



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

**IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN
PROYECCIONES DE SEQUÍA METEOROLÓGICA PARA
SECTORES PRODUCTIVOS AGRÍCOLAS DEL RÍO
COGOTÍ, REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

STEPHANIE KIM SERIA RÍOS

PROFESOR GUÍA
MIGUEL LAGOS ZUÑIGA

COMISIÓN
XIMENA VARGAS MESA
MAURICIO ZAMBRANO-BIGIARINI

SANTIAGO DE CHILE
2023

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN PROYECCIONES DE SEQUÍA METEOROLÓGICA PARA SECTORES PRODUCTIVOS AGRÍCOLAS DEL RÍO COGOTÍ, REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE

A partir del año 2010 y hasta la fecha, entre Coquimbo y la Araucanía, el déficit de precipitaciones ha persistido en torno al 30% respecto a una condición normal, siendo la zona norte la más crítica, donde el déficit en la pluviometría ha alcanzado valores del 85-90%. Bajo este escenario, sumado a las proyecciones cambio climático para Chile, la Dirección General de Aguas (DGA) ha reportado que la Región de Coquimbo es una de las zonas con mayor riesgo hídrico, con un déficit hídrico de 40 m³/s. Así, considerando que no existen registros hidrometeorológicos de eventos similares a la denominada “mega-sequía”, se desconoce cuáles y qué tan graves serán las consecuencias de este evento en la disponibilidad de recursos hídricos en la región y cómo podría cambiar la frecuencia y persistencia de sequías en el futuro.

En esta investigación se analizan los impactos del cambio climático en temperatura media, precipitación y recursos hídricos superficiales en la cuenca del embalse Cogotí, así como las implicancias de dichos cambios hidroclimáticos en posibles sequías agrícolas. Para esto, se utilizan series de precipitación y temperatura media, escaladas estadísticamente y corregidas por sesgo con el método MBCn, obtenidas del Modelo de Circulación Global (GCM) MPI-ESM-MR y del Modelo de Circulación Regional (RCM) RegCM4, y se forza el modelo hidrológico WEAP desarrollado en el marco de estudio “Plan de Gestión Hídrica en la cuenca de Limarí” liderado por la DGA. De allí se obtienen los resultados para el análisis de proyecciones de sequía, la cual se apoya en el cálculo de los índices *Standardized Precipitation Index* (SPI), *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI), *Standardized Runoff Index* (SRI), *Standardized Soil Index* (SSI) y *Standardized Base Flow Index* (SBFI).

Los resultados obtenidos muestran que, luego de la corrección de sesgo, tanto GCM como RCM reportan resultados comparables (i.e., ninguno predomina sobre el otro) en términos de climatología promedio en el período 1985-2015 por URH. En cuanto a las proyecciones climáticas a escala de cuenca, el GCM no reporta un cambio porcentual de gran magnitud en cuanto a disminución de precipitaciones, a diferencia del RCM, el cual registra una disminución del 7,5%. Para temperatura media, la proyección de cambio anual promedio en el GCM a nivel de cuenca corresponde a un aumento de 1,5°C, mientras que, para el RCM, el aumento promedio es de 1,2 °C. Las proyecciones de cambio hidrológico dan cuenta de un cambio en el régimen hidrológico de las cuencas. Las proyecciones de sequía a escala de cuenca indican un aumento de sequías meteorológicas moderadas (79,4%; GCM) y severas (7,1%; RCM), junto a un aumento de sequías agrícolas moderadas (66,7%; GCM ;10,42%; RCM), severas (45,5%; GCM ;75%; RCM) y extremas (300%; GCM ;140%; RCM). En cuanto a sequías hidrológicas, existe un aumento de sequías moderadas (56,8%; GCM; 127%; RCM).

Del estudio se concluye que, hacia el periodo 2030-2060, existirían cambios en la estacionalidad de las cuencas que componen al sistema, lo cual se suma a la proyección de aumento de los caudales bajos (e.g., excedencia mayor al 85%) y al aumento porcentual de precipitaciones en el trimestre enero-febrero-marzo. Esto, contribuye al aumento en la satisfacción de demanda en contraste con la referencia histórica, pero sugiere la necesidad de repensar la gestión de las aguas en la cuenca pensando en los impactos que estos cambios podrían tener aguas abajo. Más aun considerando las proyecciones futuras de aumento en sequías meteorológicas, hidrológicas y agrícolas de tipo moderadas, severas y extremas. Finalmente, los resultados entregan luces sobre la forma en que las sequías meteorológicas se propagan hacia el ciclo del agua terrestre en la cuenca del embalse Cogotí, siendo esto un insumo para propuestas de medidas adaptativas y resilientes ante eventos hidrometeorológicos extremos como lo son, en este caso, las sequías.

