales bajos (menores a $10 \text{ m}^3/\text{s}$) presentando sesgos de -74% en el período de calibración, aumentando a -103% en el período de validación en el BiasFLV. El modelo muestra una buena capacidad de reproducir los caudales de la parte media y alta con valores menores a 6% para todos los índices a excepción del BiasFHV de 16% en el período de validación.

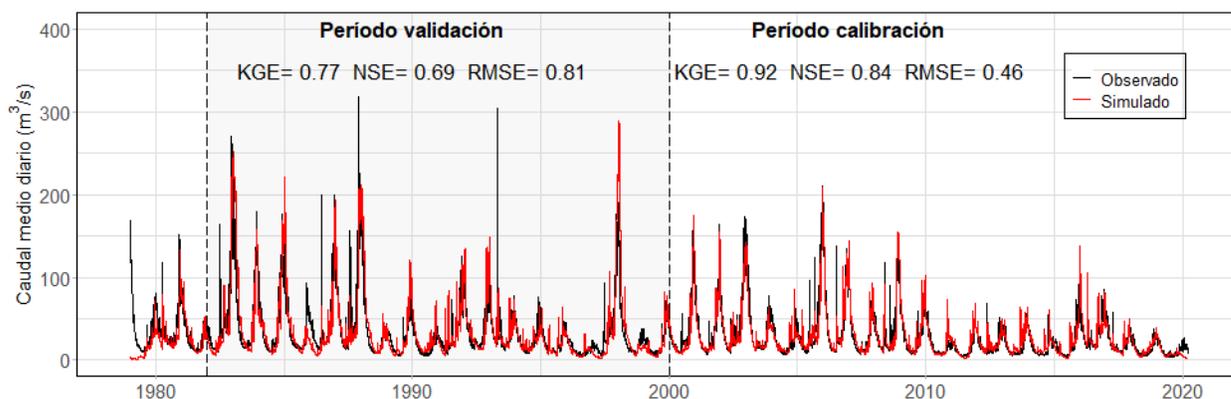


Figura 5.7: Series de caudales medios diarios observados y simulados en los períodos de validación y calibración en la cuenca río Aconcagua en Chacabquito.

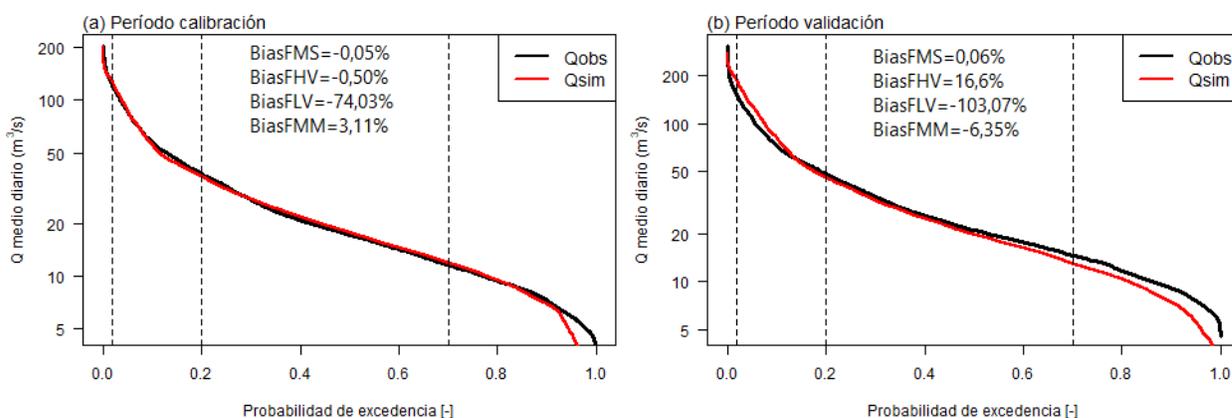


Figura 5.8: Curva de duración observada y simulada en el período de calibración y validación en la cuenca río Aconcagua en Chacabquito

EL modelo simula de buena manera los caudales medios diarios máximos anuales en el período de calibración (R^2 de 0,9), sin embargo, este decae notoriamente a 0,5 en el período de validación, donde se observan 4 años en los que el modelo no tiene un buen desempeño (caudales medios diarios por sobre los $200 \text{ m}^3/\text{s}$). Análogamente, existe un notorio

decaimiento de 0,82 a 0,39 en el R^2 en el período de validación con respecto al de calibración, para los caudales con probabilidad de excedencia de 95 % (Figura 5.9).

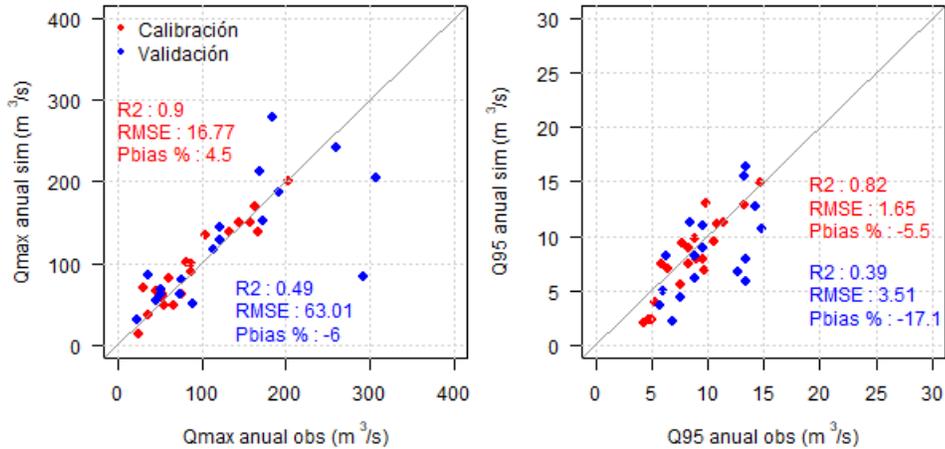


Figura 5.9: Ajustes del modelo en cuanto a caudales medios diarios máximos anuales y caudales medios diarios con 95 % de probabilidades de excedencia en cada año, para períodos de calibración y validación en la cuenca río Aconcagua en Chacabucuito

5.2.3. Cuenca del río Maipo en el Manzano

En la Figura 5.10 se observan los caudales simulados para la cuenca río Maipo en el Manzano. El modelo tiene un buen desempeño, con índices de NSE y KGE sobre 0,68 tanto para el período de calibración como de validación. En la Figura 5.11 observa un buen rendimiento para toda la curva de duración, con sesgos menores a 15 % para todos los tramos, a excepción de los caudales bajos en el período de validación con un índice BiasFLV de -96 %.

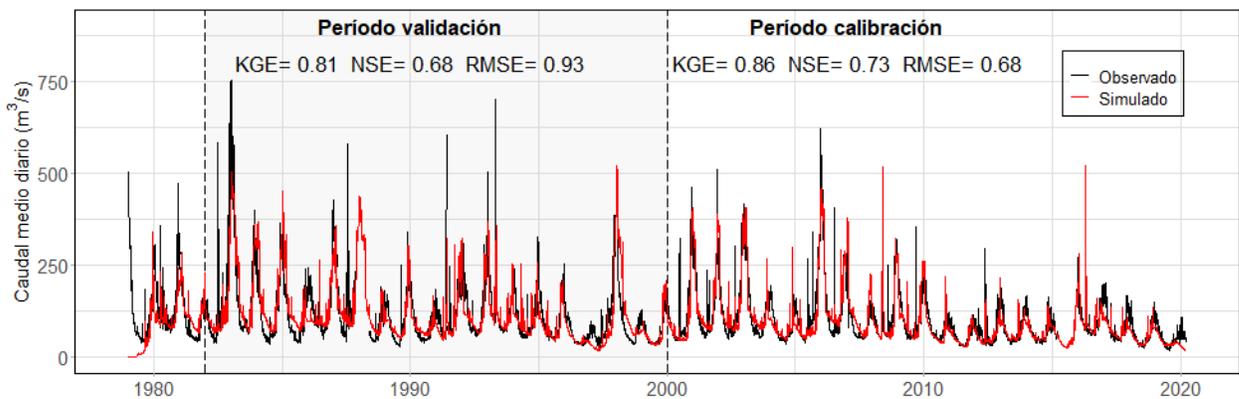


Figura 5.10: Series de caudales medios diarios observados y simulados en los períodos de validación y calibración en la cuenca río Maipo en el Manzano

Por otro lado, el modelo presenta un pobre desempeño en la capacidad de reproducir los caudales máximos anuales, teniendo un R^2 de 0,77 en el período de calibración, que decae a 0,4 en el período de validación (Figura 5.12). En cuanto a los caudales medios diarios que son

excedidos el 95 % del tiempo los resultados son menos confiables, obteniéndose R^2 menores a 0,5 tanto en el período de calibración como de validación.

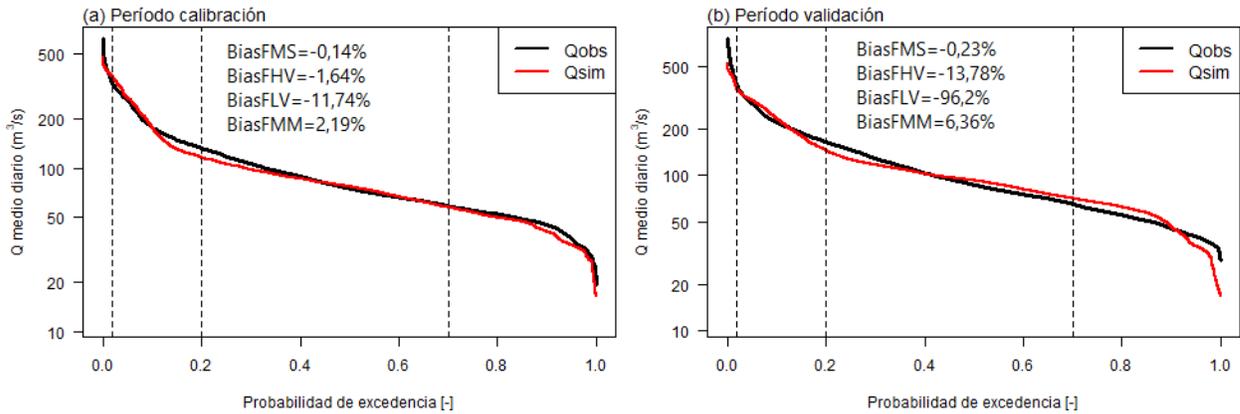


Figura 5.11: Curva de duración observada y simulada en el período de calibración y validación en la cuenca río Maipo en el Manzano

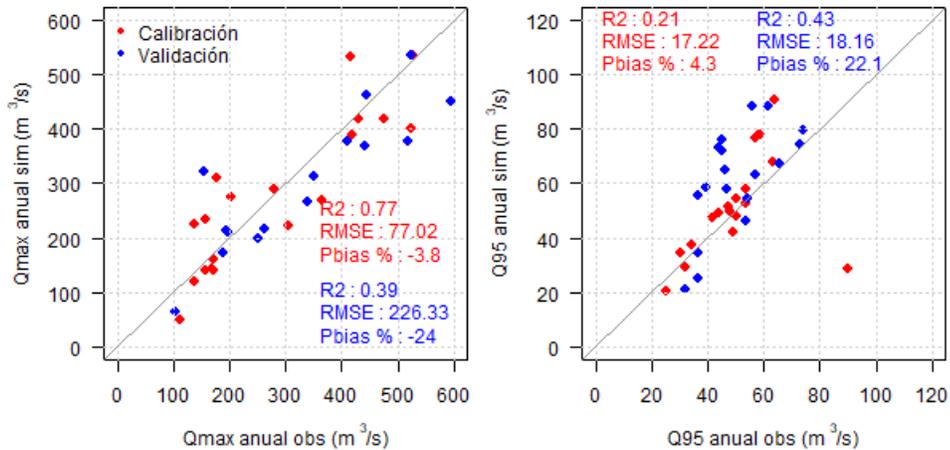
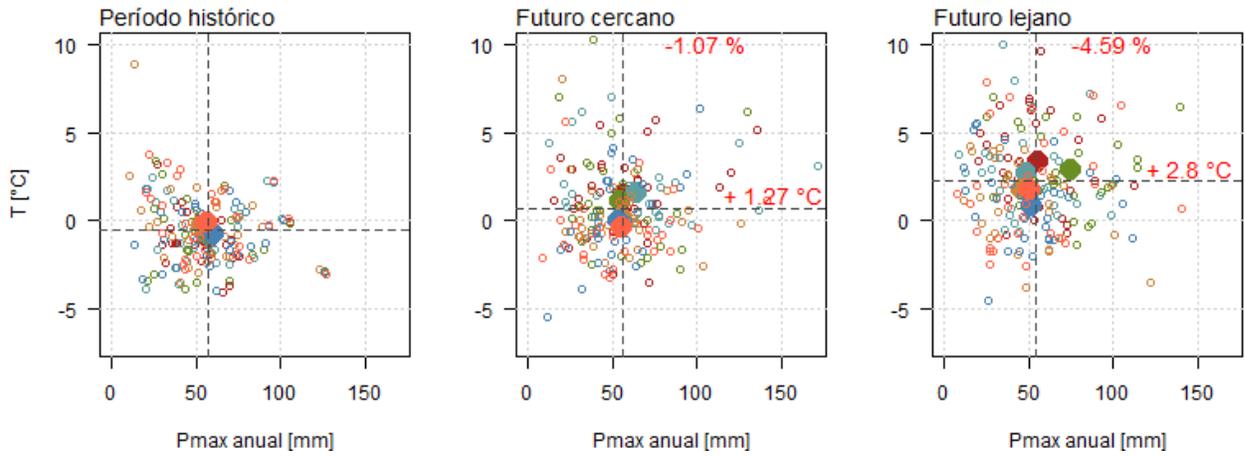


Figura 5.12: Ajustes del modelo en cuanto a caudales medios diarios máximos anuales y caudales medios diarios con 95 % de probabilidades de excedencia en cada año, para períodos de calibración y validación en la cuenca río Maipo en el Manzano

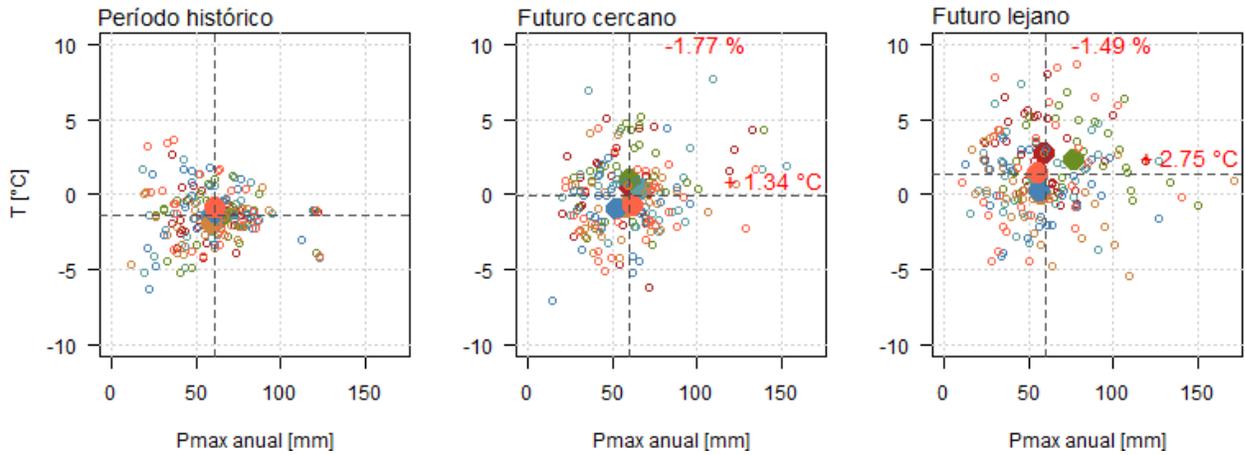
5.3. Eventos meteorológicos extremos

5.3.1. Precipitaciones máximas

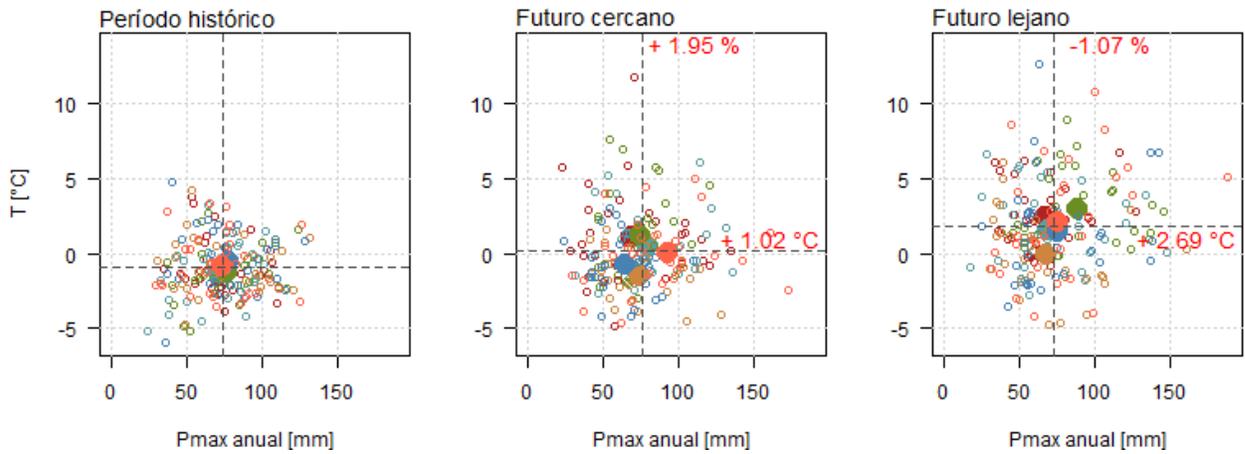
Al proyectar precipitaciones diarias hacia el futuro, se determinan los valores máximos anuales de precipitación y sus temperaturas asociadas para cada GCM (Figura 5.13). La precipitación diaria máxima anual presenta en general disminuciones entre 1 y 2 % para ambos periodos futuros, exceptuando una disminución del 5 % para el futuro lejano en la cuenca del río Choapa y un aumento del 2 % para el futuro cercano en la cuenca del río Maipo en el Manzano.



(a) Cuenca río Choapa en Cuncumén



(b) Cuenca río Aconcagua en Chacabuquito



(c) Cuenca río Maipo en el Manzano

Figura 5.13: Precipitaciones máximas anuales y sus temperaturas asociadas, para el período histórico (abril/1985-mar/2014), futuro cercano (abr/2025-mar/2055) y lejano (abr/2055-mar/2055) para las tres cuencas en estudio. Los círculos representan los valores anuales, con cada color un GCM; los círculos rellenos el promedio climatológico por GCM durante el periodo; y los valores en rojo el valor promedio entre todos los GCMs para cada periodo.

Las variaciones en las temperaturas asociadas a estos eventos de precipitaciones muestran diferencias considerables, teniendo aumentos entre 1 y 1,4°C para el futuro cercano y aumentos superiores a 2,5°C en el futuro lejano para todas las cuencas, proyectando tormentas más cálidas hacia el futuro.

La dispersión de los eventos meteorológicos mencionados anteriormente, también presentan variaciones entre cada período: la desviación estándar de ambas variables aumenta en los períodos futuros, en relación al histórico (Figura 5.14), en las tres cuencas de estudio, indicando mayor variabilidad tanto en las precipitaciones como en sus temperaturas asociadas. Para el futuro cercano, las desviaciones estándar de la temperaturas aumentan entre 0,5 y 0,8 °C con respecto al histórico, mientras que las precipitaciones aumentan entre 3 y 5 milímetros para las tres cuencas. Estas variaciones en las desviaciones estándar aumentan aún más para el futuro lejano, aumentando casi 1 °C en la temperatura y cerca de 8 milímetros en la precipitación, a excepción de la cuenca del río Choapa, que la desviación estándar de la precipitación se mantiene muy similar en ambos períodos futuros.

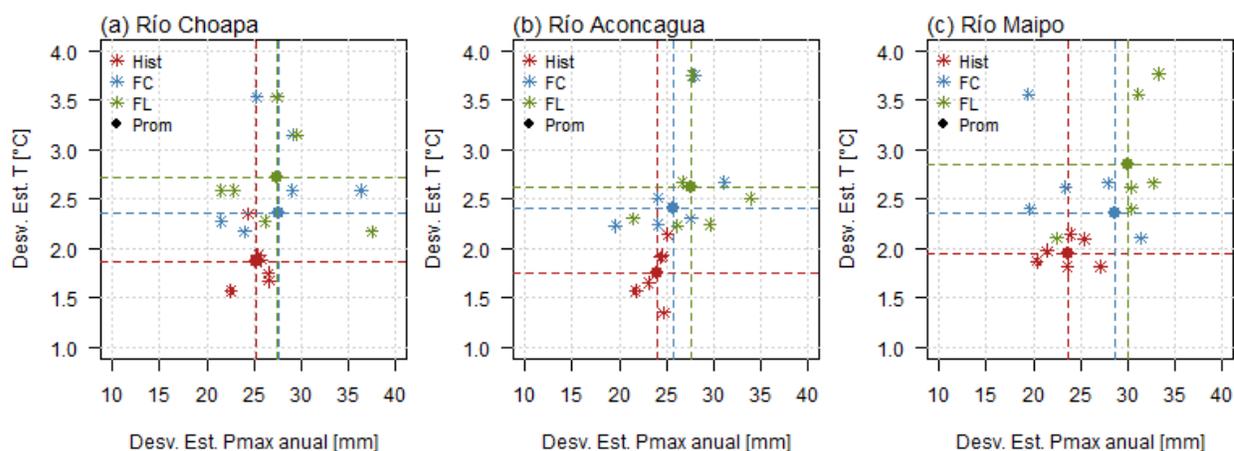


Figura 5.14: Desviación estándar de la precipitación diaria máxima anual y de su temperatura asociada, por GCM, para las tres cuencas y los tres períodos de estudio. Los puntos y las líneas punteadas representan el promedio de todos los GCM para cada período.