A mi querido Tatay,
Quien desde algún lugar, sigue cantándome canciones bonitas

AGRADECIMIENTOS

Me es difícil resumir lo agradecida que estoy de todo el apoyo que he sentido para llegar al punto de escribir esta página. En primer lugar, gracias a mi querida Nanay, por permitirme conocer mundos que probablemente sin su ayuda, me habría sido difícil conocer, infinitas gracias también por su paciencia y apañe conmigo durante este largo, y no tan simple proceso que ha sido para mí, el desarrollo de mi trabajo de título. Sos una crack y siempre estaré agradecida por tu esfuerzo y todo lo que me has dado. Gracias a mis queridos hermanos, Seba y Karen, por ser tan especiales y lindas personas, realmente le doy gracias a la vida por darme la oportunidad de crecer junto a ustedes, son y serán siempre un orgullo y ejemplo a seguir para mí. Gracias a mi querido Tatay, AKA Noli Seria, el cantante filipino. Te agradezco mucho por haber sido el mejor partner que en la vida haya podido tener. Te extraño y en cada paso que doy, siempre estás en mi corazón. Gracias a mis amigos del colegio Excelsior, con quienes crecí desde que casi tengo memoria: Viole, Ana, Vale Cabello, Javivi, los Matis...les quiero un montón desde tiempos inmemorables. A las niñas que conocí en la Media: Dari y Cami, por las locuras y bonitos momentos que me regalaron desde el día 1 del 2° Medio B. Agradezco también a mis amigos de bachi: Roberto, Manu, Guido, Javi, Kari, Nacho, Mariano, Valu, Jenny, Karo, Ely, Valerinski y Cata...por el apañe desde tiempos mechones, las clases que nos daban sueño, los desayunos de pan tostado con palta en el edificio de Filo, las tardes de estudio en la biblioteca, las salidas al Señor Monkey, las marchas, las ventanas en el portal Ñuñoa, los almuerzos en los que teníamos que escapar de las lacris, los completos en Ciencias, las risas en los laboratorios cuando a veces lo arruinábamos todo, pero nos jurábamos científicos por usar bata blanca...en fin, por los miles de momentos que no alcanzo a nombrar, bachidestajos y carretes en el cenicero que no se olvidarán y quedarán por siempre en el cora <3

Gracias a mis amigos que conocí acá en la Facultad y con quienes he compartido bonitos momentos, nombraría a todes, pero por temas de espacio mejor lo dejamos en “los impritos”. Gracias por tantos viernes de bailoteo en los que prendía la cancha, los carretes Civiles, las ventanas haciendo hora, las tardes de estudio y de hacer tareas que a veces, mágicamente, se convertían en carretes jajaja en fin, les quiero demasiado. Gracias también a las personas que conocí a lo largo de la carrera y que ya no están, pero que de igual forma han sido importantes para mí. Gracias a mis niñas lindas: Valentain, Kariri y Cata, por las pijamadas y maratones de estudio que pucha que eran largas, los terrenos compartidos, las ventanas eternas que en algún momento terminaron en salidas a ir al cine, las maratones en la pajarera donde a veces se nos hacía de noche, por las juntas a comer y chanclear después de algún control un viernes en la tarde, por las risas, los memes en tiempos de pandemia, los carretes, los enojos, las frustraciones por alguna nota, y tanta otra cosa que vivimos juntas a lo largo de estos años de u. En fin, gracias por ser parte de mi paso por Beauchef <3. Agradezco también al team salita Hidráulica: Dani, Vale, Javi y Nachito; y al team Balance Hídrico de la 333: Álvaro, Cata y Edu, por haber compartido momentos tan lindos conmigo a lo largo de este año, por las tardes de chancero en la salita cuando había que quedarse hasta tarde, por las juntas improvisadas de cuando ya no dábamos del estrés, las partidas de carioca cuando el modelo hidrológico y los códigos no funcionaban, por los martes y jueves de zumba. Gracias también a la Jaqui, por sus visitas a la salita para darnos ánimo, y por los detalles simples del día a día. No se imaginan lo mucho que les debo y agradezco de corazón. Gracias también a los chicos del laboratorio de Fluídos e Hidráulica, por la buena onda desde el día 1 en que me uní a su team. También darle las gracias al Edu y a la profe Xime, por darme la oportunidad este último año, de colaborar y participar en distintas actividades de la u siendo ayudante, y que han sido bonitas y provechosas experiencias para mi aprendizaje. Muchas gracias por la confianza. Quiero agradecer especialmente a mi profe guía, Miguel Lagos, por acompañarme durante este proceso, por su dedicación y paciencia en cada reunión de avance, por su sabiduría y por iluminarme cuando sentía que la memoria se estaba haciendo complicada...Muchas gracias por darme la oportunidad de ser parte de los Miguelianos <3. Quiero incluir también a la Stephi del pasado, gracias por perseverar y no perder la fé cuando daban ganas de tirar todo por la borda. Y para terminar, porque lo mejor para el final, quiero agradecer a mi partner, el mejor compañero que podría existir: mi perrito Charlie. Porque la Stephi del pasado sabe que sin él, las cosas no habrían sido igual de bonitas.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	MOTIVACIÓN.....	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	Objetivo General.....	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.3	ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	3
2	REVISIÓN DE ANTECEDENTES	4
2.1	CAMBIO CLIMÁTICO EN EL MUNDO Y EN CHILE	4
2.2	CAMBIO HIDROCLIMÁTICO EN LA PROVINCIA DE LIMARÍ.....	5
2.3	HERRAMIENTAS DE ESTUDIO DE CAMBIO CLIMÁTICO E HIDROLÓGICO.....	7
2.3.1	Proyecciones de Cambio Climático.....	7
2.3.2	Modelación hidrológica.....	9
2.4	ÍNDICES DE SEQUÍA.....	10
2.5	PROPAGACIÓN DE SEQUÍA METEOROLÓGICA AL CICLO DEL AGUA SUPERFICIAL .	11
2.6	PERCEPCIONES ASOCIADAS A SEQUÍAS.....	11
2.7	SÍNTESIS DE LA REVISIÓN DE ANTECEDENTES.....	12
3	ZONA DE ESTUDIO	13
3.1	ANTECEDENTES GENERALES	13
3.2	GEOMORFOLOGÍA	14
3.3	DISPONIBILIDAD DE REGISTROS FLUVIOMÉTRICOS Y METEOROLÓGICOS.....	15
3.4	CARACTERIZACIÓN HIDROCLIMATOLÓGICA	16
3.5	ACTIVIDADES PRODUCTIVAS Y DERECHOS DE AGUA	18
4	METODOLOGÍA	20
4.1	METODOLOGÍA GENERAL	20
4.2	DELIMITACIÓN DE UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA (URHs).....	20
4.3	OBTENCIÓN DE FORZANTES METEOROLÓGICAS	22
4.3.1	Datos y proyecciones climáticas.....	22
4.3.2	Verificación del producto grillado CR2MET	22
4.3.3	Escalamiento estadístico y corrección de sesgo por URH	25
4.4	MODELACIÓN HIDROLÓGICA	26
4.4.1	Modelo WEAP	26
4.4.2	Configuración del modelo hidrológico.....	27
4.4.3	Incorporación de forzantes meteorológicas.....	29
4.4.4	Evaluación del desempeño del modelo WEAP-Cogotí.....	29
4.5	ÍNDICES DE SEQUÍA.....	31
5	RESULTADOS	33
5.1	ANÁLISIS DEL VALOR AGREGADO DEL USO DE UN RCM RESPECTO A GCM	33
5.2	PROYECCIONES FUTURAS DE CAMBIO CLIMÁTICO E HIDROLÓGICO PERÍODO 2030-2060	34
5.2.1	Proyecciones climáticas.....	34
5.2.2	Proyecciones de cambio hidrológico.....	37
5.2.3	Satisfacción de demanda hídrica	41
5.3	ANÁLISIS DE SEQUÍAS.....	42
6	DISCUSIÓN	51
7	CONCLUSIONES	54