Por otro lado, el análisis de frecuencia de las precipitaciones diarias máximas anuales (Figura 5.15 y Tabla 5.3; Anexo F) indica que para períodos de retorno bajos, de 2 años, las precipitaciones máximas disminuyen en ambos períodos futuros en todas las cuencas; el promedio de las variaciones es entre un -2,9 y un -9,4%. Para períodos de retorno mayores, en el futuro cercano se proyectan aumentos en los valores de precipitación máxima anual en las tres cuencas de estudio, teniendo aumentos promedios entre un 0,2 y 8,4%, donde las mayores variaciones se dan para el período de retorno de 50 años.

Para el futuro lejano, se tienen resultados diferentes; la cuenca del río Choapa en Cuncumén presenta disminuciones en la precipitación máxima anual en todos los períodos de retorno, alcanzando hasta 14,5% para T=2 años, a excepción del período de retorno que la variación es en promedio casi nula (0,5%). Las cuencas de los ríos Aconcagua y Maipo, al contrario, presentan aumentos para períodos de retorno superiores a 10 años, con incrementos

promedios cercanos al 20 % (19,8 % y 18,3 % respectivamente) en el caso de T=50 años en ambas cuencas.

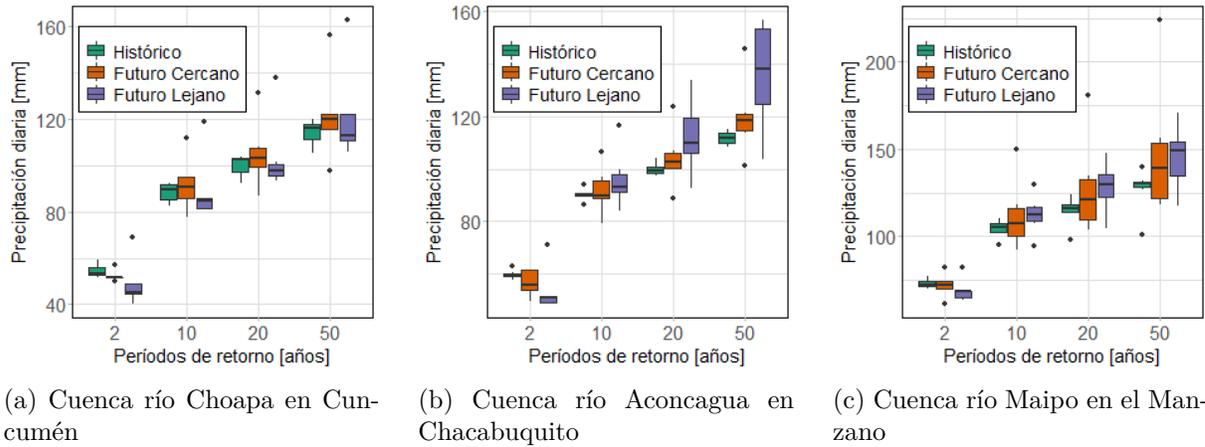


Figura 5.15: Resultado análisis de frecuencia para las precipitaciones máximas anuales en las tres cuencas en estudio

Tabla 5.3: Variación porcentual entre las precipitaciones asociadas a cada periodo de retorno entre los periodos futuros y el periodo histórico, para cada cuenca de estudio

Cuenca Río Choapa				
Periodo	ΔP_p T=2 [%]	ΔP_p T=10 [%]	ΔP_p T=20 [%]	ΔP_p T=50 [%]
FC	-4,3	0,2	1,2	2,0
FL	-14,5	-4,6	-2,1	0,6
Cuenca Río Aconcagua				
Periodo	ΔP_p T=2 [%]	ΔP_p T=10 [%]	ΔP_p T=20 [%]	ΔP_p T=50 [%]
FC	-5,1	-1,8	3,0	5,5
FL	-6,5	1,93	12,2	19,8
Cuenca río Maipo				
Periodo	ΔP_p T=2 [%]	ΔP_p T=10 [%]	ΔP_p T=20 [%]	ΔP_p T=50 [%]
FC	-2,9	0,9	4,1	8,4
FL	-9,4	8,8	12,7	18,3

5.3.2. Sequía meteorológica

La Figura 5.16 muestra los indicadores de sequías meteorológicas obtenidos a partir del índice SPI-12 para las tres cuencas. En la cuenca del río Choapa en Cuncumén, se puede observar que la duración de los eventos de sequía, con SPI-12 menor a 1, no tienen una tendencia clara. La cantidad de eventos de sequías no varía considerablemente, mostrando valores cercanos a 0 en el futuro cercano, mientras que en el futuro lejano existen GCMs que muestran aumentos de hasta 3 eventos, teniendo en promedio un aumento de 1 evento de sequía. Existe un aumento en promedio de 8 meses secos para el futuro lejano, no así en el futuro cercano. La magnitud de las sequías no presenta grandes variaciones, y se muestran

leves aumentos en cuanto a la intensidad ($<0,1$), debido a la mantención de la magnitud y aumento de los meses secos. En cuanto a la sequía más larga, se proyectan, en promedio, sequías más largas tanto para el período cercano como lejano, con valores entre 2 y 17 meses.

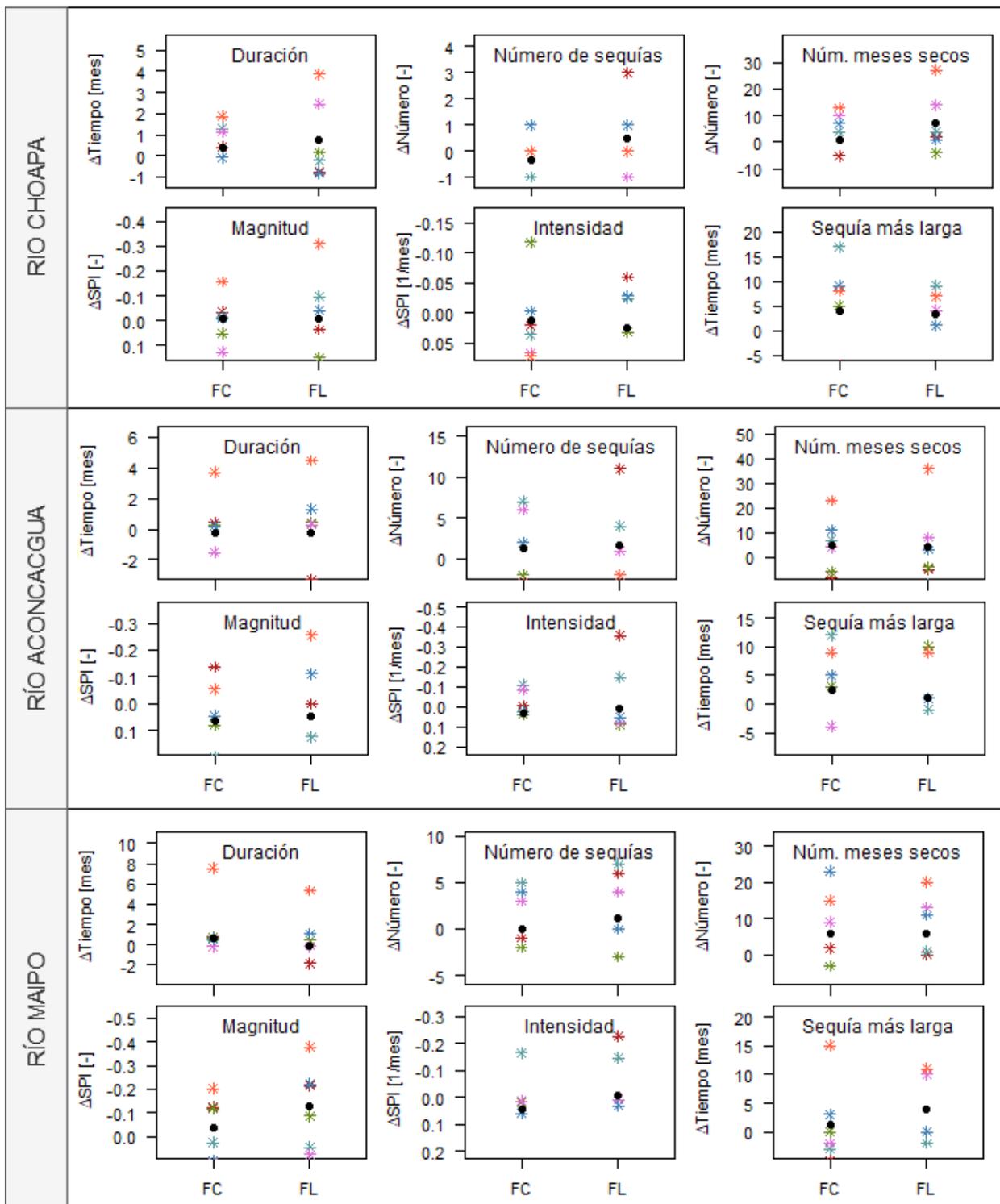


Figura 5.16: Variaciones de eventos de sequías para índices de SPI menores a 1 en las tres cuencas de estudio. Cada color representa un GCM diferente, y el punto negro representa el promedio de todos ellos.

Por otro lado, la cuenca del río Aconcagua en Chacabuquito no muestra variaciones importantes en cuanto a duración, número de sequías y magnitud. En promedio las variaciones de estos indicadores muestran valores cercanos a 0, existiendo dispersión entre GCMs. La cantidad de meses con SPI-12 menores a 1, muestra en promedio aumentos de 5 meses secos para ambos períodos.

Finalmente, la cuenca río Maipo en el Manzano no presenta tendencias en cuanto a duración y número de sequías. En cambio, presenta aumentos en cuanto a la magnitud y el número de meses secos, lo que no se ve reflejado directamente en la intensidad de dichos eventos. Se observa además un aumento en la duración de la sequía mas larga en ambos periodos futuros, llegando a aumentar en promedio 5 meses para el futuro lejano.

En el Anexo F se presentan las frecuencias de valores de SPI para cada período, en las tres cuencas de estudio. Por otro lado, en el Anexo E, se presentan las series de SPI en cada periodo, para las cuencas.

5.4. Eventos extremos hidrológicos

5.4.1. Crecidas

Las distribuciones utilizadas para el análisis de frecuencia de los caudales medios diarios se presentan en el Anexo I. Las Figuras 5.17, 5.18 y 5.19 muestran los resultados de los caudales medios diarios máximos para los períodos nivales y pluviales para distintos períodos de retorno en las tres cuencas en estudio. En las Tablas 5.4 y 5.5 se presentan las variaciones promedio de los caudales medios diarios entre el periodo histórico y ambos periodos futuros, para el periodo pluvial y nival, respectivamente.

Las tres cuencas presentan aumentos de caudales máximos en el período pluvial, siendo mayores en el futuro lejano e intensificándose en las cuencas del sur, con variaciones de 191 y 129 % para períodos de retorno de 50 años en las cuencas del Aconcagua y del Maipo, respectivamente. Por otro lado, se tiene una disminución generalizada en los caudales máximos para los períodos de derretimiento de nieve, para todos los periodos de retorno, siendo más severa la disminución en el periodo futuro lejano, llegando a una disminución del 66 % en los caudales de período de retorno de 2 años, en el futuro lejano en la cuenca del río Choapa.

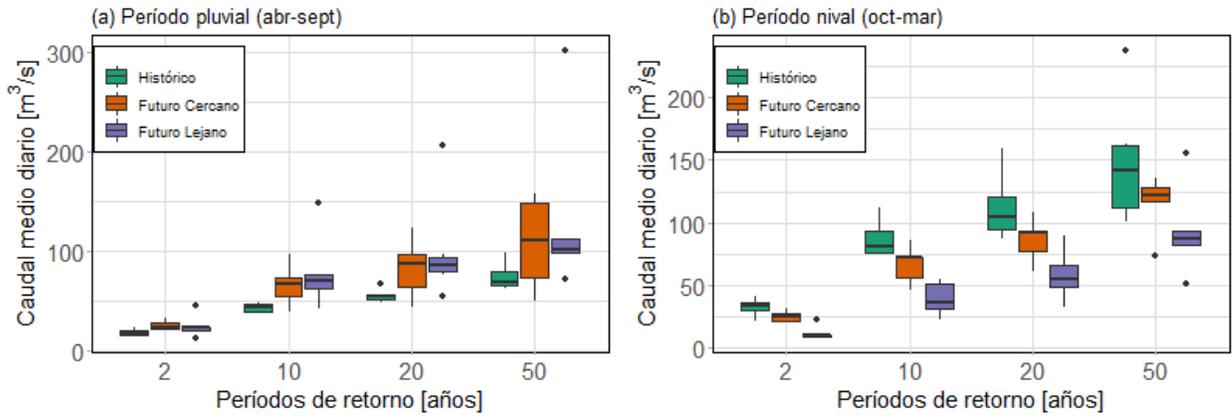


Figura 5.17: Caudales máximos medios diarios para períodos pluvial y nival para distintos períodos de retorno en el futuro cercano y lejano para la cuenca Río Choapa en Cuncumén

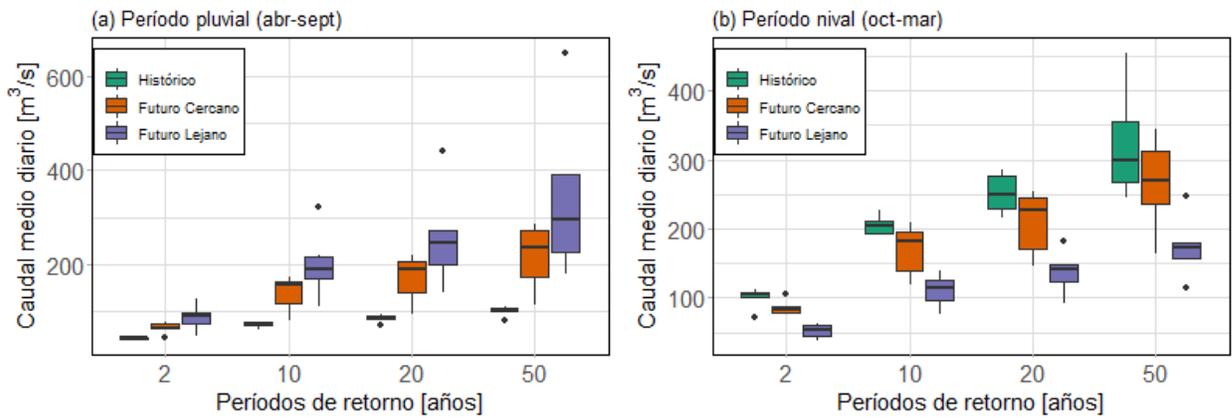


Figura 5.18: Caudales máximos medios diarios para período pluvial y nival para distintos períodos de retorno en el futuro cercano y lejano para la cuenca Río Aconcagua en Chacabuquito

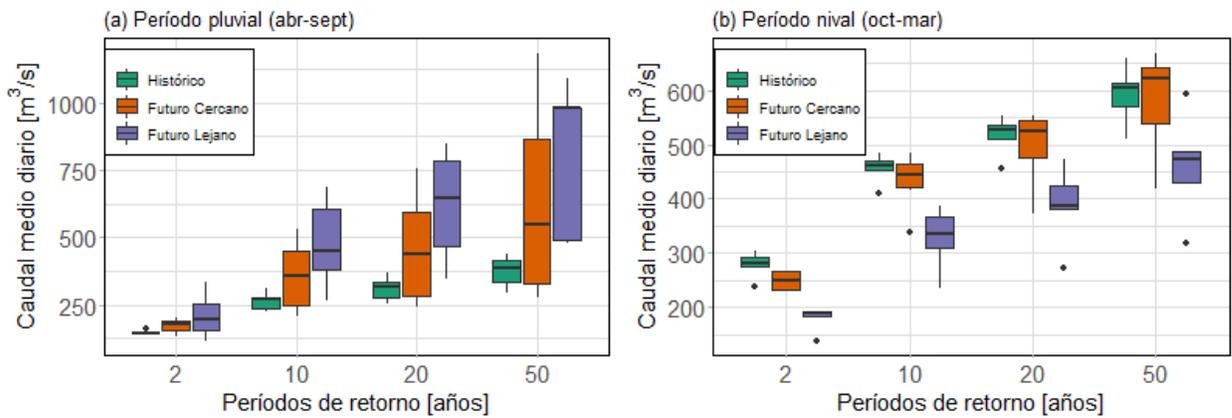


Figura 5.19: Caudales máximos medios diarios para período pluvial y nival para distintos períodos de retorno en el futuro cercano y lejano para la cuenca Río Maipo en el Manzano

Tabla 5.4: Variación porcentual de los caudales asociados a cada período de retorno entre el periodo histórico y los periodos futuros, en el período de lluvias (abril-septiembre), para las tres cuencas de estudio.

Cuenca río Choapa				
Periodo	$\Delta Q T=2$ [%]	$\Delta Q T=10$ [%]	$\Delta Q T=20$ [%]	$\Delta Q T=50$ [%]
FC	52,8	54,2	49,7	46,7
FL	50,6	62,3	54,0	42,4
Cuenca río Aconcagua				
Periodo	$\Delta Q T=2$ [%]	$\Delta Q T=10$ [%]	$\Delta Q T=20$ [%]	$\Delta Q T=50$ [%]
FC	72,3	94,4	105,7	119,7
FL	96,9	147,6	165,8	191,3
Cuenca río Maipo				
Periodo	$\Delta Q T=2$ [%]	$\Delta Q T=10$ [%]	$\Delta Q T=20$ [%]	$\Delta Q T=50$ [%]
FC	17,1	35,8	47,4	67,0
FL	46,3	83,5	101,2	129,4

Tabla 5.5: Variación porcentual de los caudales asociados a cada periodo de retorno entre el periodo histórico y los periodos futuros, en el período de deshielos (octubre-marzo), para las tres cuencas de estudio.

Cuenca río Choapa				
Periodo	$\Delta Q T=2$ [%]	$\Delta Q T=10$ [%]	$\Delta Q T=20$ [%]	$\Delta Q T=50$ [%]
FC	-26,0	-23,4	-22,1	-12,5
FL	-66,4	-53,4	-45,6	-40,1
Cuenca río Aconcagua				
Periodo	$\Delta Q T=2$ [%]	$\Delta Q T=10$ [%]	$\Delta Q T=20$ [%]	$\Delta Q T=50$ [%]
FC	-23,4	-17,8	-17,3	-15,1
FL	-49,8	-46,2	-48,6	-45,4
Cuenca río Maipo				
Periodo	$\Delta Q T=2$ [%]	$\Delta Q T=10$ [%]	$\Delta Q T=20$ [%]	$\Delta Q T=50$ [%]
FC	-1,2	-5,2	-3,6	-1,4
FL	-35,8	-28,5	-22,3	-22,3

5.4.2. Sequías hidrológicas

Las Figuras 5.20 y 5.21 muestran las variaciones de días secos al año, y del número máximo de días secos consecutivos al año, en el futuro cercano y futuro lejano, en relación al periodo histórico. Cada indicador se compara con respecto al simulado con el mismo GCM en el período histórico. En general, ambos indicadores aumentan en todo el período futuro, siendo mayores las variaciones para las sequías moderadas (Q85) que para las severas (Q95) en todas las cuencas en estudio, para ambos indicadores.

En el caso de los días secos al año (Figura 5.20), se tiene que para sequías moderadas, en general, los distintos GCMs muestran aumentos de 50 días para las tres cuencas en el

futuro cercano, siendo mayor el aumento para la cuenca del río Maipo, con un promedio cercano a los 52 días. Dicha cuenca además muestra mayor dispersión, teniendo incluso un GCM que muestra un aumento de 100 días secos al año. En el futuro lejano, las variaciones son más importantes, con una dispersión de los GCMs más grande para las tres cuencas. Las cuencas del río Choapa y Maipo muestran resultados similares, mostrando en promedio aumentos de 130 días secos al año, con algunos GCMs que muestran aumentos por sobre los 150 días. En el caso de la cuenca del río Aconcagua, se tienen en promedio aumentos de 93 días secos al año para el futuro lejano. Por otro lado, las sequías severas muestran variaciones menos drásticas para todas las cuencas en ambos períodos futuros. En el futuro cercano, las cuencas del río Choapa y Aconcagua muestran en promedio aumentos de 20 días secos al año, mientras que la del río Maipo aumentos de 48 días secos al año. En el futuro lejano, la cuenca del río Choapa muestra en promedio aumentos de 75 días de sequía severa, la del río Aconcagua 65 días, y la del río Maipo aumentos en promedio de 100 días de sequía severa.

Finalmente, para los días consecutivos secos al año (Figura 5.21) en el futuro cercano, se tienen aumentos menores a 50 días para sequías moderadas para las tres cuencas, y que rodean los 25 días para las cuencas del río Choapa y Aconcagua, y aumentos en promedio de 40 días para la cuenca del río Maipo. Para el futuro lejano los aumentos son mayores, donde la cuenca del río Choapa alcanza en promedio aumentos de 100 días consecutivos con sequía moderada. En cuanto a sequías severas en el futuro cercano, las cuencas del río Choapa y Aconcagua muestran en general aumentos menores a 25 días, mientras que la del río Maipo muestra aumentos cercanos a 40 días. En el futuro lejano, los aumentos de la cuenca del río Choapa superan los 50 días, mientras que la cuenca del río Maipo muestra aumentos de hasta 80 días consecutivo con sequía severa.

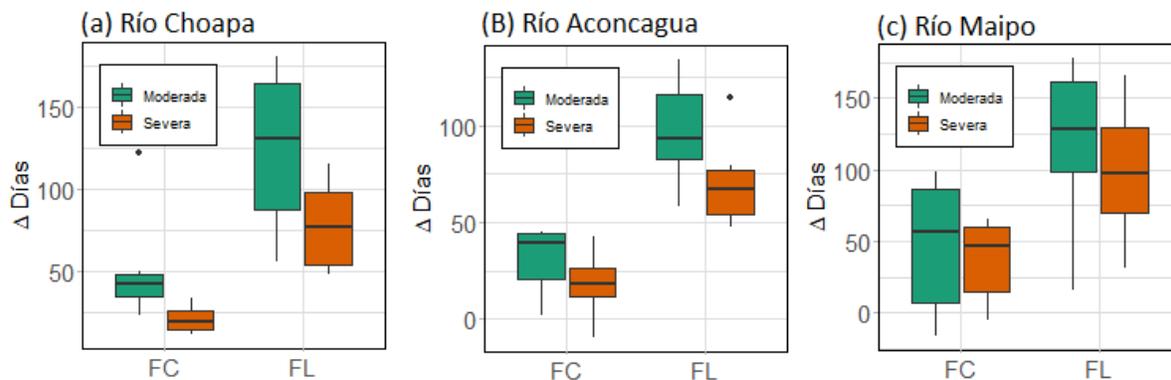


Figura 5.20: Cambios proyectados de días secos al año para el período futuro cercano y lejano con respecto al histórico para las tres cuencas en estudio.

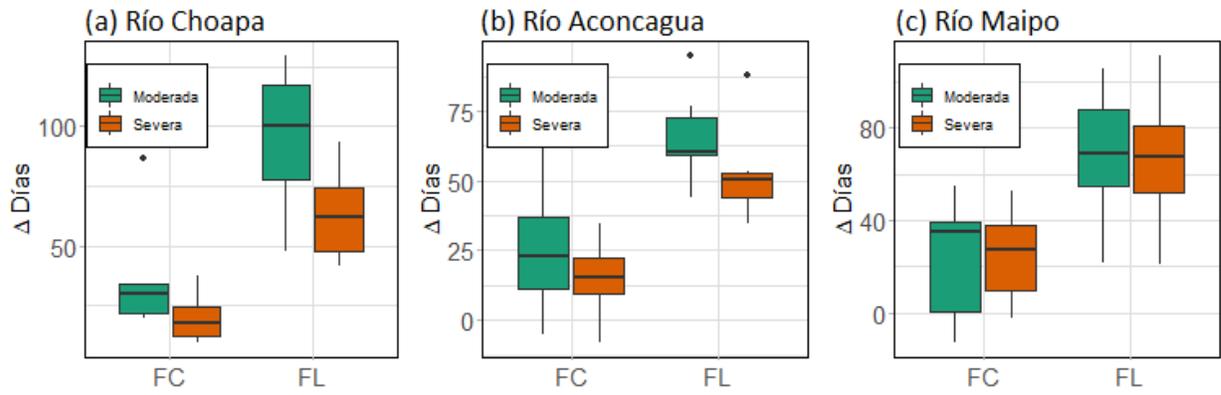


Figura 5.21: Cambios proyectados de días secos consecutivos para el período futuro cercano y lejano con respecto al histórico para las tres cuencas en estudio.

6. Discusiones

6.1. Forzantes meteorológicas

6.1.1. Producto grillado de precipitaciones

La primera fuente de información utilizada en este estudio corresponde al producto grillado de precipitación y temperatura CR2Met en su versión 2.0. El producto de precipitación presenta sesgos importantes en la zona de estudio, teniendo valores de NRMSE mayores en la zona cordillerana (Figura 5.1). La metodología de corrección de Cressman (1959) aplicada depende fuertemente de la cantidad de observaciones que hay en la zona, teniendo la desventaja de que no puede proporcionar valores predictivos para todas las celdas de una región (Maglione et al., 2019).

En ese sentido, la Figura 3.2 muestra que existen muy pocas estaciones disponibles en las cuencas en estudio, menos aún si se consideran las estaciones con más de 20 años de observación (estaciones en verde). Si bien los estadísticos del producto corregido mejoran con respecto al producto bruto, existen celdas que no son corregidas. De hecho, la cuenca río Choapa en Cuncumén solo tiene una estación de precipitación en la parte norte, la cual no tiene más de 20 años de registro, por lo que las precipitaciones del producto CR2Met en esa zona no se corrigen. Así, para obtener un producto de precipitaciones más confiable, son necesarias más estaciones, en especial en la zona cordillerana del país.

6.1.2. Proyecciones de precipitación y temperatura

Las proyecciones de precipitación y temperatura obtenidas luego del escalamiento muestran un aumento sostenido de temperaturas, promediando un aumento de 1,7 °C para el futuro cercano y 3,2 °C para el futuro lejano en las cuencas de estudio, ubicadas en Chile central. Además, se proyecta un aumento de hasta 4 °C para finales de siglo (Anexo D). Estos resultados concuerdan con los aumentos de 3,5 °C estimados por Bozkurt et al. (2018) para finales de siglo bajo el escenario RCP 8.5.

En cuanto a la precipitación media anual, se proyecta mayor variabilidad para el futuro cercano, teniendo incluso aumentos de 3 % para la cuenca del río Choapa. Sin embargo, para el futuro lejano todas las proyecciones concuerdan en una disminución de alrededor del 10 % de la precipitación media anual para el período 2055-2085. Estos resultados son menos drásticos que los obtenidos en la actualización del balance hídrico aplicado en las macrozonas norte y sur, donde se proyectan disminuciones entre 5 y 20 % para la cuenca del río Maipo en Cabimbao en el período 2030-2060 utilizando 4 GCMs bajo el escenario RCP 8.5 (DGA, 2018).

Los resultados de proyecciones de precipitación y temperatura están sujetos a incertidumbre asociada a procesos de selección de GCMs, a los escenarios de emisión y al método de escalamiento escogido (Mandal et al., 2019). Estudios previos han determinado que los GCMs aportarían más incertidumbre que incluso el modelo hidrológico, tanto en modelos de base física (Bossard et al., 2013) como conceptuales de lluvia-escorrentía (Teng et al., 2012). Además, se tiene la incertidumbre asociada a los modelos de circulación general en sí: si bien se ha avanzado en complejidad de modelos, entregando diversidad de escenarios en el

futuro, cada GCM es creado de forma diferente sin abarcar todas las posibilidades en cuanto a representación física de la realidad (Clark et al., 2016).

Para la selección de los GCMs, se utilizó una metodología simple evaluando la capacidad de reproducir la estacionalidad mediante el RMSE. Sin embargo, el estudio se centra en eventos extremos por lo que, para obtener mejores resultados, sería beneficioso aplicar un método de selección que considere la capacidad de reproducir de manera correcta la curva de distribución de probabilidad de precipitaciones máximas anuales como se hace en el estudio realizado por la DOH (2020). Además, sólo se considera el escenario más desfavorable del proyecto CMIP6 (SSP5-8.5), el que no necesariamente es el más probable. Brunner et al. (2020) concluyeron que los escenarios que proyectan mayores aumentos de temperatura (tales como el SSP5-8.5) serían los menos probables, justificando la necesidad de incluir en el análisis otros escenarios menos drásticos.

El método de escalamiento, por su parte, también aporta a la incertidumbre de las forzantes futuras generadas. El método MBCn, al ser multivariado, tiene ventajas en la representación de la diferencia entre precipitación líquida y sólida (Dionizis et al., 2021). Esto es importante, en especial en las cuencas estudiadas, de régimen nival y ubicadas en la cordillera, en donde el manto nival es una componente fundamental en la hidrología. Una desventaja importante del método MBCn en particular es su alto costo computacional, en relación a otros métodos estadísticos (Adeyeri et al., 2020). Por otro lado, los métodos de escalamiento estadísticos tienen limitaciones en general, como por ejemplo, que no se puede representar la no estacionariedad del futuro en los parámetros del escalamiento (Clark et al., 2016). Los métodos de escalamiento dinámicos han tenido mayores avances en la física del problema y en la eficiencia computacional que los métodos estadísticos durante el último tiempo; sin embargo, su costo computacional y la dificultad de implementarlos sigue siendo alta (Clark et al., 2016).

6.2. Modelación hidrológica

El modelo hidrológico tiene un buen desempeño en el período de calibración en las tres cuencas, con valores de KGE y NSE sobre 0,73. La principal dificultad radica en reproducir los caudales bajos, en especial en la cuenca del río Choapa con índices BiasFLV de -86 %. En el período de validación, los valores de KGE y NSE disminuyen con respecto al período de calibración; sin embargo, aún se mantienen valores sobre 0,63 para todas las cuencas. La dificultad de reproducir los caudales bajos se intensifica en el período de validación, aumentando el sesgo en la parte baja, alcanzando un BiasFLV -113 % en la cuenca del río Choapa. En cuanto a los caudales medios diarios máximos anuales, la cuenca del río Choapa presenta un buen ajuste tanto en el período de calibración como de validación (R^2 mayor a 0,84), no así las cuencas de los ríos Aconcagua y Maipo, las que tienen R^2 menores a 0,5 para los períodos de validación. Por otro lado, los caudales con 95 % de probabilidad de excedencia no son reproducidos de buena manera en las cuencas río Aconcagua y Maipo (R^2 menores a 0,5 en período de validación), y en la cuenca río Choapa el modelo los subestima tanto en la calibración como en la validación, con sesgos cercanos al 5 %.

El modelo HBV implementado no considera un módulo glaciar, cuando, por ejemplo, la cuenca río Maipo en el Manzano tiene alrededor de un 7 % de área glaciar. Por esto, al ca-

librar los parámetros con el caudal observado, se atribuye el aporte glacial a otros procesos físicos (Lagos et al., 2016).

Las principales fuentes de incertidumbre del proceso de modelación están asociadas a las forzantes utilizadas, la estructura del modelo y calibración de los parámetros del modelo. Diferentes estructuras de modelos podrían entregar resultados similares en cuanto a escorrentía debido a que el proceso de calibración podría compensar errores estructurales (Mendoza et al., 2015). Otro factor que podría compensar errores estructurales son enfoques del método numérico para resolver las ecuaciones para cada paso temporal utilizado (Clark y Kavetski 2010). Por otro lado, el módulo de nieve utilizado tiene un enfoque grado-día, lo que podría ser una simplificación excesiva para el desarrollo de estudios de cambio climático (Clark et al., 2016).

Otro aspecto importante es la función objetivo utilizada para la calibración de los parámetros del modelo: la incertidumbre asociada al índice KGE es grande debido a que, al ser un estadístico de suma de errores al cuadrado, las estimaciones se podrían llevar a cabo con pocos pares de puntos de observaciones y simulaciones (Clark et al., 2021). Por otro lado, para los estudios de caudales bajos no se recomiendan métricas que consideren suma del error cuadrático, sino otras métricas que consideren la suma del error absoluto u una métrica como el *Split-KGE*, que otorga el mismo peso a cada año de calibración (Fowler et al., 2018). Por otro lado, la función objetivo KGE puede no ser la mejor opción para reproducir de buena manera los caudales máximos, habiendo métricas con mejor desempeño como la métrica del sesgo en caudales máximos anuales (APFB por sus siglas en inglés; Mizukami et al., 2019).

6.3. Análisis de eventos extremos

6.3.1. Eventos extremos meteorológicos

En primer lugar, las precipitaciones máximas anuales proyectadas en los períodos futuro cercano y lejano no tienen grandes variaciones, con diferencias menores al 5% en las tres cuencas en estudio. Sin embargo, las temperaturas asociadas a estos eventos aumentan considerablemente entre un 1 y 2°C para el futuro cercano y más de 2°C para el futuro lejano. Esto impacta directamente en la elevación de la línea de nieves, disminuyendo el almacenamiento de nieve (Figura 6.1), pudiendo afectar fuertemente las cuencas en estudio ya que las tres cuencas tienen un régimen hidrológico nival.

En cuanto al análisis de frecuencia de las precipitaciones diarias máximas anuales, se obtienen disminuciones de la magnitud para periodos de retorno de 2 años en las tres cuencas y aumentos en general para periodos de retorno mayores. En general, las precipitaciones son más altas para el futuro lejano en comparación que el futuro cercano a excepción de la cuenca del río Choapa en Cuncumén. Para la cuenca del río Aconcagua, se tienen aumentos de hasta 10 milímetros para ambos períodos futuros y todos los períodos de retorno, a excepción del futuro lejano con $T=50$ años que proyecta aumentos en promedio de 40 milímetros. Los aumentos en la cuenca río Maipo en el Manzano van desde los 2 hasta 15 milímetros para períodos de retorno altos. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Demaria et al. (2013), quienes proyectan aumentos entre 20 y 50 milímetros, aunque en su estudio se analizan las series anuales de precipitaciones máximas acumuladas en 3 días. Los resultados de

este estudio están fuertemente influenciados por la elección de la distribución de probabilidad utilizada. Se aplicó una metodología automática que no verifica si la distribución seleccionada para cada serie se ajusta de buena manera en los valores máximos. Por esto, se podrían incluir al método de elección métricas que evalúen el error para los valores con probabilidades de excedencia baja.

Los resultados del estudio de eventos de sequías meteorológicas con SPI-12 menores a 1 muestran que no existen tendencias claras en las tres cuencas en estudio. Se obtiene que los eventos de sequías podrían aumentar su duración en la cuenca del río Choapa, pero no en las demás. Se proyecta un aumento de meses secos en las cuencas del río Choapa y Maipo en el Manzano de hasta 10 meses para el período lejano. Estos resultados pueden estar explicados por las mínimas diferencias en histogramas de valores de SPI-12 y SPI-6 en las tres cuencas en estudio (revisar Anexo F). Ahora bien, el índice SPI mide las variaciones en las precipitaciones con respecto a el promedio histórico, y cada período (histórico, futuro cercano y futuro lejano) fue calculado por separado, por lo que la invariancia de indicadores como la frecuencia, magnitud y duración en eventos de SPI menores a uno indican disminuciones sostenidas en las precipitaciones.

6.3.2. Crecidas

Los resultados del análisis de frecuencia de los caudales de crecidas muestran aumentos para todos los periodos de retorno en los meses de lluvias para las tres cuencas en estudio. Los aumentos se intensifican en el futuro lejano. La cuenca del río Maipo en el Manzano es la que muestra mayores variaciones, con aumentos porcentuales por sobre 200 % para algunos GCMs en el futuro lejano, resultados similares a los obtenidos por Lagos et al. (2015). La cuenca del río Aconcagua muestra aumentos cercanos al 100 % para todos los periodos de retorno en el futuro cercano y aumentos cercanos 200 % para el período de retorno de 50 años en el futuro lejano. La cuenca del río Choapa muestra aumentos entre el 25 % y el 40 % del caudal proyectado para los distintos periodos de retorno. Por lo tanto, se tiene que los eventos de caudales máximos asociados a lluvias en los meses de invierno aumentarían en cuanto a magnitud y frecuencia, lo que probablemente se deba a disminuciones en los almacenamientos de nieve por los aumentos de temperatura, teniendo mayores precipitaciones líquidas en el futuro.

Lo anterior se verifica en la Figura 6.1, que muestra los almacenamientos de SWE proyectados para cada GCM y período. Se observan disminuciones en el SWE medio anual para las tres cuencas, siendo mayores para el período futuro. Sin embargo, estos almacenamientos de SWE no fueron incluidos en el proceso de calibración, por lo que tienen una alta incertidumbre asociada.

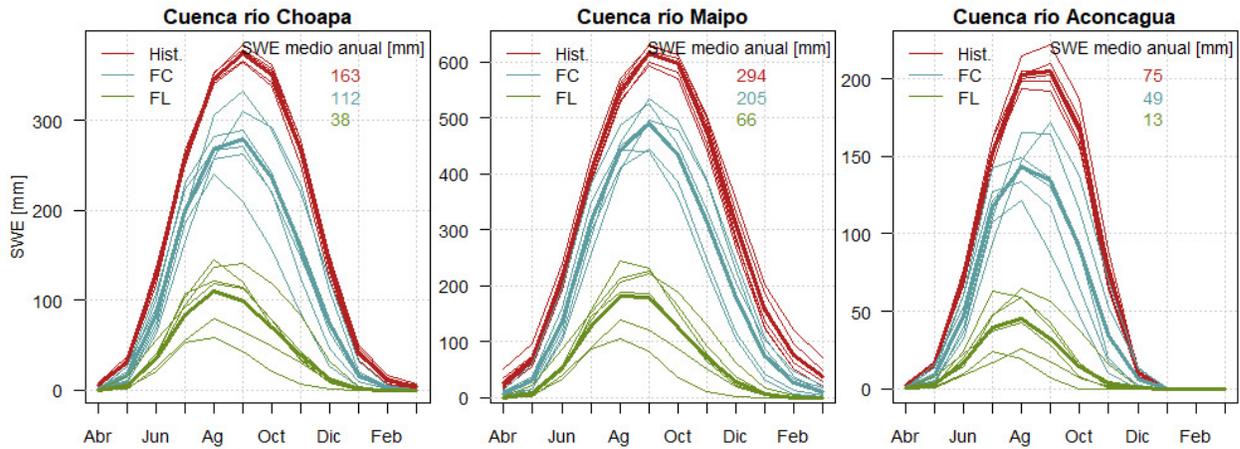
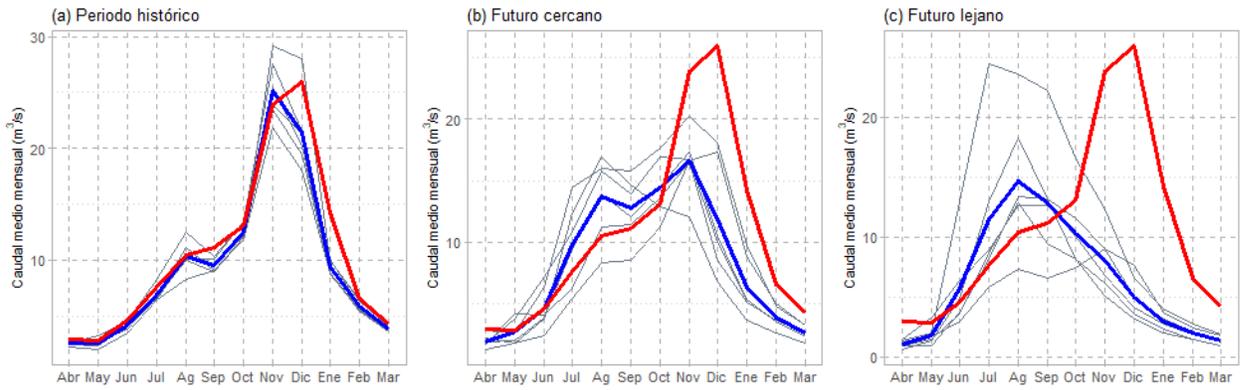


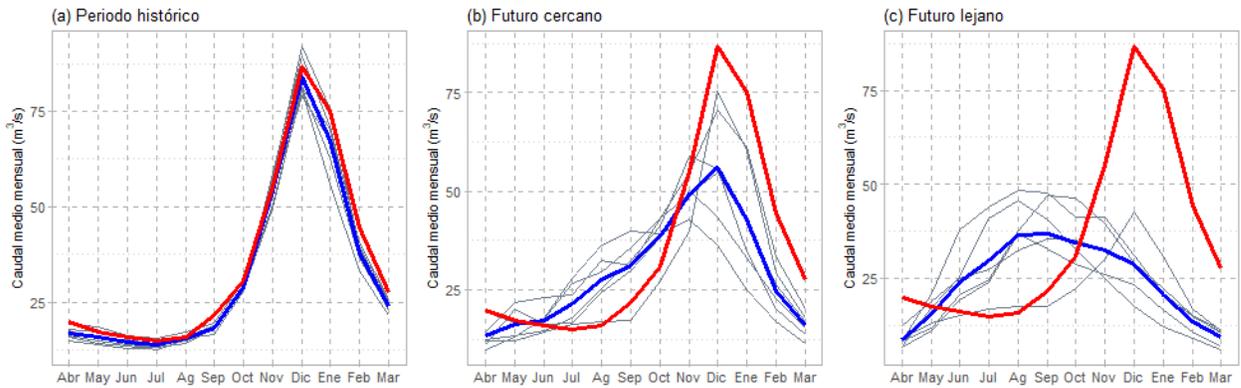
Figura 6.1: Almacenamientos de SWE estacionales simulados con los distintos GCM para cada período y las tres cuencas en estudio.

Por otro lado, los caudales máximos asociados a derretimientos de nieve muestran disminuciones en las tres cuencas para todos los periodos de retorno y en los períodos futuros, intensificándose en el periodo de 2055-2085. Estos resultados se explican en parte por cambios en la estacionalidad de las cuencas, adelantando los máximos de precipitaciones, teniendo una transición de cuencas nivales a pluvio-nivales (Figura 6.2). En la cuenca río Choapa se ve claramente una transición a una cuenca pluvial en el futuro lejano, pasando por un aumento de la componente pluvial en el futuro cercano, resultado que concuerda con lo obtenido por la actualización del balance hídrico nacional (DGA,2017). Las cuencas río Aconcagua y Maipo en el Manzano ven una pequeña aceleración en el régimen hidrológico en el futuro cercano, intensificando la componente pluvial en el futuro lejano.

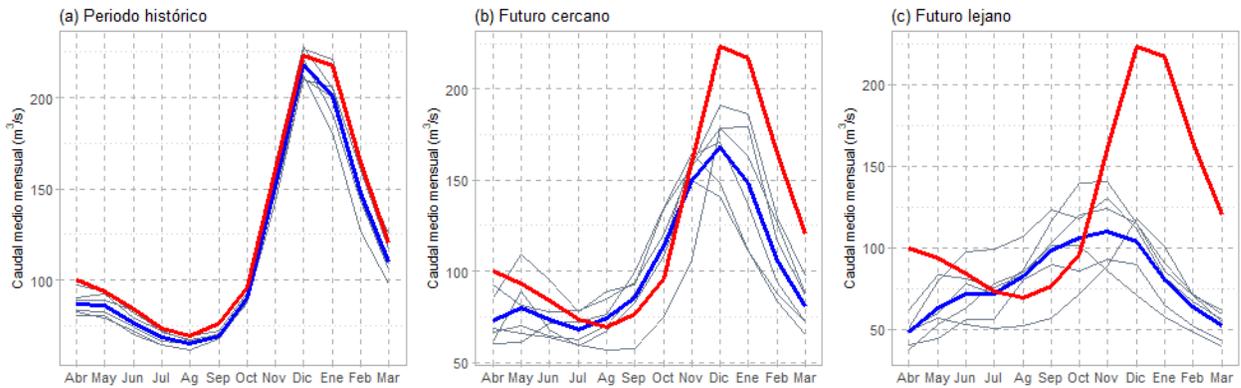
Los resultados obtenidos indican que existen tendencias marcadas en cuanto a proyecciones de caudales máximos, para distintos períodos de retorno. Frente a esto, es importante cuestionar la metodología de diseño de obras hidráulicas, que se basa en un régimen estacionario, además de otras decisiones, como la planificación urbana o mapas de riesgo. En este contexto, es necesario incorporar análisis no estacionarios a estos estudios.