8 BIBLIOGRAFÍA	56
ANEXOS	60
ANEXO A: SET DE PARÁMETROS Y DESEMPEÑO DEL MODELO HIDROLÓGICO	60
ANEXO B: VALOR AGREGADO DEL USO DE RCM/GCM A ESCALA MENSUAL	63
ANEXO C: PROYECCIONES DE CAMBIO HIDROLÓGICO Y SATISFACCIÓN DE DEMANDA HÍDRICA A ESCALA MENSUAL	67
ANEXO D: PROYECCIONES DE SEQUÍA Y PARÁMETROS PARA SU CARACTERIZACIÓN.....	72
ANEXO E: CORRELACIÓN ENTRE ÍNDICES DE SEQUÍA METEOROLÓGICA, HIDROLÓGICA Y AGRÍCOLA CON ÍNDICES CLIMÁTICOS.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Resumen en cuanto a escenarios RCP en términos de su forzante radiativa, anomalía de temperatura global y trayectoria de CO ₂ asociada. Fuente:(Rojas, 2012).....	8
Tabla 2-2: Definiciones de los tipos de sequía. Fuente:(Valiente, 2001).....	10
Tabla 3-1: Clasificación de tipo de suelo para la Cuenca del río Cogotí construída a partir de información de Land Cover (Zhao et al., 2016).	14
Tabla 3-2: Características geomorfológicas de la cuenca del Río Cogotí.....	14
Tabla 3-3: Nombres e identificadores de estaciones meteorológicas en vigencia presentes en la cuenca del río Cogotí.....	15
Tabla 3-4: Nombres e identificadores de estaciones fluviométricas en vigencia presentes en la cuenca del Río Cogotí.	16
Tabla 3-5: Balance Hídrico para el período 1985-2015.	17
Tabla 4-1: Listado de URHs de la cuenca, régimen hidrológico y área.....	21
Tabla 4-2: Cuadro resumen de métricas estadísticas calculadas para precipitación CR2MET v1.4.2 y precipitación en estación Cogotí 18, disponible en el Explorador Climático (https://explorador.cr2.cl/). El análisis se obtiene a nivel mensual, estacional, anual y para la serie completa.	24
Tabla 4-3: Cuadro resumen de métricas estadísticas calculadas para temperatura mínima CR2MET v1.3 y temperatura mínima en estación Cogotí embalse, disponible en el Explorador Climático (https://explorador.cr2.cl/). El análisis se obtiene a nivel mensual, estacional, anual y para la serie completa.....	24
Tabla 4-4: Cuadro resumen de métricas estadísticas calculadas para temperatura máxima CR2MET v1.3 y temperatura máxima en estación Cogotí embalse, disponible en el Explorador Climático (https://explorador.cr2.cl/). El análisis se obtiene a nivel mensual, estacional, anual y para la serie completa.....	25
Tabla 4-5: Lista de parámetros climáticos y de uso de suelo. Fuente:(Danús Del Pedregal, 2018).....	27
Tabla 4-6: Índices de eficiencia utilizados para evaluar el modelo hidrológico.	30
Tabla 4-7: Índices hidrológicos derivados de la curva de duración.	30
Tabla 4-8: Resumen de índices hidrológicos derivados de la curva de duración de caudal medio anual estimados para las cuencas de interés en el periodo 1990-2005.....	31
Tabla 4-9: Clasificación de sequía o superávit según el valor del índice estandarizado.....	32
Tabla 5-1: Evaluación de desempeño del GCM y RCM en la modelación hidrológica del periodo histórico 1985-2015.....	38
Tabla 5-2: Frecuencias (en %) de sequía meteorológica (SPI y SPEI), hidrológica (SRI) y agrícola (SSI y SBFI) obtenidas por CR2MET para el período histórico 1985-2015 por URH.....	44
Tabla 5-3: Frecuencias (en %) de sequía meteorológica (SPI y SPEI), hidrológica (SRI) y agrícola (SSI y SBFI) obtenidas por cada modelo para el período histórico 1985-2015 por URH.	45
Tabla 5-4: Frecuencias (en %) de sequía meteorológica (SPI y SPEI), hidrológica (SRI) y agrícola (SSI y SBFI) obtenidas por cada modelo para el período futuro 2030-2060 por URH.....	45