(a) Cuenca río Choapa en Cuncumén



(b) Cuenca río Aconcagua en Chacabuquito



(c) Cuenca río Maipo en el Manzano

Figura 6.2: Curva de variación estacional proyectada para el futuro cercano y lejano para las tres cuencas en estudio. La línea roja representa el observado históricamente, y la azul corresponde al promedio de las simulaciones para cada GCM en el periodo correspondiente.

6.3.3. Sequías hidrológicas

Se proyectan aumentos de días secos y días consecutivos con sequías moderadas y severas en las tres cuencas en estudio, con aumentos por sobre los 100 días en promedio para los días secos al año en el futuro lejano en las tres cuencas, y de hasta 100 días en los días consecutivos

con sequía para el futuro lejano en la cuenca del río Choapa.

Los caudales umbrales para cada día del año en cuanto a sequías moderadas y severas se obtuvieron con el período histórico, en el cual se incluyen algunos años enmarcados en la megasequía. En estudios de atribución de la megasequía, se concluye que esta se explica principalmente por la oscilación decadal del Pacífico (Boisier et al., 2016). Por otro lado, se tiene que los GCMs podrían tener dificultades en reproducir la variabilidad climática natural (Clark et al., 2016), por lo que es importante estudiar la incertidumbre asociada a los días de sequías proyectados en el futuro y analizar si los GCMs seleccionados son capaces de reproducir la variabilidad climática en Chile Central para validar los resultados.

El aumento proyectado de las sequías hidrológicas en Chile central podría tener impactos trascendentales en diferentes aristas: la disponibilidad del recurso hídrico para la vida humana y para las actividades económicas, así como también en la calidad del agua disponible (Peña-Guerrero et al., 2020). Por esto, es importante el desarrollo de planes de adaptación, para asegurar el acceso al agua en el futuro (Muñoz et al., 2020).

7. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos para las proyecciones de eventos extremos meteorológicos e hidrológicos, se puede concluir que:

1. El modelo hidrológico HBV se ajusta de buena manera con índices de NSE y KGE sobre 0,6 para las tres cuencas tanto en período de calibración como de validación para las series diarias de caudales. Sin embargo, tiene dificultades para reproducir eventos hidrológicos extremos, con valores bajos de R^2 en cuanto a los caudales diarios máximos anuales para la cuenca del río Maipo y Aconcagua, y sesgos negativos de hasta 86 y 113 % en el índice BiasFLV para el período de calibración y validación respectivamente para la cuenca del río Choapa. Por lo que se concluye que se debe revisar la metodología de calibración empleada en este estudio.
2. Los GCMs seleccionados y escalados proyectan, bajo el escenario SSP5-8.5, aumentos de hasta 3°C y disminuciones de hasta 12 % de la precipitación media anual en el futuro lejano. Se proyecta que las tormentas no tendrían variaciones considerables en cuanto a magnitud, pero sí de sus temperaturas asociadas, siendo más cálidas con respecto al período histórico. Como consecuencia, los almacenamientos de nieve disminuyen considerablemente, debido al alza de la línea de nieves y al aumento del área pluvial.
3. En cuanto al análisis de frecuencia de las series de precipitaciones diarias máximas anuales, se obtienen disminuciones para las tres cuencas tanto en el período futuro cercano como el futuro lejano, para eventos con periodo de retorno de 2 años. Para las cuencas del río Aconcagua y Maipo, se tienen aumentos que se intensifican con períodos de retorno alto y a finales de siglo, alcanzando valores promedio cercanos al 20 % para T=50 años en el período futuro lejano. Los resultados muestran una gran dispersión entre los modelos de circulación general utilizados. Por otro lado, en cuanto a sequías meteorológicas, no se observan tendencias claras en cuanto a magnitud, duración e intensidad de sequías meteorológicas mediante el análisis del índice SPI-12 para ninguna de las tres cuencas en estudio con respecto al período histórico.
4. En el caso de los eventos extremos hidrológicos, los caudales medios diarios máximos anuales aumentan en todas las cuencas para todos los períodos de retorno en el período de lluvias (abril a septiembre), y sucede exactamente lo contrario en el período de deshielos (octubre a marzo). En promedio, en el periodo pluvial, las variaciones son mayores para las cuencas del río Aconcagua y Maipo, alcanzando aumentos de 191 y 129 % respectivamente para T=50 años en el futuro lejano. En la cuenca del río Choapa, las variaciones son consistentes en porcentajes para todos los períodos de retorno y ambos períodos futuros. En el período de deshielos, los caudales medios diarios máximos anuales disminuyen en mayor medida en el período futuro lejano, alcanzando incluso una disminución del 66 % en la cuenca del río Choapa para T=2 años. Lo anterior se atribuye a fuertes reducciones en los almacenamientos de nieve, a causa de los considerables aumentos de temperaturas mostrados por el escenario SSP5-8.5.

Finalmente, los resultados obtenidos concuerdan con estudios previos de proyecciones de cambio climático, reafirmando disminuciones en cuanto a precipitaciones y caudales medios anuales, y aumentos en precipitaciones máximas anuales y caudales máximos anuales para distintos períodos de retorno. Por esto, resulta imperante incluir estudios de cambio climático

para diferentes tomas de decisiones: en la estimación de caudales de diseño en la construcción de obras hidráulicas, en la planificación urbana según riesgos asociados a eventos extremos de precipitación e hidrológicos y en medidas de adaptación y mitigación para asegurar el acceso al agua a las personas.

8. Bibliografía

Adeyeri, O.E., Laux, P., Lawin, A.E. et al. Multiple bias-correction of dynamically downscaled CMIP5 climate models temperature projection: a case study of the transboundary Komadugu-Yobe river basin, Lake Chad region, West Africa. *SN Appl. Sci.* 2, 1221 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3009-4>

Alvarez-Garreton, C., Boisier, J. P., Garreaud, R., Seibert, J., and Vis, M.(2021). Progressive water deficits during multiyear droughts in basins with long hydrological memory in Chile, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 429–446, <https://doi.org/10.5194/hess-25-429-2021>, 2021.

Anderson, T. W., Darling, D. A. (1954). A test of goodness of fit. *Journal of the American statistical association*, 49(268), 765-769.

Araya-Osses, Daniela; Casanueva, Ana; Román-Figueroa, Celi; Uribe, Juan Manuel; Paneque, Manuel (2020). Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics*, (), -. doi:10.1007/s00382-020-05231-4.

Bergstrom, S. (1995). The HBV model. *Computer models of watershed hydrology*.

Bergström, S. (1976). Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments.

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.

Boisier, J. P., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., Rondanelli, R. (2018). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydro-climatic research in Chile. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, volume 20, page 19739. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018EGUGA..2019739B/abstract>

Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P., y Valdivieso, J. (2018). Projected hydroclimate changes over 51 Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. *Climatic Change*. doi:10.1007/s10584-018-2246-7

Brunner, L., Pendergrass, A. G., Lehner, F., Merrifield, A. L., Lorenz, R., Knutti, R. (2020). Reduced global warming from CMIP6 projections when weighting models by performance and independence. *Earth System Dynamics*, 11(4), 995-1012.

Caballero, M., Lozano, S., Ortega, B. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista digital universitaria*, 8(10), 1-11.

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 (FONDAP 15110009) (2018). “Simulaciones climáticas regionales”. Proyecto “Simulaciones climáticas regionales y marco de evaluación de la vulnerabilidad” mandatado por el Ministerio del Medio Ambiente. Julio de

2018. Disponible en www.cr2.cl

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.

Clark, M. P., Kavetski, D. (2010). Ancient numerical demons of conceptual hydrological modeling: 1. Fidelity and efficiency of time stepping schemes. *Water Resources Research*, 46(10).

Clark, M. P., Vogel, R. M., Lamontagne, J. R., Mizukami, N., Knoben, W. J., Tang, G., ... Papalexiou, S. M. (2021). The abuse of popular performance metrics in hydrologic modeling. *Water Resources Research*, 57(9), e2020WR029001.

Demaria, E. M. C., Maurer, E. P., Thrasher, B., Vicuña, S., Meza, F. J. (2013). Climate change impacts on an alpine watershed in Chile: Do new model projections change the story?. *Journal of Hydrology*, 502, 128-138.

Dionizis, D., Ojeda, P., Quezada, S., Lagos, M., Montserrat, M. (2021) Implicancias de la elección del método de escalamiento estadístico de modelos de circulación general en proyecciones de cambio hidrológico.

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

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, SIT N° 435. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios Planificación, Santiago, Chile. Realizado por Fundación para la Transferencia Tecnológica y Pontificia Universidad Católica de Chile.

DOH. (2020). Actualización hidrológica embalse Aromos región de Valparaíso. Ministerio de Obras Públicas.

Duan, Q.Y., Gupta, V.K. Sorooshian, S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *J Optim Theory Appl* 76, 501–521 (1993).
<https://doi.org/10.1007/BF00939380>

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958.

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).

Fowler, K., Peel, M., Western, A., Zhang, L. (2018). Improved rainfall-runoff calibration for drying climate: Choice of objective function. *Water Resources Research*, 54(5), 3392-3408.

Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., Veloso-Aguila, D. (2020). The central Chile mega drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421-439.

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.

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis. *QJRMeteorol Soc.* 2020;146:1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Hrachowitz, M., Clark, M. P. (2017). HESS Opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(8), 3953-3973.

Panel Intergubernamental por el Cambio Climático (IPCC) (2013). Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo Ial Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Jansen, K. F., Teuling, A. J., Craig, J. R., Dal Molin, M., Knoben, W. J. M., Parajka, J., et al. (2021). Mimicry of a conceptual hydrological model (HBV): What's in a name? *Water Resources Research*, 57, e2020WR029143. <https://doi.org/10.1029/2020WR029143>

Lagos, M., Bobadilla, M. P., Vargas, X., Cepeda, J., Silva, V., Uribe, F. Vásquez, N. (2015)

Proyecciones de crecidas en cuencas andinas bajo distintos modelos de circulación general. Presentado en XXII congreso chileno de ingeniería hidráulica.

Lagos Zúñiga, M. Á., Vargas, X., Cepeda, J. A., Vasquez, N. A., Bobadilla, M. P. (2016, December). How important is to model glaciers in water resources under climate change projections?. In AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 2016, pp. C51D-0689).

Maglione, D., Soto, J., Sáenz, J. L., Bonfili, O. (2019). Utilización de diferentes metodologías para la construcción de un mapa de precipitación acumulada en la Provincia de Santa Cruz. *Informes Científicos Técnicos-UNPA*, 11(1), 154-169.

McKee, Thomas B., et al. The relationship of drought frequency and duration to time scales. En *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. 1993. p. 179-183.

Medina, Yelena, Enrique Muñoz, Robert Clasing, and José L. Arumí. 2022. "Analysis of the Relative Importance of the Main Hydrological Processes at Different Temporal Scales in Watersheds of South-Central Chile" *Water* 14, no. 5: 807. <https://doi.org/10.3390/w14050807>

Medina, Yelena, and Enrique Muñoz. 2020. "Estimation of Annual Maximum and Minimum Flow Trends in a Data-Scarce Basin. Case Study of the Allipén River Watershed, Chile" *Water* 12, no. 1: 162. <https://doi.org/10.3390/w12010162>

Mendoza, P. A., Clark, M. P., Mizukami, N., Newman, A. J., Barlage, M., Gutmann, E. D., ... Arnold, J. R. (2015). Effects of hydrologic model choice and calibration on the portrayal of climate change impacts. *Journal of Hydrometeorology*, 16(2), 762-780.

Mizukami, N., Rakovec, O., Newman, A. J., Clark, M. P., Wood, A. W., Gupta, H. V., Kumar, R. (2019). On the choice of calibration metrics for "high-flow" estimation using hydrologic models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(6), 2601-2614.

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

Muñoz, A. A., Klock-Barría, K., Alvarez-Garretón, C., Aguilera-Betti, I., González-Reyes, Á., Lastra, J. A., ... LeQuesne, C. (2020). Water crisis in Petorca Basin, Chile: The combined effects of a mega-drought and water management. *Water*, 12(3), 648.

Nash JJEJ, Sutcliffe JJV (1970) River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *J Hydrol* 10:282–290. doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *Journal of hydrology*, 303(1-4), 290-306.

Parra, Víctor, Jose L. Arumí, and Enrique Muñoz. 2019. Identifying a Suitable Model for

Low-Flow Simulation in Watersheds of South-Central Chile: A Study Based on a Sensitivity Analysis" *Water* 11, no. 7: 1506. <https://doi.org/10.3390/w11071506>

Peña-Guerrero, M. D., Nauditt, A., Muñoz-Robles, C., Ribbe, L., Meza, F. (2020). Drought impacts on water quality and potential implications for agricultural production in the Maipo River Basin, Central Chile. *Hydrological Sciences Journal*, 65(6), 1005-1021.

Pitié F, Kokaram AC, Dahyot R (2007) Automated colour grading using colour distribution transfer. *Comput Vis Image Underst* 107(1):123–137. doi:10.1016/j.cviu.2006.11.011

Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Crespo Cuaresma, J., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Aleluia Da Silva, L., Smith, S., Stehfest, E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau, A., and Tavoni, M. (2016) The Shared Socio-economic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An Overview, *Global Environ. Chang.*, doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.

Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J. L., Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*, (57), 177-192.

Seibert, J., 2005, HBV light version 2, User's Manual. Uppsala University, Institute of Earth Sciences, Department of Hydrology, Uppsala, Sweden.

Sharma, D., Das Gupta, A., and Babel, M. S.: Spatial disaggregation of bias-corrected GCM precipitation for improved hydrologic simulation: Ping river basin, Thailand, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1373–1390, 2007.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485-498.

Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E., Fyfe, J., Friedlingstein, P., Knutti, R., Lowe, J., O'Neill, B., Sanderson, B., van Vuuren, D., Riahi, K., Meinshausen, M., Nicholls, Z., Tokarska, K. B., Hurtt, G., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Meehl, G., Moss, R., Bauer, S. E., Boucher, O., Brovkin, V., Byun, Y.-H., Dix, M., Gualdi, S., Guo, H., John, J. G., Kharin, S., Kim, Y., Koshiro, T., Ma, L., Olivié, D., Panickal, S., Qiao, F., Rong, X., Rosenbloom, N., Schupfner, M., Séférian, R., Sellar, A., Semmler, T., Shi, X., Song, Z., Steger, C., Stouffer, R., Swart, N., Tachiiri, K., Tang, Q., Tatebe, H., Voldoire, A., Volodin, E., Wyser, K., Xin, X., Yang, S., Yu, Y., and Ziehn, T.: Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6, *Earth Syst. Dynam.*, 12, 253–293, <https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021>, 2021.

Toum, E. (2021). 'HBV.IANIGLA': Modular Hydrological Model. version 0.2.0.

Valdés-Pineta, R., Valdés, J., García-Cehevesich, P. (2017) Modelación de crecidas aluvionales en la cuenca del río Copiapó, Chile, *Ingeniería del Agua*, 21.2.

Vicuña, S., Gironás, J., Meza, F. J., Cruzat, M. L., Jelinek, M., Bustos, E., ... Bambach, N. (2013). Exploring possible connections between hydrological extreme events and climate change in central south Chile. *Hydrological sciences journal*, 58(8), 1598-1619.

Yilmaz, K. K., H. V. Gupta, and T. Wagener (2008), A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model, *Water Resour. Res.*, 44, W09417, doi:10.1029/2007WR006716.

ANEXOS

Anexo A

Corrección del CR2Met

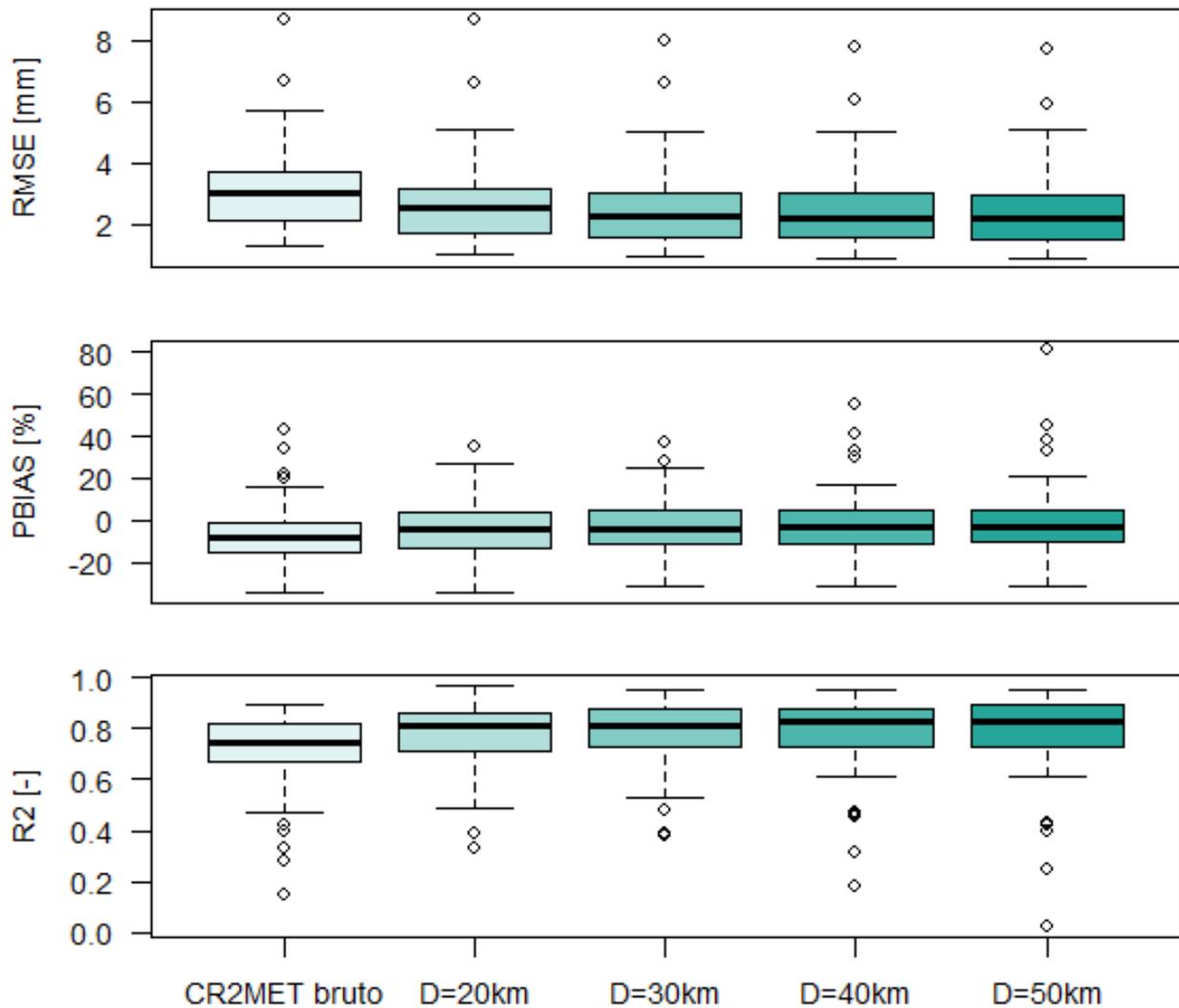


Figura A.1: Estadísticos de validación cruzada para calibración del radio de influencia en la zona de estudio.

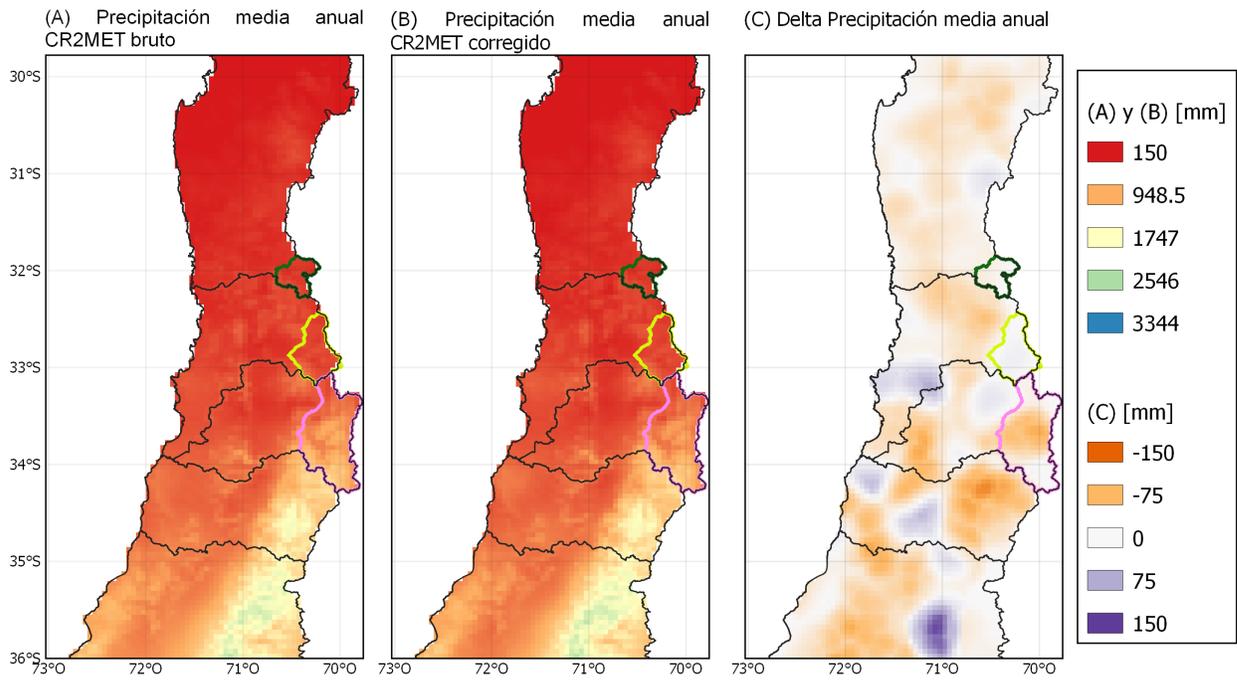


Figura A.2: Resultados corrección de cr2met en cuanto a las precipitaciones medias anuales en la zona de estudio.