Tabla 5-5: Número de eventos con duración mayor o igual a 12 meses para sequía meteorológica (SPI y SPEI), hidrológica (SRI) y agrícola (SSI y SBFI) obtenidas por CR2MET para el período histórico 1985-2015 por URH.	46
Tabla 5-6: Número de eventos con duración mayor o igual a 12 meses para sequía meteorológica (SPI y SPEI), hidrológica (SRI) y agrícola (SSI y SBFI) obtenidas por cada modelo para el período histórico 1985-2015 por URH.....	46
Tabla 5-7: Número de eventos con duración mayor o igual a 12 meses para sequía meteorológica (SPI y SPEI), hidrológica (SRI) y agrícola (SSI y SBFI) obtenidas por cada modelo para el período futuro 2030-2060 por URH.....	47
Tabla 5-8: Ocurrencia por período de eventos de sequía agrícola según su magnitud a escala de cuenca para el índice SSI.	48
Tabla 5-9: Ocurrencia por período de eventos de sequía agrícola según su magnitud a escala de cuenca para el índice SBFI.	48
Tabla 5-10: Ocurrencia por período de eventos de sequía agrícola según su magnitud a escala de cuenca para el índice SPI.....	50
Tabla 5-11: Ocurrencia por período de eventos de sequía agrícola según su magnitud a escala de cuenca para el índice SPEI.	50
Tabla 5-12: Ocurrencia por período de eventos de sequía agrícola según su magnitud a escala de cuenca para el índice SRI.	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: a) Anomalías del promedio anual y global de temperaturas en superficie, terrestres y oceánicas, combinadas respecto del promedio del período de 1986 a 2005. Cada color es un conjunto de datos diferente. b) Promedio anual y global del cambio del nivel del mar con respecto al promedio del conjunto de datos de más larga duración entre 1986 y 2005. c) Concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero dióxido de carbono (CO ₂ , verde), metano (CH ₄ , naranja), y óxido nitroso (N ₂ O, rojo) determinadas mediante los datos de los testigos de hielo (puntos) y de mediciones atmosféricas directas (líneas). Fuente:(IPCC, 2014).....	5
Figura 2-2: Precipitaciones acumuladas por año para 41 estaciones pluviométricas ubicadas desde el Maule al sur de Chile. Fuente: (DGA, 2021a).....	6
Figura 2-3: Trayectorias de concentraciones de CO ₂ para los escenarios SRES B1, B2, SRES A1B y A2, junto a los RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5. Fuente:(Rojas, 2012).	8
Figura 2-4: Ilustración de la propagación de la sequía a partir de déficits de precipitación (sequía meteorológica), que pueden ir acompañados de un aumento de la demanda de evaporación atmosférica (AED), a déficits de humedad del suelo (sequía agrícola), caudal bajo o nivel freático (sequía hidrológica). Fuente: Traducido de (Zhang et al., 2022).....	11
Figura 3-1: Zona de estudio. Cuenca del río Cogotí hasta la entrada al Embalse Cogotí.....	13
Figura 3-2: Curva Hipsométrica para la cuenca del Río Cogotí.	14
Figura 3-3: Estaciones Fluviométricas y Meteorológicas presentes en la cuenca de estudio.	15
Figura 3-4: Curvas de variación estacional en el periodo 1979-2015 para las estaciones fluviométricas Cogotí entrada embalse, Cogotí en Fraguita y Combarbalá en Ramadillas.	16
Figura 3-5: Curva de duración de escorrentía media diaria para Cogotí en Fraguita, Cogotí entrada embalse y Combarbalá en Ramadillas.	17
Figura 3-6: Climogramas obtenidos para Cogotí entrada embalse, Cogotí 18 y Combarbalá en Ramadillas a partir de observaciones de precipitación y temperatura recuperadas de CAMELS- CL para el período 1979-2015	18
Figura 3-7: Distribución del recurso hídrico según distintas actividades productivas para derechos de aprovechamiento de agua superficial consuntivo y no consuntivo.	18
Figura 3-8: Demanda asociada a los distintos tipos de Derechos de Aprovechamiento de Aguas en la zona de estudio.....	19
Figura 4-1: Esquema general de la metodología adoptada.	20
Figura 4-2: División de la zona de estudio por Unidades de Respuesta Hidrológica.	21
Figura 4-3: Verificación del producto de precipitación CR2MET 1.4.2 respecto a los registros en las estaciones Cogotí 18, Cogotí embalse y Combarbalá en el periodo 1979-2015. Panel superior: patrón de variación estacional de la precipitación mensual. Panel inferior: gráfico de dispersión de la precipitación mensual observada en la estación respecto a la estimada en CR2MET v1.4.2.	23
Figura 4-4: Verificación del producto de temperaturas extremas de CR2MET v1.3 respecto a los registros en la estación Cogotí embalse en el periodo 1979-2015. Panel izquierdo: patrón de variación estacional de la precipitación mensual. Panel derecho: gráfico de dispersión de la precipitación mensual observada en la estación respecto a la estimada en CR2MET v1.3.....	23

Figura 4-5: Diagrama conceptual del método de humedad de suelo.	27
Figura 4-6: Captura de la interfaz gráfica del modelo WEAP de la Cuenca Limarí. Enmarcado en rojo la zona de estudio.	28
Figura 4-7: Distribución espacial de nodos de demanda superficial (en rojo) para la zona de estudio. En verde las ubicaciones de los Catchment que suministran caudal a los respectivos cauces en el modelo hidrológico.	29
Figura 4-8: Resumen del desempeño de la modelación hidrológica asociada a la cuenca Cogotí en Fraguita.	31
Figura 5-1: Valor agregado del uso del RCM versus GCM para la estimación de precipitación y temperatura media anual promedio en el período 1979-2005. Valores entre 0 y 1 indican que RCM aporta valor. Valores entre 0 y -1 indican que RCM no aporta valor.	33
Figura 5-2: Proyección de cambio futuro de precipitación anual promedio para la cuenca en el período 2030-2060 respecto al período 1985-2015.	34
Figura 5-3: Proyección de cambio futuro de temperatura media anual promedio para la cuenca en el período 2030-2060 respecto al período 1985-2015.	35
Figura 5-4: Proyección de cambio anual promedio para precipitación (%) y temperatura media (°C) para el período 2030-2060 respecto al período 1985-2015. En caso de estudio, los círculos y triángulos negros hacen referencia al promedio a nivel de cuenca en cada caso. En Unidad espacial, los colores indican la clasificación de URHs pertenecientes a zonas altas (celeste), medias (verde) y bajas (rosado) de la cuenca.	35
Figura 5-5: Comparativa de curvas ECDF por mes para temperatura media a escala de cuenca entre el período de referencia 1985-2015 y el período futuro cercano 2030-2060.	36
Figura 5-6: Comparativa de curvas ECDF por mes para precipitación a escala de cuenca entre el período de referencia 1985-2015 y el período futuro cercano 2030-2060.	37
Figura 5-7: Curvas de variación estacional en el período de referencia 1985-2015 y en el período proyectado 2030-2060, para las cuencas Cogotí entrada embalse, Cogotí en Fraguita, Combarbalá en Ramadillas y Pama en Valle Hermoso.	38
Figura 5-8: Curvas de duración en el período de referencia 1985-2015 y en el período proyectado 2030-2060, para las cuencas Cogotí entrada embalse, Cogotí en Fraguita, Combarbalá en Ramadillas y Pama en Valle Hermoso.	39
Figura 5-9: Proyecciones de cambio de caudal medio y evapotranspiración real hacia el período 2030-2060 a nivel trimestral.	40
Figura 5-10: Proyecciones de cambio de precipitación (%) y temperatura media (°C) hacia el período 2030-2060 a nivel trimestral.	40
Figura 5-11: Satisfacción de demanda para cada nodo del modelo WEAP en el período histórico 1985-2015 y período futuro 2030-2060.	41
Figura 5-12: Comparativa en resultados de índices de sequía meteorológica (SPI y SPEI), hidrológica (SRI) y agrícola (SSI y SBFI) para la serie de tiempo 1979-2060 a escala de cuenca. Las líneas punteadas indican delimitación en intensidad del índice, siendo roja una sequía severa, naranja una sequía moderada, celeste y azul períodos de humedad moderada y severa respectivamente.	42
Figura 5-13: Correlación cruzada entre índices de sequía. Se puede ver el ajuste lineal, coeficientes de correlación de Pearson y significancia estadística (asteriscos indican p-value < 5% en todos los casos).	43

Figura 5-14: Frecuencia de sequía meteorológica por URH para el índice SPI – 12 meses. Colores cercanos a amarillo indican frecuencias bajas, mientras que colores cercanos a rojo hacen alusión a frecuencias elevadas.	43
Figura 5-15: Frecuencia de sequía meteorológica por URH para el índice SPEI – 12 meses. Colores cercanos a amarillo indican frecuencias bajas, mientras que colores cercanos a rojo hacen alusión a frecuencias elevadas.	44
Figura 5-16: Número de eventos de sequía meteorológica con duración mayor o igual a 12 meses. Resultados se ven por URH para el índice SPI – 12 meses. Colores cercanos a amarillo indican frecuencias bajas, mientras que colores cercanos a rojo hacen alusión a frecuencias elevadas.	45
Figura 5-17: Número de eventos de sequía meteorológica con duración mayor o igual a 12 meses. Resultados se ven por URH para el índice SPEI – 12 meses. Colores cercanos a amarillo indican frecuencias bajas, mientras que colores cercanos a rojo hacen alusión a frecuencias elevadas.	46
Figura 5-18: Número de eventos de sequía meteorológica con duración mayor o igual a 12 meses. Resultados se ven por URH para el índice SSI – 12 meses. Colores cercanos a amarillo indican frecuencias bajas, mientras que colores cercanos a rojo hacen alusión a frecuencias elevadas.	47
Figura 5-19: Número de eventos de sequía meteorológica con duración mayor o igual a 12 meses. Resultados se ven por URH para el índice SBFI – 12 meses. Colores cercanos a amarillo indican frecuencias bajas, mientras que colores cercanos a rojo hacen alusión a frecuencias elevadas.	48
Figura 5-20: Mapa de calor de la serie completa por URH para el índice SSI-12 meses. Valores cercanos a -3 (en rojo) indican un estado de sequía excepcional, mientras que valores cercanos a 3 (en azul) señalan períodos húmedos. La columna PC representa los resultados a promedio de cuenca.	49
Figura 5-21: Mapa de calor de la serie completa por URH para el índice SBFI-12 meses. Valores cercanos a -3 (en rojo) indican un estado de sequía excepcional, mientras que valores cercanos a 3 (en azul) señalan períodos húmedos. La columna PC representa los resultados a promedio de cuenca.	49