Anexo B

Evaluación de los GCMs en el período histórico

PRODUCTO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	SUM
ACCESS	31,3	62,6	91,6	95,3	66,2	57,9	39,4	24,4	19,6	26,3	23,7	20,4	558,7
BCC CSM2 MR	16,5	43,8	49,7	52,2	45,7	28,8	24,6	13,1	15,2	17,2	19,9	14,8	341,8
CANESM 5	29,4	70,2	91,2	86,8	78,4	52,1	33,8	21,2	15,5	12,8	11,7	13,1	516,4
CESM2	24,1	51,4	65,5	69,9	54,4	35,2	26,9	22,8	20,4	20,3	23,6	19,4	433,8
CESM2 WACCM	26,7	55,3	74,8	75,1	60,8	41,9	30,7	22,5	21,8	25,2	19,4	20,1	474,2
CMCC CM2 SR5	29,5	61,4	90,8	85,8	61,2	34,0	27,4	26,1	35,4	47,4	44,7	34,6	578,2
CMCC ESM2	32,4	66,4	101,4	98,3	70,1	35,9	29,9	26,8	33,2	40,7	38,9	38,0	612,0
CNRM CM6	52,3	120,5	177,4	156,0	142,4	93,5	66,5	39,0	30,8	29,2	28,1	37,4	973,2
EC EARTH3 CC	36,3	62,2	112,7	112,2	83,2	60,1	57,8	37,3	34,3	41,0	38,5	34,6	710,3
GFDL ESM4	36,5	96,3	128,7	105,1	72,4	45,2	40,8	32,9	31,6	35,9	34,8	35,7	695,9
IITM ESM	41,9	49,3	105,2	98,9	72,3	58,2	45,3	31,4	23,7	22,6	25,7	23,2	597,7
INM CM4 8	33,3	63,7	85,0	61,5	53,6	35,7	28,4	31,3	36,2	35,2	27,3	25,1	516,2
INM CM5 0	41,7	83,5	91,9	90,2	57,4	37,4	38,6	33,3	29,1	30,9	25,7	27,0	586,7
KACE 1 0 G	45,0	78,0	111,6	103,5	71,6	53,8	36,0	16,7	11,9	10,9	12,1	21,6	572,7
MIRO 6	36,5	73,3	91,8	130,2	101,7	80,6	49,3	20,3	10,9	11,3	12,2	20,4	638,5
MIROC ES2L	50,3	110,3	142,5	140,7	103,5	64,1	40,0	21,1	21,0	24,8	24,3	22,9	765,4
MPI ESM1 2 LR	28,1	66,1	95,0	104,5	79,6	60,5	33,0	18,5	12,9	12,4	10,2	14,9	535,7
MRI ESM2 0	75,3	152,5	175,9	171,0	123,1	112,7	74,7	47,8	39,4	43,1	33,8	39,5	1088,7
NESM3	18,2	52,9	95,7	98,0	89,2	62,1	34,4	16,3	11,8	12,3	10,1	13,0	513,9
NORESM2	24,5	66,0	91,0	86,8	57,8	42,7	31,1	19,8	24,1	21,0	21,1	20,0	505,9
TAIESM1	38,8	92,9	134,1	115,3	79,9	43,7	35,0	27,1	34,2	46,9	42,8	38,0	728,8
CR2MET	71,5	165,4	199,3	168,3	139,2	82,2	57,1	39,4	33,1	24,6	26,6	35,1	1041,7

Tabla B.1: RMSE anual (suma del RMSE por mes) de las precipitaciones estacionales normalizadas por la precipitación media anual de cada GCM con respecto al CR2Met corregido. En verde, los GCMs escogidos.

GCM	RMSE [mm]
ACCESS	0.021
BCC CSM2 MR	0.022
CANESM 5	0.013
CESM2	0.021
CESM2 WACCM	0.020
CMCC CM2 SR5	0.033
CMCC ESM2	0.027
CNRM CM6	0.014
EC EARTH3 CC	0.029
GFDL ESM4	0.018
IITM ESM	0.026
INM CM4 8	0.028
INM CM5 0	0.021
KACE 1 0 G	0.012
MIRO 6	0.029
MIROC ES2L	0.009
MPI ESM1 2 LR	0.019
MRI ESM2 0	0.015
NESM3	0.027
NORESM2	0.015
TAIESM1	0.022

Anexo C

Temperatura y precipitación proyectadas

C.1. Río Choapa en Cuncumén

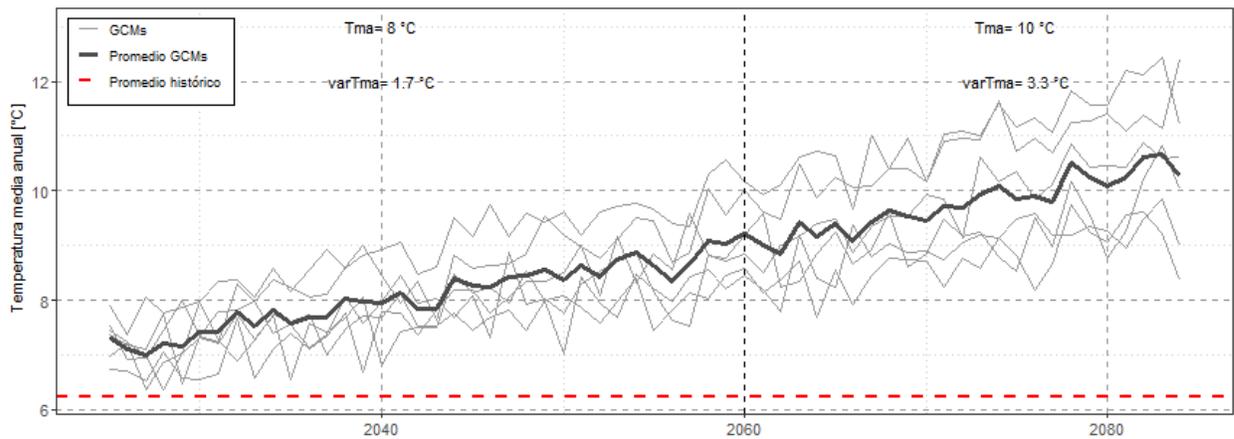


Figura C.1: Proyecciones de temperatura media anual en la cuenca del río Choapa, y sus variaciones relativas al periodo histórico.

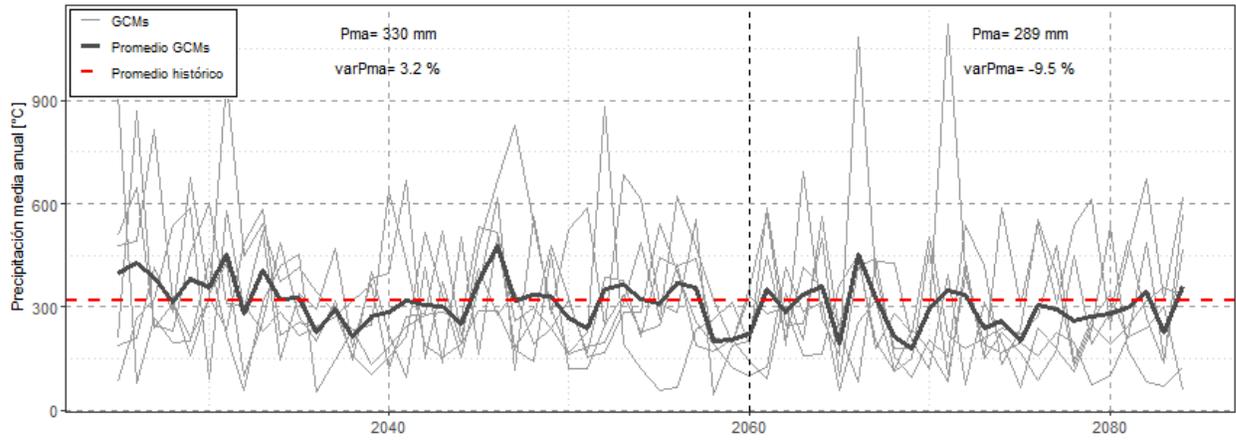


Figura C.2: Proyecciones de precipitación anual en la cuenca del río Choapa, y sus variaciones relativas al periodo histórico.

C.2. Río Aconcagua en Chacabuquito

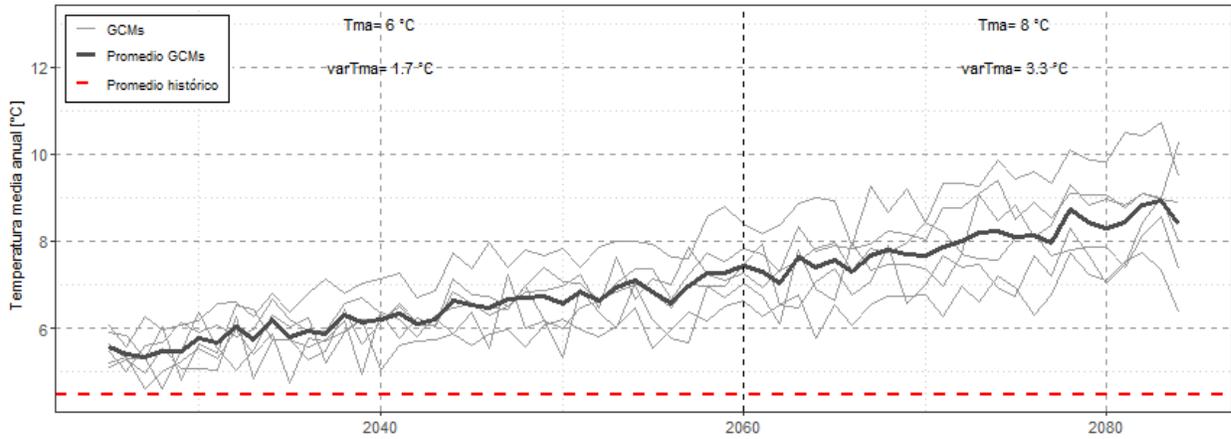


Figura C.1: Proyecciones de temperatura media anual en la cuenca del río Aconcagua, y sus variaciones relativas al periodo histórico.

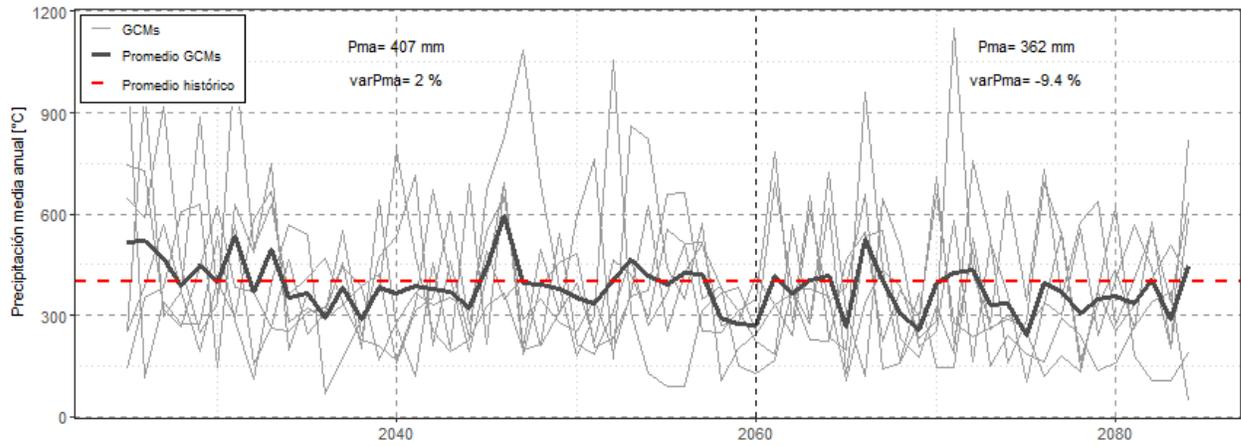


Figura C.2: Proyecciones de precipitación anual en la cuenca del río Aconcagua, y sus variaciones relativas al periodo histórico.

C.3. Río Maipo en El Manzano

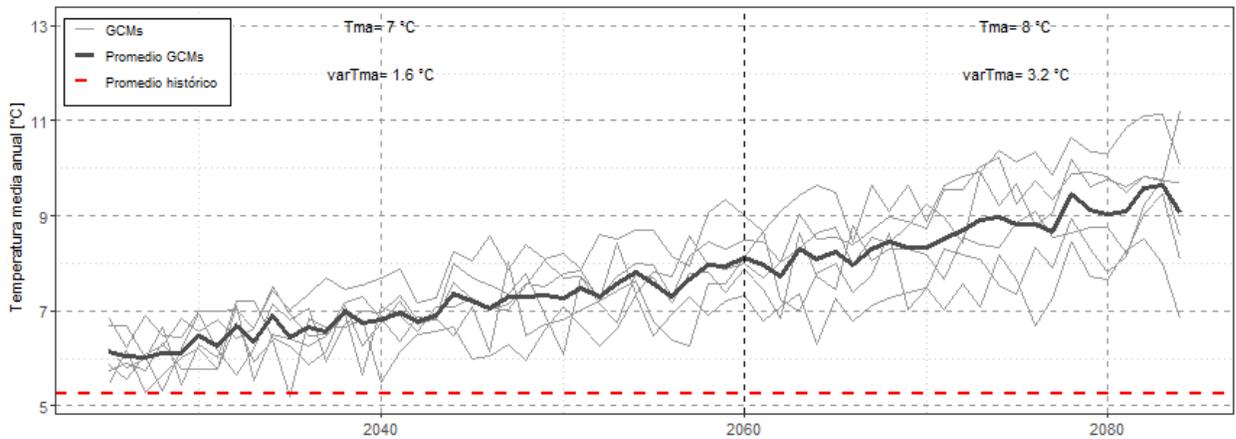


Figura C.1: Proyecciones de temperatura media anual en la cuenca del río Maipo, y sus variaciones relativas al periodo histórico.

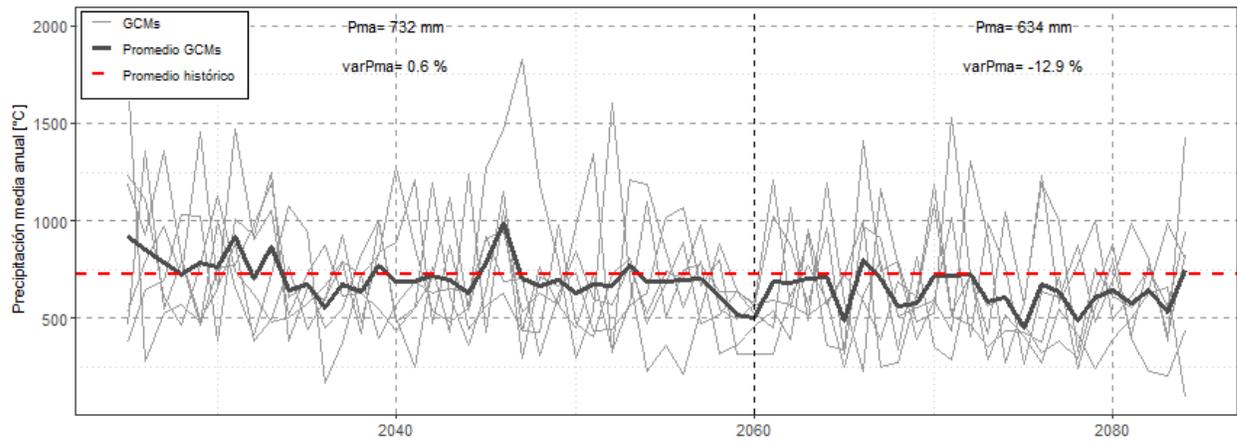


Figura C.2: Proyecciones de precipitación anual en la cuenca del río Maipo, y sus variaciones relativas al periodo histórico.

Anexo D

Calibración del modelo hidrológico

Tabla D.1: Parámetros calibrados por cuenca y el rango utilizado.

Parámetro	Rango	Choapa	Aconcagua	Maipo
SFCF	0,4; 1,5	1,50	1,46	1,40
Tr	-1,5; 2,5	1,89	1,98	2,49
Tt	0; 3	2,99	2,81	0,08
fm	1; 10	4,23	2,69	1,20
fc	50; 500	120,36	124,02	477,72
lp	0,3; 1	0,83	1,00	0,85
Beta	0; 20	0,86	0,13	0,41
K0	0,08; 0,11	0,09	0,09	0,09
K1	0,06; 0,079	0,07	0,07	0,06
K2	0,01; 0,059	0,02	0,02	0,01
uzl	3; 5	4,99	3,87	4,95
perc	0; 2,9	1,84	2,33	2,78
Bmax	1; 7	3,48	1,49	1,83

Tabla D.2: Métricas de diagnóstico del modelo hidrológico en las tres cuencas de estudio, para los periodos de calibración y de validación.

Cuenca	Choapa		Aconcagua		Maipo	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación	Calibración	Validación
RMSE [-]	0,38	0,68	0,46	0,81	0,65	0,9
PBIAS [%]	0,1	12,1	-0,5	2,7	-2,9	-1,4
NSE [-]	0,73	0,63	0,84	0,69	0,75	0,69
R^2 [-]	0,75	0,79	0,84	0,79	0,77	0,7
KGE [-]	0,87	0,68	0,92	0,77	0,87	0,81
BiasFMS [%]	0,33	0,42	-0,05	0,06	-0,14	-0,23
BiasFHV [%]	3,88	29,43	-0,5	16,6	-1,64	-13,78
BiasFLV [%]	-86,47	-113,27	-74,03	-103,07	-11,74	-96,2
BiasFMM [%]	6,17	-9,39	3,11	-6,35	2,19	6,36

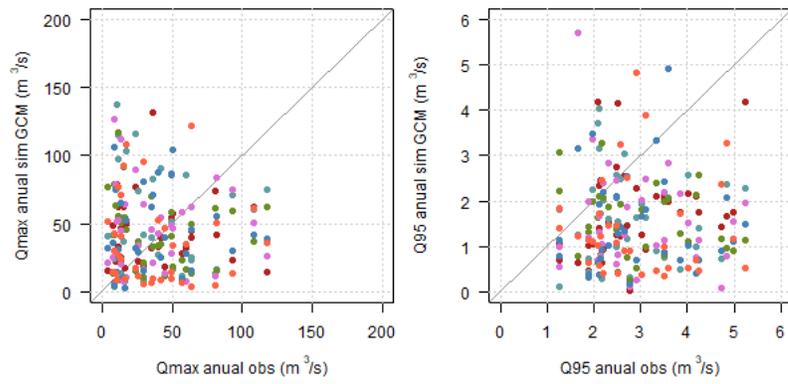


Figura D.1: Comparación de valores de Q máximos anuales y Q95 para cada GCM con lo observado en el período histórico en la cuenca río Choapa en Cuncumén

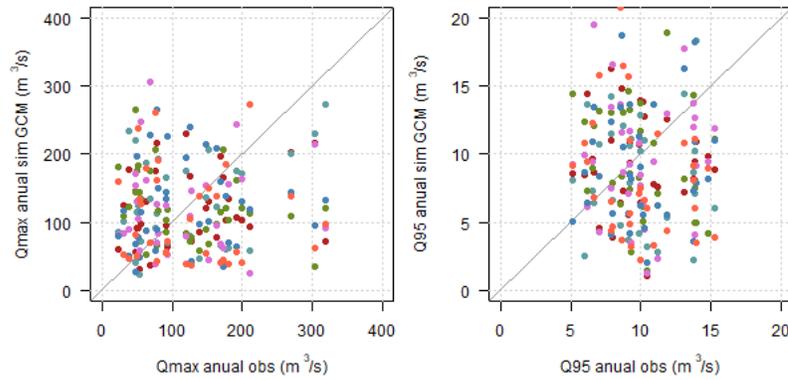


Figura D.2: Comparación de valores de Q máximos anuales y Q95 para cada GCM con lo observado en el período histórico en la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito

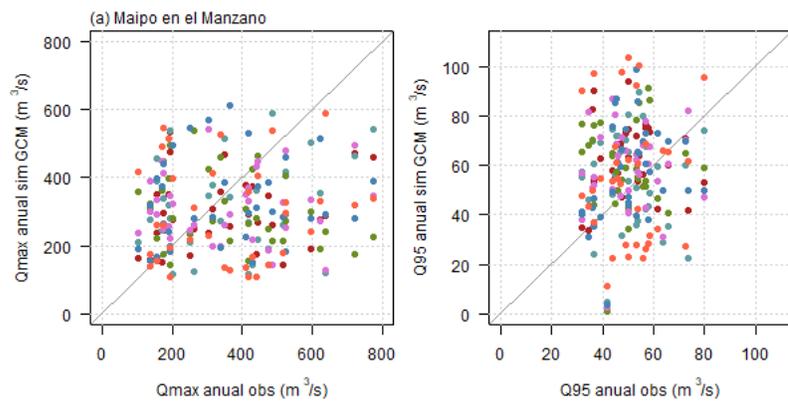


Figura D.3: Comparación de valores de Q máximos anuales y Q95 para cada GCM con lo observado en el período histórico en la cuenca Maipo en el Manzano

Anexo E

Caudales proyectados

E.1. Caudales medios anuales proyectados

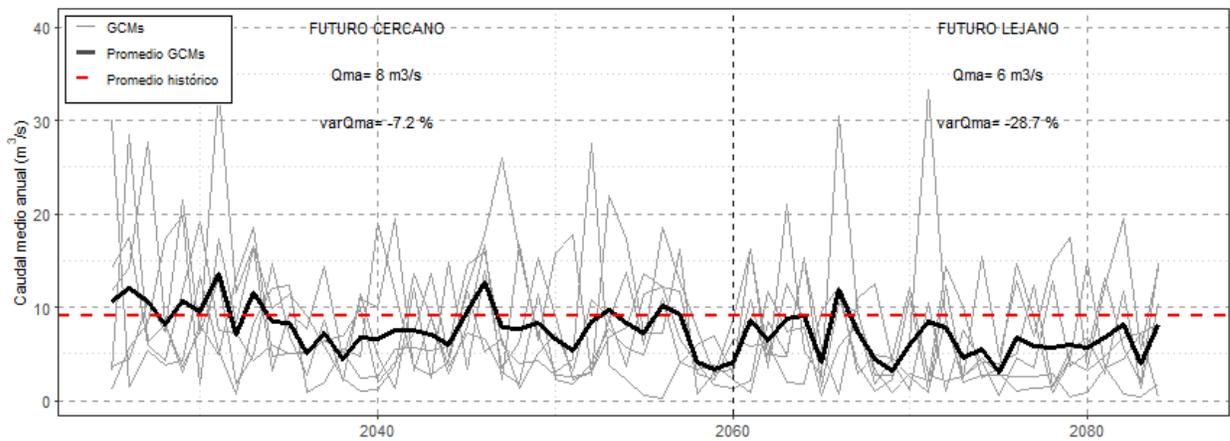


Figura E.1: Caudales medios anuales proyectados para la cuenca río Choapa en Cuncumén

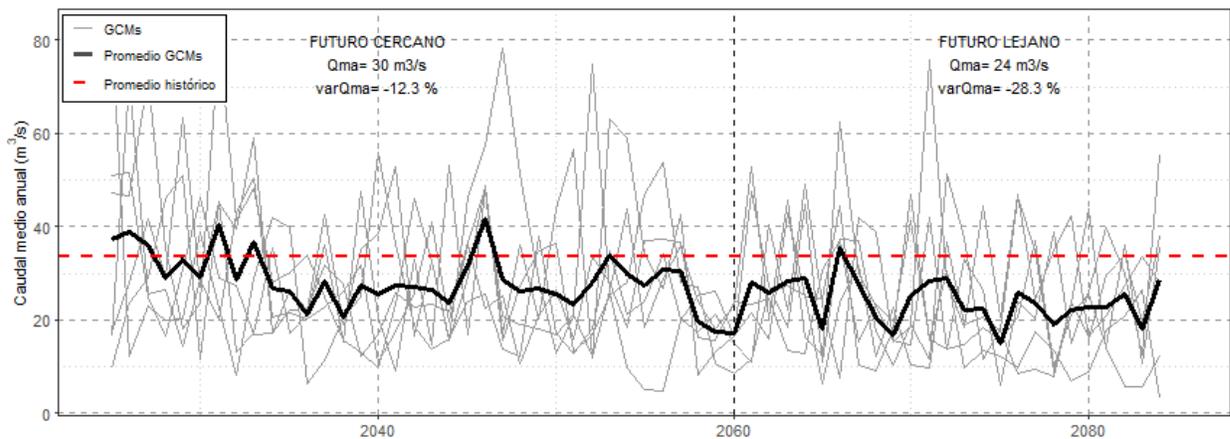


Figura E.2: Caudales medios anuales proyectados para la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito

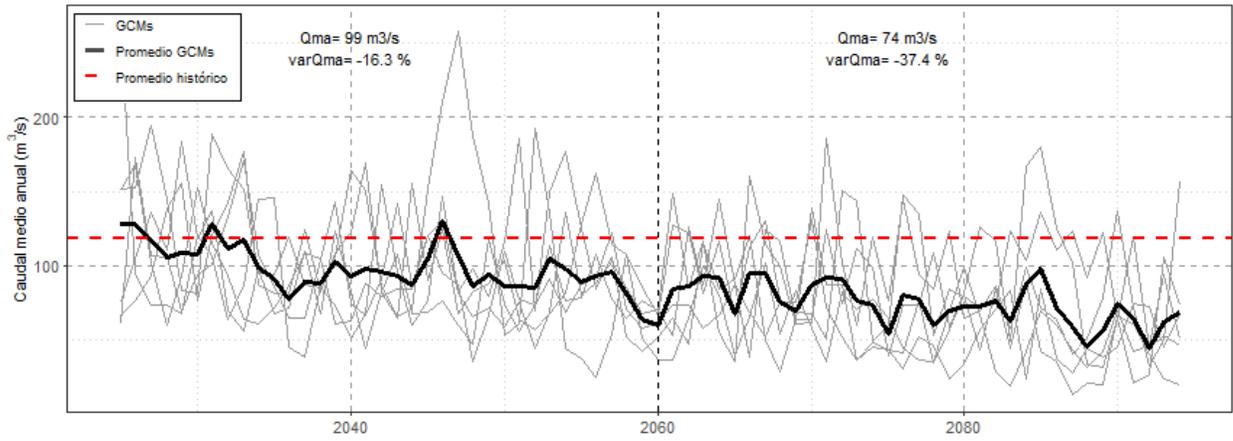


Figura E.3: Caudales medios anuales proyectados para la cuenca río Maipo en el Manzano

E.2. Caudales máximos anuales proyectados

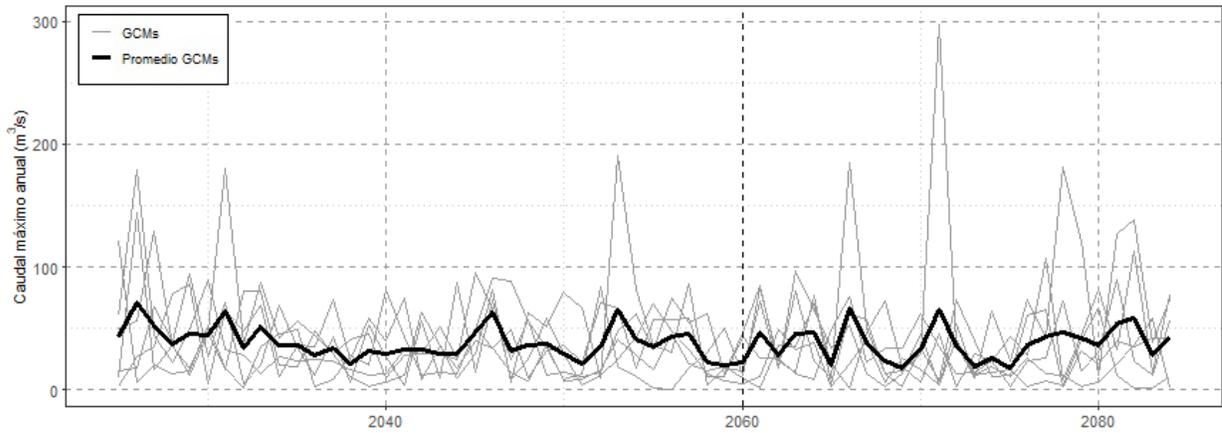


Figura E.1: Caudales máximos anuales proyectados para la cuenca río Choapa en Cuncumén

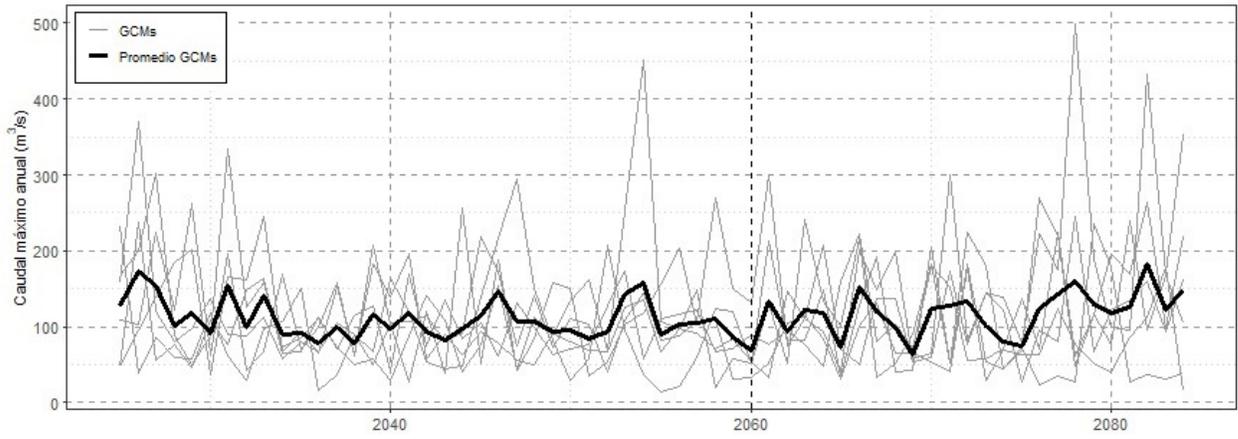


Figura E.2: Caudales máximos anuales proyectados para la cuenca río Aconcagua en Chacabuco

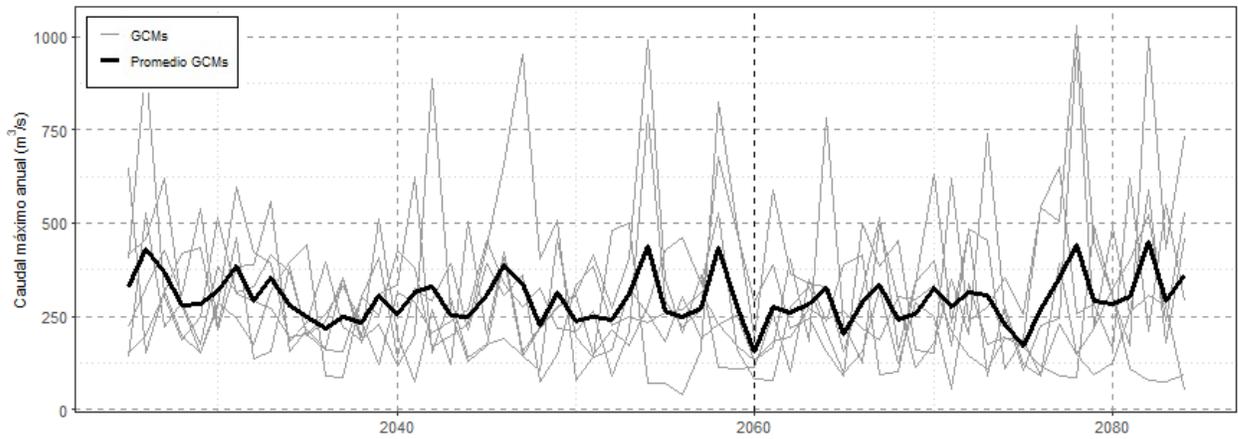


Figura E.3: Caudales máximos anuales proyectados para la cuenca río Maipo en el Manzano

E.3. Caudales anuales con probabilidad de excedencia de 95 % proyectados

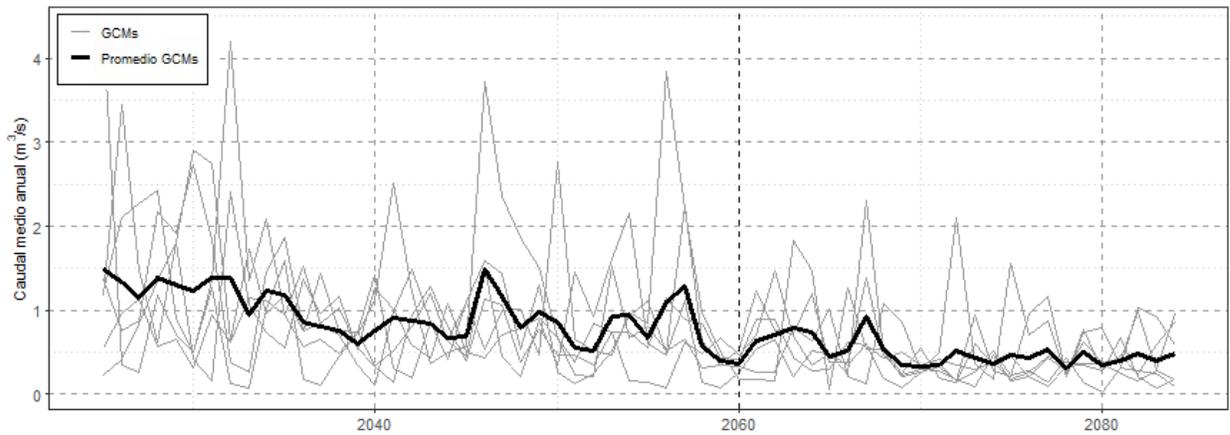


Figura E.1: Caudales anuales con probabilidad de excedencia de 95 % proyectados para la cuenca río Choapa en Cuncumén

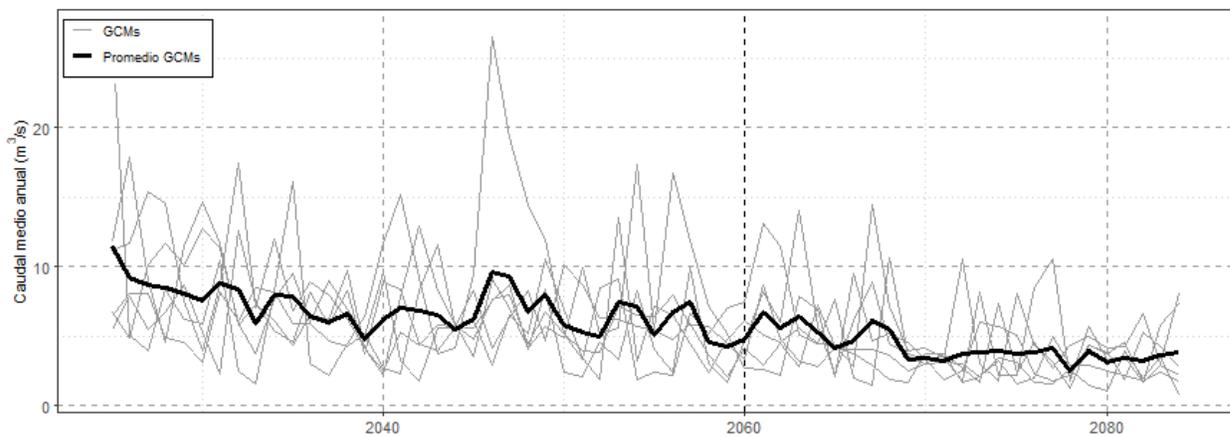


Figura E.2: Caudales anuales con probabilidad de excedencia de 95 % proyectados para la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito

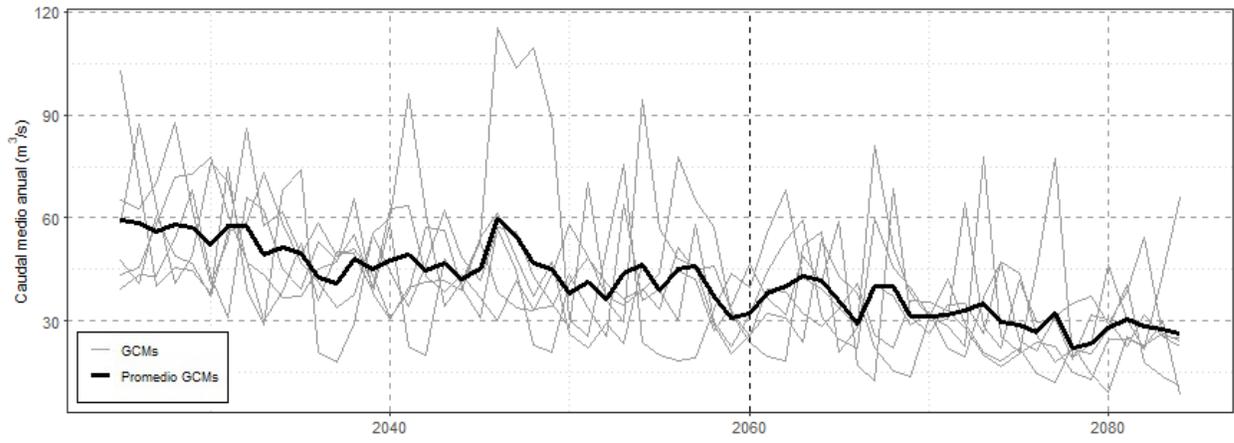


Figura E.3: Caudales anuales con probabilidad de excedencia de 95 % proyectados para la cuenca río Maipo en el Manzano

Anexo F

Análisis de frecuencia de la precipitación máxima anual

Tabla F.1: Análisis de frecuencia de la precipitación máxima anual en el río Choapa en Cuncumén

PERIODO HISTÓRICO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Pp T=2 [mm]	Pp T=10 [mm]	Pp T=20 [mm]	Pp T=50 [mm]
1	evd	3	7,815	0,400	0,23	0,08	0,19	53,3	83,9	95,5	110,6
2	gamma	3	7,815	0,400	0,23	0,08	0,20	51,6	90,1	103,6	120,3
3	weibull	3	7,815	0,800	0,23	0,10	0,33	56,9	92,4	102,8	114,6
4	logis	3	7,815	3,600	0,23	0,06	0,15	53,2	82,5	92,5	105,1
5	logis	3	7,815	3,600	0,23	0,07	0,17	59,5	92,4	103,6	117,7
6	gamma	3	7,815	0,800	0,23	0,07	0,17	52,9	89,3	102,0	117,6
FUTURO CERCANO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Pp T=2 [mm]	Pp T=10 [mm]	Pp T=20 [mm]	Pp T=50 [mm]
1	weibull	3	7,815	2,800	0,23	0,13	0,66	53,9	95,2	107,9	122,4
2	gamma	3	7,815	0,400	0,23	0,08	0,20	57,2	111,7	131,6	156,5
3	lnorm	3	7,815	7,200	0,23	0,13	0,31	49,8	85,2	99,1	117,6
4	gamma	3	7,815	5,200	0,23	0,14	0,54	51,4	87,3	99,8	115,1
5	logis	3	7,815	3,600	0,23	0,07	0,17	51,9	77,9	86,8	98,0
6	weibull	3	7,815	0,800	0,23	0,11	0,34	51,6	93,8	107,0	122,1
FUTURO LEJANO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Pp T=2 [mm]	Pp T=10 [mm]	Pp T=20 [mm]	Pp T=50 [mm]
1	gevd	2	5,991	0,800	0,23	0,10	0,18	52,6	83,1	93,4	105,7
2	evd	3	7,815	1,200	0,23	0,09	0,22	44,4	81,0	94,9	113,0
3	evd	3	7,815	2,400	0,23	0,11	0,25	68,8	118,9	138,0	162,8
4	gevd	2	5,991	3,200	0,23	0,09	0,27	40,2	81,3	98,5	122,1
5	weibull	3	7,815	2,800	0,23	0,10	0,18	48,7	86,1	97,6	110,8
6	evd	3	7,815	2,000	0,23	0,06	0,16	45,2	85,9	101,5	121,6

Tabla F.2: Análisis de frecuencia de la precipitación máxima anual en el río Aconcagua en Chacabuquito

PERIODO HISTÓRICO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Pp T=2 [mm]	Pp T=10 [mm]	Pp T=20 [mm]	Pp T=50 [mm]
1	evd	3	7,815	2,800	0,23	0,11	0,40	57,7	86,4	97,3	111,5
2	norm	3	7,815	2,000	0,23	0,09	0,29	58,9	89,7	98,4	108,2
3	logis	3	7,815	0,400	0,23	0,06	0,26	62,8	90,6	100,0	112,0
4	norm	3	7,815	1,600	0,23	0,10	0,20	59,0	90,2	99,0	108,9
5	logis	3	7,815	2,000	0,23	0,08	0,29	60,5	90,9	101,2	114,3
6	weibull	3	7,815	4,000	0,23	0,11	0,46	59,7	94,2	104,1	115,2
FUTURO CERCANO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Pp T=2 [mm]	Pp T=10 [mm]	Pp T=20 [mm]	Pp T=50 [mm]
1	logis	3	7,815	2,000	0,23	0,11	0,70	57,3	89,0	99,8	113,5
2	evd	3	7,815	4,000	0,23	0,12	0,59	61,8	106,6	123,7	145,8
3	lnorm	3	7,815	5,200	0,23	0,10	0,44	55,8	90,5	103,9	121,2
4	evd	3	7,815	4,400	0,23	0,15	0,58	53,9	88,5	101,8	118,9
5	gamma	3	7,815	4,800	0,23	0,10	0,45	49,8	79,1	89,0	101,1
6	norm	3	7,815	4,800	0,23	0,12	0,52	61,7	97,0	106,9	118,2
FUTURO LEJANO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Pp T=2 [mm]	Pp T=10 [mm]	Pp T=20 [mm]	Pp T=50 [mm]
1	logis	3	7,815	2,000	0,23	0,11	0,70	58,3	83,9	92,6	103,7
2	lnorm	3	7,815	7,200	0,23	0,15	0,84	49,3	93,6	112,4	137,9
3	lnorm	3	7,815	5,200	0,23	0,10	0,44	71,2	116,4	133,8	156,5
4	lnorm	3	7,815	4,800	0,23	0,17	1,01	48,6	99,5	121,9	153,2
5	evd	3	7,815	4,800	0,23	0,11	0,50	51,4	90,5	105,4	124,7
6	gamma	3	7,815	6,800	0,23	0,14	0,45	51,1	92,5	107,2	125,4

Tabla F.3: Análisis de frecuencia de la precipitación máxima anual en el río Maipo en el Manzano