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En los últimos años los niveles de temperatura a nivel mundial han incrementado sistemáticamente, resultando en un calentamiento global promedio cercano a 1°C (MMA, 2013). En este sentido, la comunidad científica ha reportado cambios sin precedentes en cientos de miles de años en el clima de la tierra (IPCC, 2021). Algunos de los cambios en el sistema climático se han traducido, por ejemplo, en un aumento continuo del nivel del mar, impacto que, según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), no se podrá revertir. Otro aspecto mencionado por el IPCC, son las probabilidades de sobrepasar el nivel de calentamiento global de 1,5°C en las próximas décadas, lo cual podría acentuar posibles efectos del cambio climático. Ejemplo de ello sería la aceleración de los deshielos, pérdida de hábitat para distintas especies, mayor duración de sequías (i.e., persistencia) e incluso un aumento en el porcentaje de superficies quemadas debido a incendios forestales en época de verano.

La situación actual indica que desde el período 1850-1900, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a la actividad industrial, conforman la principal causa del calentamiento global (IPCC, 2018). Estos cambios en las condiciones de variabilidad natural del planeta sugieren una alteración en su dinámica afectando, por ejemplo, la intensidad, frecuencia, extensión espacial y duración de eventos hidrometeorológicos extremos. En este sentido, en un contexto de cambio climático se podría proyectar un potencial incremento en la frecuencia de olas de calor, aumento en la frecuencia de huracanes e incluso sequías más prolongadas a las sequías de 1-2 años características de Chile Central (MMA, 2013).

Actualmente, distintos grupos dedicados al desarrollo de modelos climáticos han puesto sus esfuerzos en impulsar iniciativas de comparación de las proyecciones de cambio climático generadas mediante Modelos de Circulación General (*Global Circulation Model*; GCM). Los GCM corresponden, en líneas generales, a modelos espacialmente grillados que resuelven, en superficie y para diferentes perfiles atmosféricos, las ecuaciones de balance de masa, energía y momentum para el sistema climático. Sus interacciones y dominio espacial son a escala global, por lo que se caracterizan por trabajar utilizando resoluciones espaciales gruesas (100-300 km) en comparación a las escalas requeridas en estudios hidrológicos locales (e.g., a escala de cuenca). Adicionalmente, se debe tener en cuenta que estos modelos reciben forzantes como gases atmosféricos, cambios de uso de suelo y radiación solar (Rojas, 2012) y, a partir de diferentes parametrizaciones y conceptualizaciones de la circulación atmosférica, proyectan los impactos de los cambios radiativos en el sistema climático. Así, los GCM constituyen una potente herramienta para el estudio de la dinámica futura del clima y, en términos prácticos, cuantificar los cambios en el clima a causa de decisiones sociopolíticas y económicas que definen escenarios futuros de emisiones de GEI.

Considerando la compleja topografía de Chile y la presencia de diferentes tipos de clima que, de manera abrupta en muchas latitudes, cambia de mar a cordillera (e.g., ~31,6°S; latitud Illapel; 95 km de mar a frontera cordillerana), queda de manifiesto la necesidad de contar con una resolución más fina (e.g., desde centenas de metros a decenas de kilómetros) que la de los GCM para efectos del estudio de la hidrología a escala de cuenca. Dado lo anterior, se han desarrollado múltiples estrategias para abordar el problema de compatibilidad de escalas espaciales, procedimiento que se denomina escalamiento o *downscaling*. Mediante el escalamiento de la información recuperada de los GCM se logra aumentar su resolución espacial, para lo cual se recurre a técnicas de tipo estadísticas (e.g., regresiones lineales, interpolaciones espaciales, etc.) y/o dinámicas a través de, por ejemplo, Modelos Climáticos Regionales (RCM). Los RCM operan con una resolución más alta (50 km) en contraste a los GCM y permiten obtener una representación más acabada de la zona de estudio, pues capturan de mejor forma las variaciones espaciales de precipitación y temperatura en topografías más complejas, facilitando así la descripción del sistema hidrológico de zonas a nivel de cuenca (Bozkurt et al., 2019).

En la Región de Coquimbo (provincia de Limarí), el período 2019-2020 ha destacado como uno de los años hidrológicos más secos en la última década, con un déficit en cobertura nival y escasez en precipitaciones con una tendencia negativa de -25 mm/década en los últimos años (DGA, 2020a). Lo anterior ha traído consigo un descenso paulatino en los caudales medios anuales.

Tomando en cuenta que este déficit de precipitaciones afecta la oferta hídrica natural y, con ello, impacta en la disponibilidad para consumo y a distintos sectores productivos (e.g., actividades agrícolas y/o ganaderas), resulta clave cuantificar los cambios en la hidroclimatología de la zona en un contexto de clima cambiante. En particular, se plantea la necesidad de desarrollar un estudio orientado al análisis de diferentes proyecciones futuras de sequía meteorológica en la zona. Lo anterior, entendiendo como sequía meteorológica al déficit de precipitaciones sobre una región con respecto a valores promedio durante un período de tiempo (Valiente, 2001).