PERIODO HISTÓRICO											
GCM	Distribución	Grados de lib.	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Pp T=2 [mm]	Pp T=10 [mm]	Pp T=20 [mm]	Pp T=50 [mm]
1	evd	3	7,8	1,6	0,23	0,11	0,26	70,1	102,3	114,7	130,6
2	gevd	2	6,0	2,8	0,23	0,09	0,21	74,6	98,2	100,7	100,7
3	gamma	3	7,8	1,6	0,23	0,08	0,17	73,3	107,1	118,3	131,7
4	gamma	3	7,8	5,2	0,23	0,14	0,50	71,0	110,4	123,6	139,8
5	logis	3	7,8	0,8	0,23	0,08	0,27	77,1	107,2	117,4	130,4
6	logis	3	7,8	0,4	0,23	0,07	0,19	71,5	102,9	113,6	127,2
FUTURO CERCANO											
GCM	Distribución	Grados de lib.	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Pp T=2 [mm]	Pp T=10 [mm]	Pp T=20 [mm]	Pp T=50 [mm]
1	gamma	3	7,8	5,2	0,23	0,13	0,35	64,1	110,2	126,3	146,1
2	evd	3	7,8	7,2	0,23	0,16	1,04	74,5	118,1	134,7	156,3
3	gamma	3	7,8	1,6	0,23	0,08	0,17	71,9	98,9	107,7	118,1
4	lnorm	3	7,8	7,2	0,23	0,13	0,51	70,2	104,2	116,5	132,1
5	lnorm	3	7,8	5,6	0,23	0,15	0,55	61,3	92,2	103,5	117,9
6	gevd	2	6,0	0,8	0,23	0,08	0,20	82,0	150,2	180,5	223,9
FUTURO LEJANO											
GCM	Distribución	Grados de lib.	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Pp T=2 [mm]	Pp T=10 [mm]	Pp T=20 [mm]	Pp T=50 [mm]
1	gamma	3	7,8	5,2	0,23	0,13	0,35	63,9	94,7	104,9	117,2
2	gamma	3	7,8	4,0	0,23	0,16	0,86	63,4	111,4	128,4	149,3
3	lnorm	3	7,8	1,2	0,23	0,09	0,21	82,3	129,7	147,6	170,6
4	weibull	3	7,8	5,2	0,23	0,15	0,54	64,9	107,6	120,1	134,4
5	lnorm	3	7,8	5,6	0,23	0,15	0,55	68,8	113,8	131,3	154,2
6	lnorm	3	7,8	0,8	0,23	0,13	0,48	68,8	117,5	136,8	162,3

Anexo G

Frecuencia de índice SPI para los períodos históricos, futuro cercano y lejano

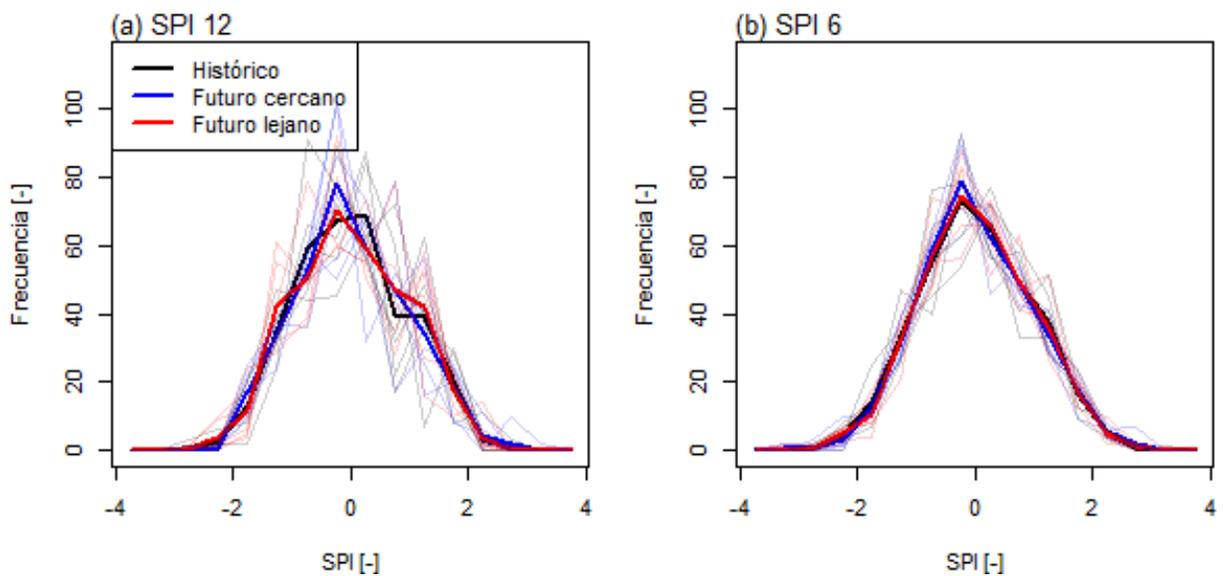


Figura G.1: Frecuencias de valores de SPI para cada período en la cuenca río Choapa en Cuncumén

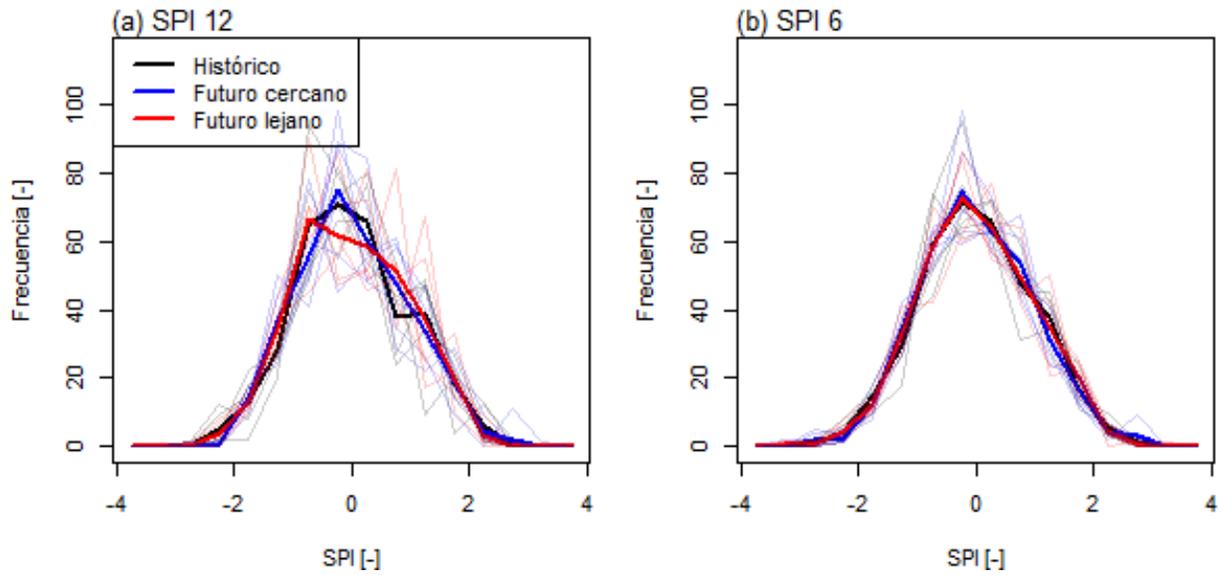


Figura G.2: Frecuencias de valores de SPI para cada período en la cuenca río Aconcagua en Chacabucuito

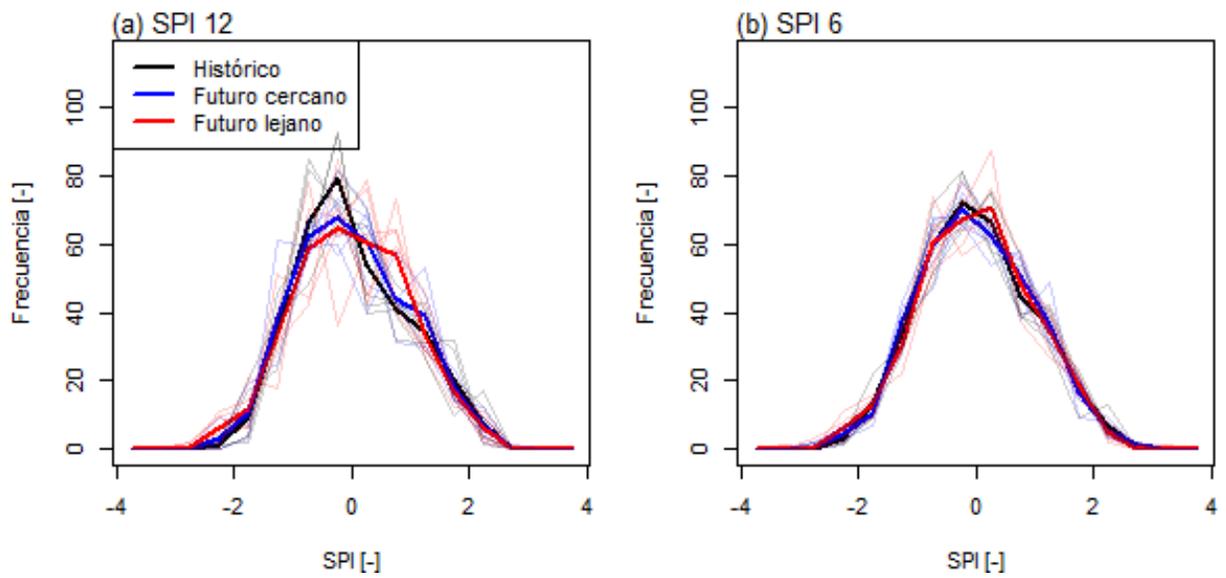


Figura G.3: Frecuencias de valores de SPI para cada período en la cuenca Maipo en el Manzano

Anexo H

Series de SPI

H.1. Cuenca río Choapa en Cuncumén

H.1.1. SPI 12

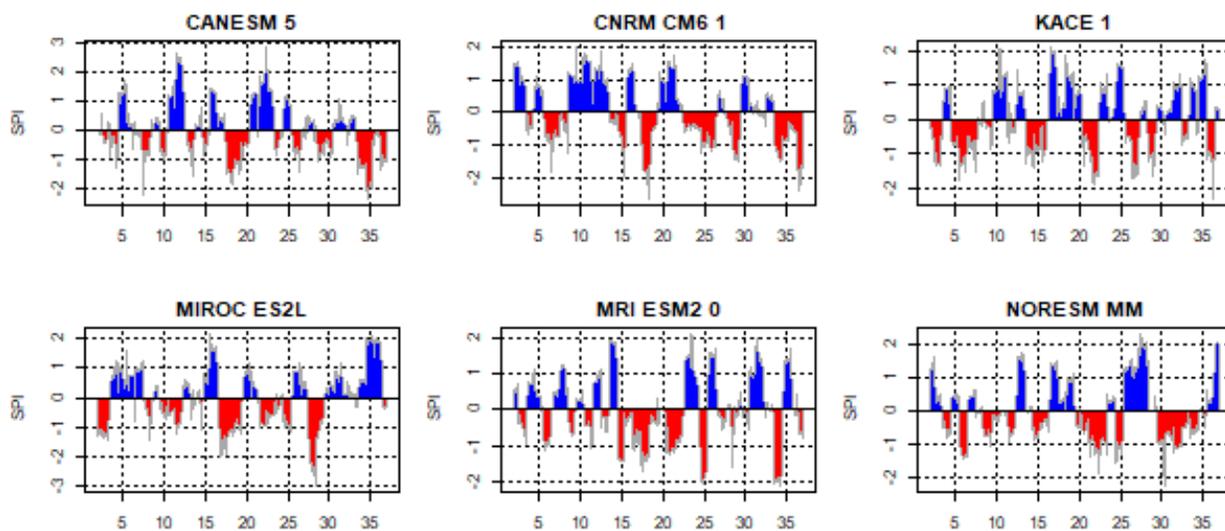


Figura H.1: Serie mensual de índices SPI 12 para el período histórico en la cuenca río Choapa en Cuncumén

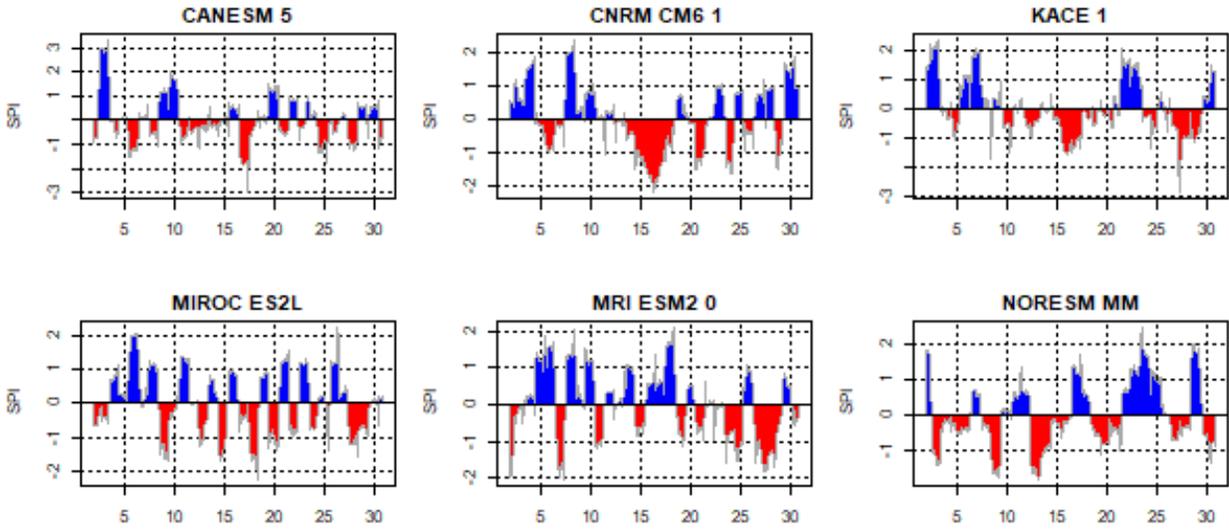


Figura H.2: Serie mensual de índices SPI 12 para el período futuro cercano (2025-2055) en la cuenca río Choapa en Cuncumén

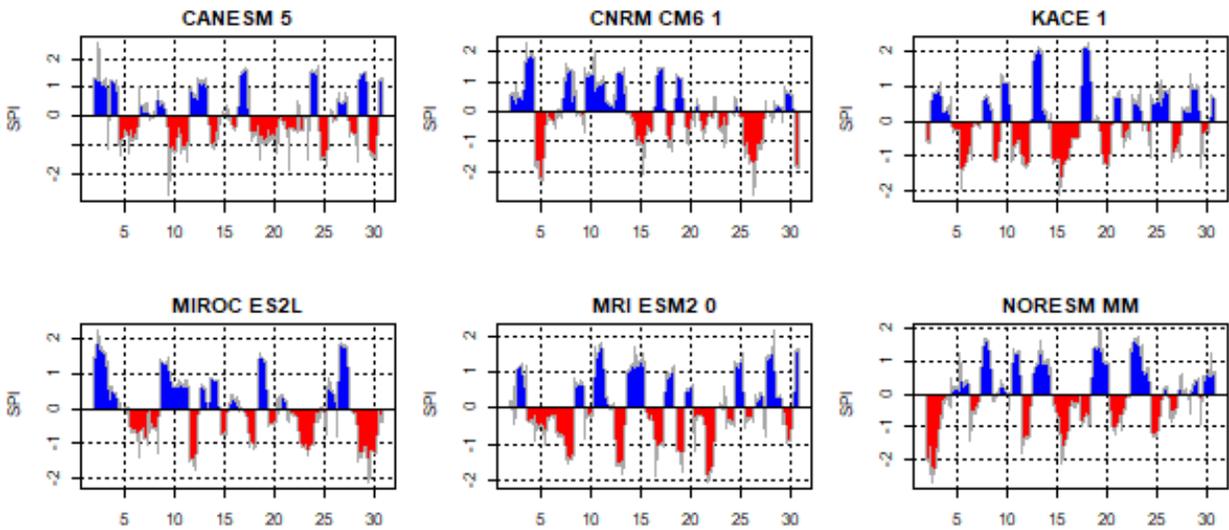


Figura H.3: Serie mensual de índices SPI 12 para el período futuro lejano (2055-2085) en la cuenca río Choapa en Cuncumén

H.2. Cuenca río Aconcagua en Chacabuquito

H.2.1. SPI 12

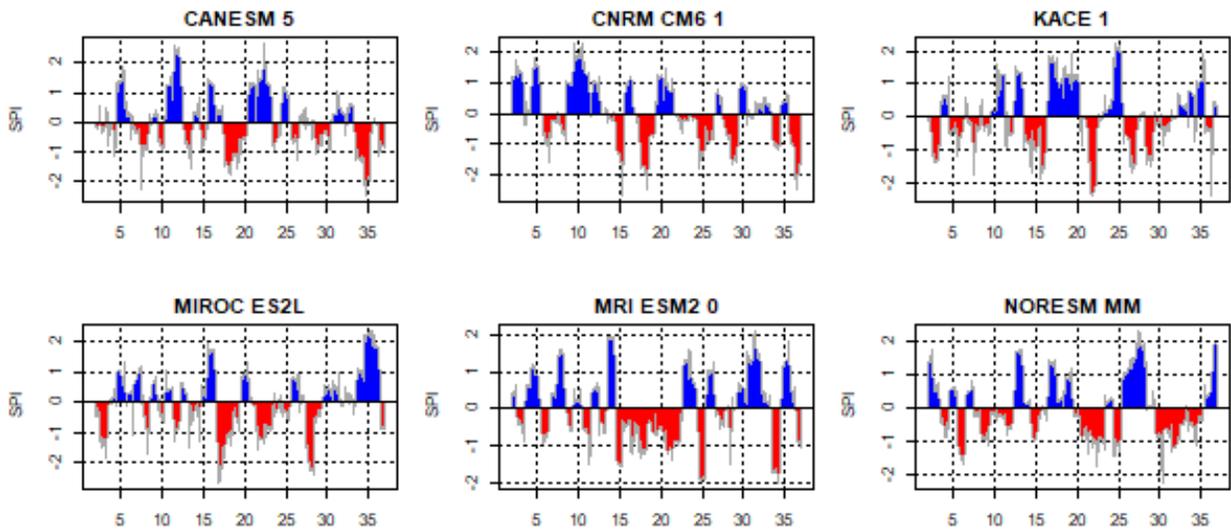


Figura H.1: Serie mensual de índices SPI 12 para el período histórico en la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito

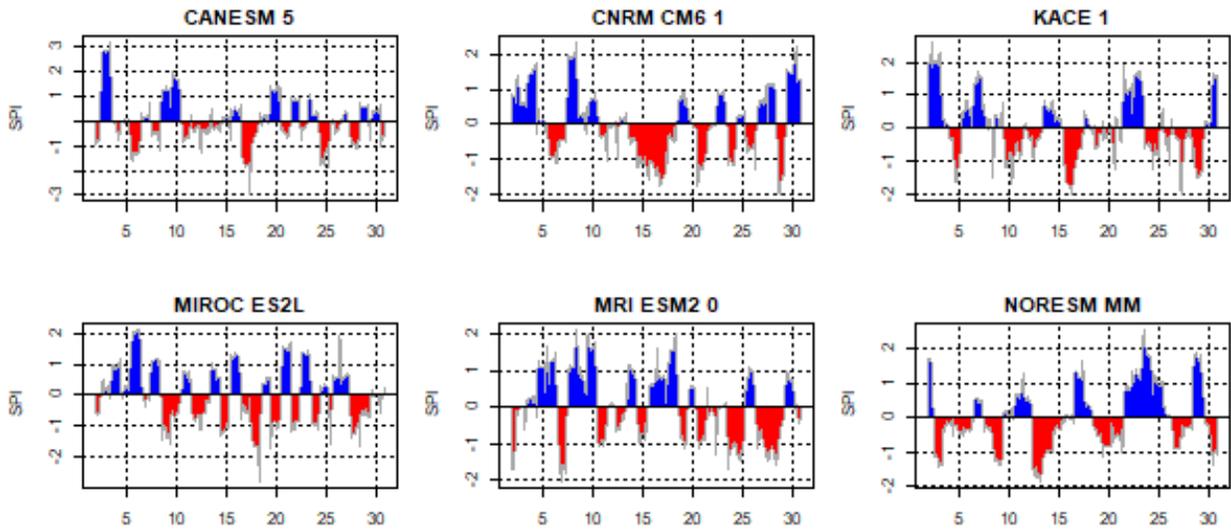


Figura H.2: Serie mensual de índices SPI 12 para el período futuro cercano (2025-2055) en la cuenca río Aconcagua en Chacabuquito

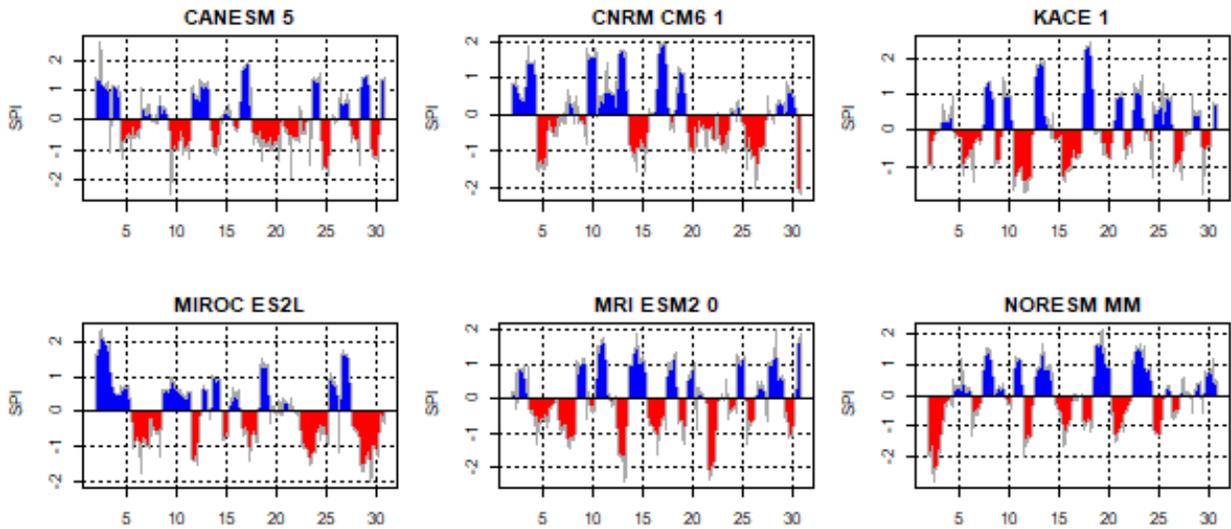


Figura H.3: Serie mensual de índices SPI 12 para el período futuro lejano (2055-2085) en la cuenca río Aconcagua en Chacabucuito