De esta forma, el presente estudio busca evaluar proyecciones climáticas futuras y entregar lineamientos sobre las proyecciones de cambio hidrológico a mediano plazo para la provincia de Limarí. Asimismo, utilizando modelos climáticos globales (GCM) y regionales (RCM), sumado a técnicas de modelación hidrológica, se busca analizar los potenciales impactos que el cambio futuro proyectado en la hidrología a escala de cuenca tiene para la actividad agrícola de la zona.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

El objetivo principal del presente estudio radica en analizar los potenciales impactos del cambio climático en la temperatura, precipitación y recursos hídricos superficiales de la Cuenca del embalse Cogotí.

1.2.2 Objetivos Específicos

En términos específicos, del objetivo general dispuesto para la presente investigación se desprende lo siguiente:

- a) Analizar el Valor Agregado en las proyecciones de cambio hidrológico derivados de utilizar un modelo climático regional (RegCM4) para la configuración de la modelación hidrológica en contraste a utilizar su respectivo modelo global (MPI-ESM-MR).
- b) Estudiar impactos del cambio climático en la cuenca del embalse Cogotí mediante modelación hidrológica en el modelo WEAP (Water Evaluation and Planning), considerando un análisis de la satisfacción de demanda hídrica en el sistema de estudio, bajo el uso del modelo global MPI y del modelo regional RegCM4.
- c) Establecer proyecciones de sequía meteorológica, hidrológica y agrícola mediante la evaluación de resultados de modelación hidrológica y el cálculo de distintos índices de sequía.

1.3 Estructura del documento

La organización del presente documento sigue según se describe a continuación:

- En el Capítulo 2, se presenta una revisión de antecedentes bibliográficos con la finalidad de introducir los conceptos generales que sustentan la base teórica del tema de estudio.
- En el Capítulo 3, se realiza la caracterización geomorfológica, fisiográfica e hidroclimática de la zona de estudio, así como un análisis general de la disponibilidad de observaciones locales de caudal (i.e., controles fluviométricos).
- En el Capítulo 4, se detalla la metodología empleada para el desarrollo del estudio, donde se describe el procedimiento empleado para obtener las forzantes meteorológicas de precipitación y temperatura a nivel de Unidad de Respuesta Hidrológica (URH), las bases de datos empleadas, los modelos climáticos utilizados y el procedimiento aplicado el escalamiento estadístico y corrección de sesgo a nivel de URH. Asimismo, se describe el modelo hidrológico utilizado (WEAP) y la forma en que fue configurado y verificado. Finalmente, se describe la metodología adoptada para la evaluación de eventos de sequía.
- En el Capítulo 5, se presentan los resultados obtenidos, los cuales buscan lograr los objetivos específicos planteados en el presente trabajo de investigación. Algunos resultados corresponden al escalamiento estadístico para la obtención de forzantes de precipitación y temperatura, tanto para el período histórico como para el período futuro. Por otra parte, se encuentran los resultados de la modelación hidrológica para ambos períodos, y se incluye una evaluación de los resultados obtenidos mediante el análisis de sequías en la zona de estudio.
- En el Capítulo 6, se discuten los resultados y proyecciones de cambio climático, cambio hidrológico y sequía derivados del GCM y RCM. Junto a esto, se analizan los principales impactos del cambio climático en la cobertura de demanda hídrica en la zona de estudio.
- Finalmente, en el Capítulo 7 se presentan los comentarios y conclusiones obtenidas a partir del trabajo de investigación.

2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

En este capítulo se introducen los conceptos generales que definen la base teórica del estudio y la motivación del mismo. Para ello, se entrega un contexto general en cuanto a cambio climático a nivel global y nacional, donde se describen algunas herramientas para su estudio. Asimismo, se muestra la aplicación de modelos hidrológicos como herramienta para el estudio del cambio hidrológico y algunos índices de sequía recomendados en la literatura que permiten el análisis de la magnitud y recurrencia de este tipo de eventos.

2.1 Cambio climático en el mundo y en Chile

A lo largo de las últimas décadas, se han evidenciado cambios en el sistema climático que actualmente conforman una amenaza para la oferta hídrica a nivel global (BCN, 2017). En este contexto, surge la necesidad de establecer lineamientos que permitan cuantificar potenciales cambios futuros y, de ese modo, prever impactos que amenacen la seguridad de los ecosistemas naturales, la sociedad, la economía, la política y la infraestructura. Así, desde 1988 el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) busca "proveer evaluaciones científicas exhaustivas sobre información existente en Cambio Climático, cuantificar potenciales impactos y mencionar estrategias de mitigación y adaptación" y, de este modo, a partir de sus lineamientos unificar ciertos esfuerzos científicos a nivel global. Para ello, ha publicado una serie de informes para proponer distintas medidas de mitigación y adaptación al cambio climático, siendo el Quinto informe el más reciente, a la espera de la sexta entrega que ya se encuentra en curso y ha contado publicaciones parciales por subgrupo de estudio.

Los cambios en el sistema climático ocurridos desde mediados del siglo XX han traído consigo, por ejemplo, aumentos en la temperatura atmosférica ($\sim 1^\circ\text{C}$; Figura 2-2a), disminución en la cantidad de masa contenida en la criósfera, y un aumento en el nivel del mar ($\sim 0,2$ m; Figura 2-2b). El IPCC ha reportado que la capa superior del océano (0 - 700m) se ha calentado durante el período 1971-2010, aumentando el contenido de calor del océano superficial (IPCC, 2014). Esto ha desencadenado un derretimiento de los hielos, incrementando el nivel oceánico en 0,19 m entre los años 1901 y 2010. Así, según el mismo IPCC, la principal causa de la situación descrita correspondería al aumento en las concentraciones de CO_2 en la atmósfera resultado de la actividad humana (Figura 2-2c), especialmente por el uso de combustibles fósiles y deforestación. En consecuencia, considerando el crecimiento económico y poblacional en nuestros días, es probable que los efectos del cambio climático se acentúen en caso de no adoptarse medidas necesarias para su mitigación. Asimismo, dicha condición podría intensificar los impactos asociados a la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos, sobre los cuales se proyectan aumentos en su frecuencia, duración e intensidad (IPCC, 2014).