H.3. Cuenca río Maipo en el Manzano

H.3.1. SPI 12

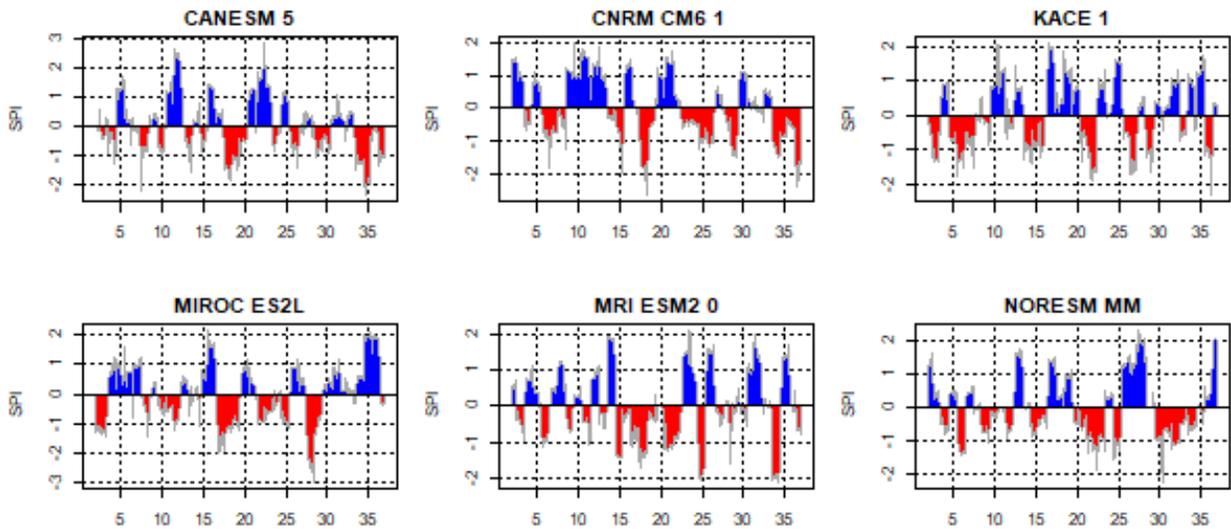


Figura H.1: Serie mensual de índices SPI 12 para el período histórico en la cuenca río Maipo en el Manzano

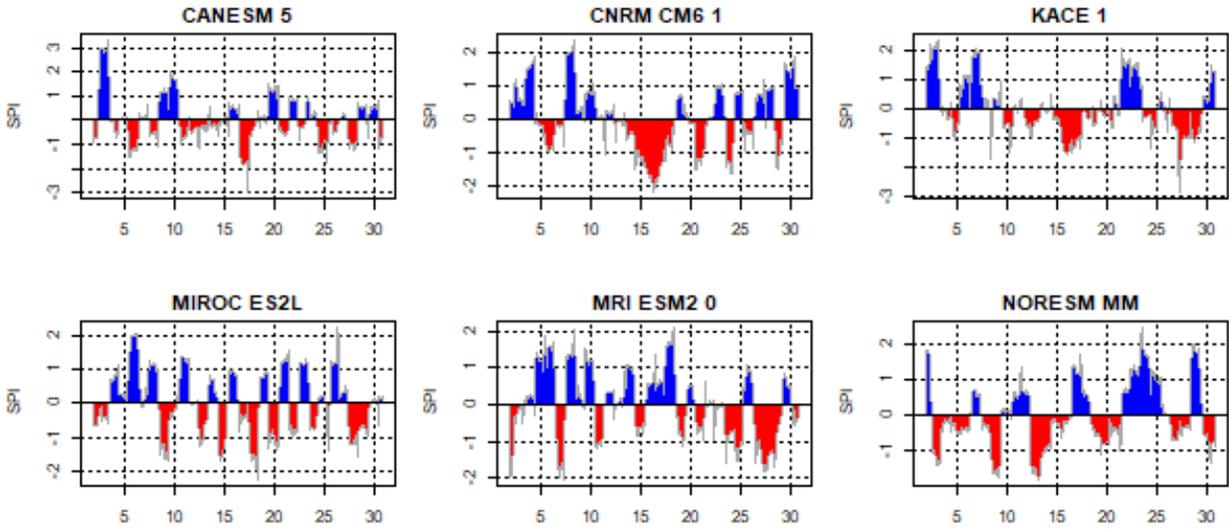


Figura H.2: Serie mensual de índices SPI 12 para el período futuro cercano (2025-2055) en la cuenca río Maipo en el Manzano

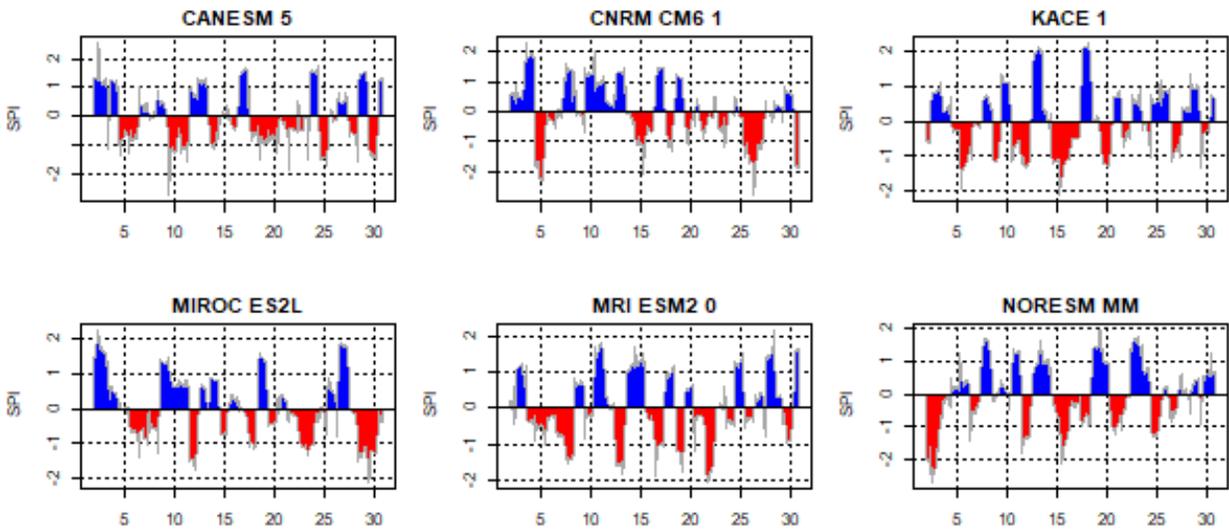


Figura H.3: Serie mensual de índices SPI 12 para el período futuro lejano (2055-2085) en la cuenca río Maipo en el Manzano

Anexo I

Análisis de frecuencia de caudal medio diario máximo anual

Tabla I.1: Análisis de frecuencia de caudal medio diario máximo anual en el río Choapa en Cuncumén, periodo nival.

PERIODO HISTÓRICO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Q T=2 [m3/s]	Q T=10 [m3/s]	Q T=20 [m3/s]	Q T=50 [m3/s]
1	weibull	3	7,815	1	0,23	0,07	0,21	36,9	77,9	91,7	108,3
2	lnorm	3	7,815	0,586	0,23	0,12	0,37	31,6	111,4	159,3	238,1
3	logis	3	7,815	0,586	0,23	0,1	0,37	41,1	75	86,6	101,2
4	weibull	3	7,815	0,586	0,23	0,11	0,21	35,9	84,1	101,4	122,6
5	exp	4	9,488	3,897	0,23	0,15	0,29	28,8	95,7	124,5	162,6
6	lnorm	3	7,815	3,897	0,23	0,11	0,46	21,6	75,4	107,5	160,3
FUTURO CERCANO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Q T=2 [m3/s]	Q T=10 [m3/s]	Q T=20 [m3/s]	Q T=50 [m3/s]
1	gevd	2	5,991	4,31	0,23	0,1	0,25	13,5	45,6	72	130,1
2	weibull	3	7,815	2,241	0,23	0,1	0,27	31	86,4	108,2	135,9
3	evd	3	7,815	2,241	0,23	0,11	0,32	24,5	50,4	60,4	73,2
4	gamma	3	7,815	1,414	0,23	0,12	0,26	26,8	72,7	91,3	115,4
5	exp	4	9,488	3,897	0,23	0,15	0,29	21,5	71,5	93	121,5
6	exp	4	9,488	6,862	0,23	0,11	0,57	21,6	71,6	93,2	121,7
FUTURO LEJANO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Q T=2 [m3/s]	Q T=10 [m3/s]	Q T=20 [m3/s]	Q T=50 [m3/s]
1	gevd	2	5,991	4,31	0,23	0,1	0,25	7,6	22,4	32,3	51
2	gevd	2	5,991	2,241	0,23	0,12	0,41	8,4	31,9	49,7	86,6
3	weibull	3	7,815	1	0,23	0,1	0,26	22,2	55,1	67,3	82,4
4	lnorm	3	7,815	6,69	0,23	0,16	0,7	9,6	54,6	89,2	155,2
5	lnorm	3	7,815	2,241	0,23	0,14	0,59	10,5	41,1	60,5	93,5
6	gevd	2	5,991	4,724	0,23	0,12	0,52	8,1	31	48,8	86,1

Tabla I.2: Análisis de frecuencia de caudal medio diario máximo anual en el río Choapa en Cuncumén, periodo pluvial.

PERIODO HISTÓRICO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Pp T=2 [mm]	Pp T=10 [mm]	Pp T=20 [mm]	Pp T=50 [mm]
1	lnorm	3	7,815	0,586	0,23	0,08	0,20	17,6	38,4	47,9	61,5
2	gevd	2	5,991	2,655	0,23	0,11	0,32	15,0	39,7	55,3	83,5
3	gamma	3	7,815	2,241	0,23	0,10	0,20	22,1	45,6	54,4	65,4
4	lnorm	3	7,815	1,000	0,23	0,08	0,24	16,0	38,8	50,0	66,4
5	gamma	3	7,815	1,828	0,23	0,08	0,20	19,8	46,0	56,2	69,1
6	lnorm	3	7,815	1,828	0,23	0,10	0,30	14,7	47,8	66,8	97,3
FUTURO CERCANO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Pp T=2 [mm]	Pp T=10 [mm]	Pp T=20 [mm]	Pp T=50 [mm]
1	weibull	3	7,815	1,828	0,23	0,12	0,29	33,4	69,3	81,3	95,6
2	gamma	3	7,815	6,690	0,23	0,15	0,54	32,6	96,3	122,8	157,5
3	gevd	2	5,991	2,241	0,23	0,10	0,21	21,1	62,5	93,1	155,0
4	norm	3	7,815	4,862	0,23	0,14	1,37	19,6	38,5	43,8	49,9
5	norm	3	7,815	3,069	0,23	0,12	0,73	27,7	51,1	57,7	65,1
6	exp	4	9,488	2,655	0,23	0,13	0,56	22,3	74,2	96,6	126,1
FUTURO LEJANO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Pp T=2 [mm]	Pp T=10 [mm]	Pp T=20 [mm]	Pp T=50 [mm]
1	norm	3	7,815	6,379	0,23	0,17	0,78	40,6	76,5	86,7	98,1
2	exp	4	9,488	5,517	0,23	0,18	0,53	19,8	65,7	85,5	111,6
3	lnorm	3	7,815	2,241	0,23	0,13	0,39	44,7	147,5	206,8	302,6
4	exp	4	9,488	7,621	0,23	0,17	0,36	12,6	41,7	54,2	70,8
5	gevd	2	5,991	4,310	0,23	0,09	0,17	23,3	59,7	76,7	101,8
6	exp	4	9,488	2,655	0,23	0,13	0,56	22,3	73,9	96,2	125,6

Tabla I.3: Análisis de frecuencia de caudal medio diario máximo anual en el río Aconcagua en Chacabucuito, periodo nival.

PERIODO HISTÓRICO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Q T=2 [m3/s]	Q T=10 [m3/s]	Q T=20 [m3/s]	Q T=50 [m3/s]
1	gamma	3	7,815	3,90	0,23	0,10	0,26	104,7	185,2	213,7	248,8
2	weibull	3	7,815	1,83	0,23	0,10	0,24	100,0	205,9	241,3	283,3
3	weibull	3	7,815	1,41	0,23	0,11	0,19	107,7	185,3	208,7	235,5
4	gevd	2	5,991	0,59	0,23	0,07	0,14	105,0	201,6	240,9	293,9
5	lnorm	3	7,815	3,90	0,23	0,10	0,33	97,6	219,5	276,2	357,7
6	gevd	2	5,991	3,07	0,23	0,13	0,40	69,5	191,4	275,9	439,1
FUTURO CERCANO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Q T=2 [m3/s]	Q T=10 [m3/s]	Q T=20 [m3/s]	Q T=50 [m3/s]
1	gevd	2	5,991	5,55	0,23	0,11	0,28	51,6	114,7	152,9	219,9
2	gevd	2	5,991	1,83	0,23	0,11	0,31	85,2	190,1	245,0	332,5
3	gevd	2	5,991	2,66	0,23	0,08	0,18	75,7	124,1	140,1	159,0
4	weibull	3	7,815	3,07	0,23	0,09	0,27	102,3	201,2	233,4	271,2
5	lnorm	3	7,815	3,90	0,23	0,10	0,33	79,1	185,8	236,7	310,9
6	gamma	3	7,815	6,38	0,23	0,16	0,72	73,1	167,1	203,3	249,4
FUTURO LEJANO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Q T=2 [m3/s]	Q T=10 [m3/s]	Q T=20 [m3/s]	Q T=50 [m3/s]
1	lnorm	3	7,815	3,90	0,23	0,09	0,28	38,4	74,2	89,5	110,4
2	lnorm	3	7,815	5,55	0,23	0,13	0,62	37,7	90,0	115,2	152,0
3	lnorm	3	7,815	3,90	0,23	0,10	0,34	57,4	114,5	139,3	173,6
4	lnorm	3	7,815	1,41	0,23	0,07	0,22	51,9	134,2	175,6	237,8
5	weibull	3	7,815	5,14	0,23	0,11	0,34	59,7	122,1	142,9	167,5
6	lnorm	3	7,815	3,90	0,23	0,13	0,50	43,9	105,5	135,2	178,9

Tabla I.4: Análisis de frecuencia de caudal medio diario máximo anual en el río Aconcagua en Chacabuquito, periodo pluvial.

PERIODO HISTÓRICO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Q T=2 [m3/s]	Q T=10 [m3/s]	Q T=20 [m3/s]	Q T=50 [m3/s]
1	lnorm	3	7,815	2,66	0,23	0,09	0,21	38,3	59,4	67,4	77,5
2	gevd	2	5,991	1,00	0,23	0,08	0,17	37,5	66,2	79,7	99,6
3	evd	3	7,815	4,72	0,23	0,10	0,31	43,2	70,8	81,3	95,0
4	gevd	2	5,991	3,90	0,23	0,13	0,33	40,0	69,0	80,9	97,2
5	evd	3	7,815	0,59	0,23	0,09	0,22	41,5	75,6	88,7	105,6
6	lnorm	3	7,815	5,14	0,23	0,11	0,45	42,7	75,3	88,4	105,9
FUTURO CERCANO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Q T=2 [m3/s]	Q T=10 [m3/s]	Q T=20 [m3/s]	Q T=50 [m3/s]
1	gevd	2	5,991	2,66	0,23	0,10	0,24	80,3	144,0	173,0	215,1
2	lnorm	3	7,815	1,83	0,23	0,08	0,22	71,1	165,6	210,5	275,7
3	lnorm	3	7,815	5,14	0,23	0,11	0,30	74,0	154,3	190,0	240,1
4	lnorm	3	7,815	5,55	0,23	0,13	0,33	43,2	76,5	90,0	108,0
5	gevd	2	5,991	1,41	0,23	0,10	0,21	59,9	103,9	123,4	151,2
6	lnorm	3	7,815	5,14	0,23	0,11	0,45	62,2	156,2	202,8	272,0
FUTURO LEJANO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Q T=2 [m3/s]	Q T=10 [m3/s]	Q T=20 [m3/s]	Q T=50 [m3/s]
1	gevd	2	5,991	2,66	0,23	0,10	0,24	95,2	199,2	263,4	377,3
2	lnorm	3	7,815	1,83	0,23	0,08	0,22	71,0	168,7	215,7	284,4
3	gevd	2	5,991	4,31	0,23	0,10	0,25	123,3	309,3	423,9	627,6
4	lnorm	3	7,815	5,55	0,23	0,13	0,33	46,7	105,9	133,5	173,4
5	gamma	3	7,815	3,07	0,23	0,09	0,25	87,3	159,9	185,9	218,1
6	gamma	3	7,815	4,86	0,23	0,14	0,47	93,8	212,9	258,6	316,7

Tabla I.5: Análisis de frecuencia de caudal medio diario máximo anual en el río Maipo en el Manzano, periodo nival.

PERIODO HISTÓRICO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Q T=2 [m3/s]	Q T=10 [m3/s]	Q T=20 [m3/s]	Q T=50 [m3/s]
1	logis	3	7,815	1,414	0,23	0,10	0,47	281,6	411,1	455,1	511,0
2	norm	3	7,815	3,483	0,23	0,13	0,42	279,8	456,2	506,2	562,4
3	lnorm	3	7,815	0,586	0,23	0,08	0,17	275,0	452,9	521,8	611,8
4	evd	3	7,815	1,828	0,23	0,09	0,25	297,7	467,3	532,2	616,1
5	weibull	3	7,815	1,414	0,23	0,14	0,59	304,4	485,9	538,4	597,4
6	gamma	3	7,815	2,241	0,23	0,14	0,55	239,2	469,5	553,8	659,3
FUTURO CERCANO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Q T=2 [m3/s]	Q T=10 [m3/s]	Q T=20 [m3/s]	Q T=50 [m3/s]
1	weibull	3	7,815	1,414	0,23	0,13	0,51	256,9	415,5	461,6	513,7
2	gevd	2	5,991	4,724	0,23	0,13	0,40	265,9	468,3	553,1	669,4
3	logis	3	7,815	3,483	0,23	0,09	0,29	233,2	338,0	373,7	418,8
4	gamma	3	7,815	3,897	0,23	0,07	0,20	249,5	451,6	523,5	612,6
5	lnorm	3	7,815	2,241	0,23	0,14	0,51	230,8	438,2	525,5	644,8
6	weibull	3	7,815	3,483	0,23	0,13	0,66	266,3	485,4	553,6	632,6
FUTURO LEJANO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Q T=2 [m3/s]	Q T=10 [m3/s]	Q T=20 [m3/s]	Q T=50 [m3/s]
1	gamma	3	7,815	4,034	0,23	0,09	0,35	129,3	235,0	272,6	319,3
2	lnorm	3	7,815	3,793	0,23	0,16	0,76	138,8	304,0	379,6	487,5
3	lnorm	3	7,815	0,586	0,23	0,08	0,17	182,0	330,2	390,9	472,7
4	norm	3	7,815	4,724	0,23	0,11	0,31	191,0	340,8	383,3	431,1
5	lnorm	3	7,815	2,241	0,23	0,14	0,51	190,7	386,8	472,7	592,3
6	weibull	3	7,815	3,483	0,23	0,13	0,66	187,9	374,3	435,4	507,5

Tabla I.6: Análisis de frecuencia de caudal medio diario máximo anual en el río Maipo en el Manzano, periodo pluvial.

PERIODO HISTÓRICO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Q T=2 [m3/s]	Q T=10 [m3/s]	Q T=20 [m3/s]	Q T=50 [m3/s]
1	gevd	2	5,991	3,069	0,23	0,10	0,22	135,9	226,3	268,1	329,2
2	lnorm	3	7,815	2,241	0,23	0,07	0,14	144,9	278,6	335,3	413,1
3	evd	3	7,815	5,552	0,23	0,12	0,57	145,6	225,3	255,8	295,2
4	lnorm	3	7,815	1,828	0,23	0,09	0,30	150,9	258,0	300,3	356,4
5	lnorm	3	7,815	1,000	0,23	0,10	0,33	142,7	277,2	334,7	413,7
6	gamma	3	7,815	4,724	0,23	0,10	0,27	159,2	312,6	368,7	439,0
FUTURO CERCANO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Q T=2 [m3/s]	Q T=10 [m3/s]	Q T=20 [m3/s]	Q T=50 [m3/s]
1	evd	3	7,815	4,724	0,23	0,12	0,34	170,3	272,8	312,0	362,7
2	gevd	2	5,991	3,069	0,23	0,08	0,16	179,0	440,2	607,2	911,7
3	lnorm	3	7,815	5,552	0,23	0,13	0,59	201,4	448,9	563,4	727,7
4	lnorm	3	7,815	1,828	0,23	0,09	0,30	131,1	209,3	239,0	277,5
5	evd	3	7,815	1,000	0,23	0,10	0,60	154,8	241,9	275,2	318,3
6	gevd	2	5,991	4,207	0,23	0,12	0,32	191,2	527,8	754,8	1184,4
FUTURO LEJANO											
GCM	Distribución	Grados de lib,	χ^2 tabulado	χ^2 calculado	KS tabulado	KS calculado	AD	Q T=2 [m3/s]	Q T=10 [m3/s]	Q T=20 [m3/s]	Q T=50 [m3/s]
1	evd	3	7,815	4,724	0,23	0,12	0,34	221,4	362,8	416,8	486,7
2	gevd	2	5,991	3,069	0,23	0,08	0,16	155,6	425,4	613,8	979,3
3	gamma	3	7,815	5,552	0,23	0,14	0,71	336,1	687,6	818,0	982,0
4	gevd	2	5,991	2,241	0,23	0,11	0,26	117,3	266,4	347,6	480,0
5	gevd	2	5,991	2,241	0,23	0,09	0,15	197,8	474,9	679,4	1092,1
6	lnorm	3	7,815	3,069	0,23	0,13	0,33	255,4	650,3	847,5	1141,9