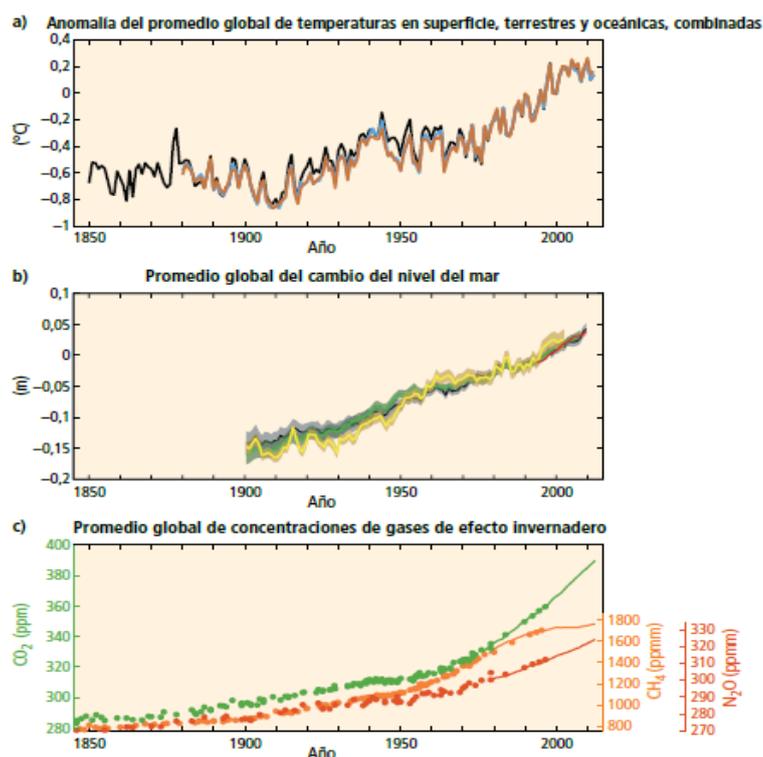


Figura 2-1: a) Anomalías del promedio anual y global de temperaturas en superficie, terrestres y oceánicas, combinadas respecto del promedio del período de 1886 a 2005. Cada color es un conjunto de datos diferente. b) Promedio anual y global del cambio del nivel del mar con respecto al promedio del conjunto de datos de más larga duración entre 1886 y 2005. c) Concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero dióxido de carbono (CO₂, verde), metano (CH₄, naranja), y óxido nitroso (N₂O, rojo) determinadas mediante los datos de los testigos de hielo (puntos) y de mediciones atmosféricas directas (líneas). Fuente: (IPCC, 2014)

2.2 Cambio hidroclimático en la provincia de Limarí

Chile central se caracteriza principalmente por un clima de tipo mediterráneo con una estación seca prolongada (Montecinos & Aceituno, 2003; Aceituno et al., 2021). Asimismo, dado los modos de variabilidad global que modulan el clima en la zona (e.g., ENOS, SAM), sequías de 1-2 años de extensión resultan recurrentes (Villanueva Nilo et al., 2020). No obstante, la intensa y persistente sequía que ha afectado a Chile durante la última década, catalogada incluso como una mega-sequía, además de ser un evento sin precedentes, ha tenido diferentes impactos en ciertas áreas de productividad socioeconómica. La mega-sequía ha estado caracterizada por un importante déficit de las precipitaciones medias anuales respecto al promedio climatológico, afectando desde la región de Coquimbo a la Araucanía. Bajo este escenario, apoyados en técnicas de modelación numérica del clima y preocupados por cuantificar los cambios en los patrones climáticos locales en un contexto de clima cambiante, la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) estableció que el clima en nuestro país para el periodo 2030-2059 cambiará independiente del comportamiento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Lo anterior podría expresarse en términos de una disminución en las temperaturas mínimas, un aumento de temperaturas máximas y una disminución en precipitaciones anuales. En este sentido, la modelación indica que el territorio comprendido entre La Serena y Coyhaique sufriría una potencial disminución en las precipitaciones anuales que, en el caso de Santiago, podría ser de hasta 66% en 2050 y, en el caso de La Serena, la disminución sería del orden de 60-90%.

Las tendencias climáticas actuales ya dan cuenta de una disminución sistemática en los montos de precipitación anual. Según el Informe Pluviométrico Nacional del año 2021 (DGA, 2021a), 37 de las 41 estaciones empleadas para su elaboración presentan un déficit en precipitaciones. Allí, los casos más extremos se reportan para la zona norte del país donde estaciones como, por ejemplo, Vicuña, Rivadavia, Embalse La Paloma, Ovalle, Coirón y Cogotí 18, presentan déficits que se encuentran entre -85% y -90%. Asimismo, como se muestra en la

Figura 2-1, las demás estaciones de la zona norte mantienen un déficit por sobre el -62%. Dicha evidencia sugiere la necesidad de estudiar las proyecciones de sequía meteorológica en cuencas del norte y centro de nuestro país. Lo anterior considerando la alta vulnerabilidad a los impactos del cambio climático en la zona.

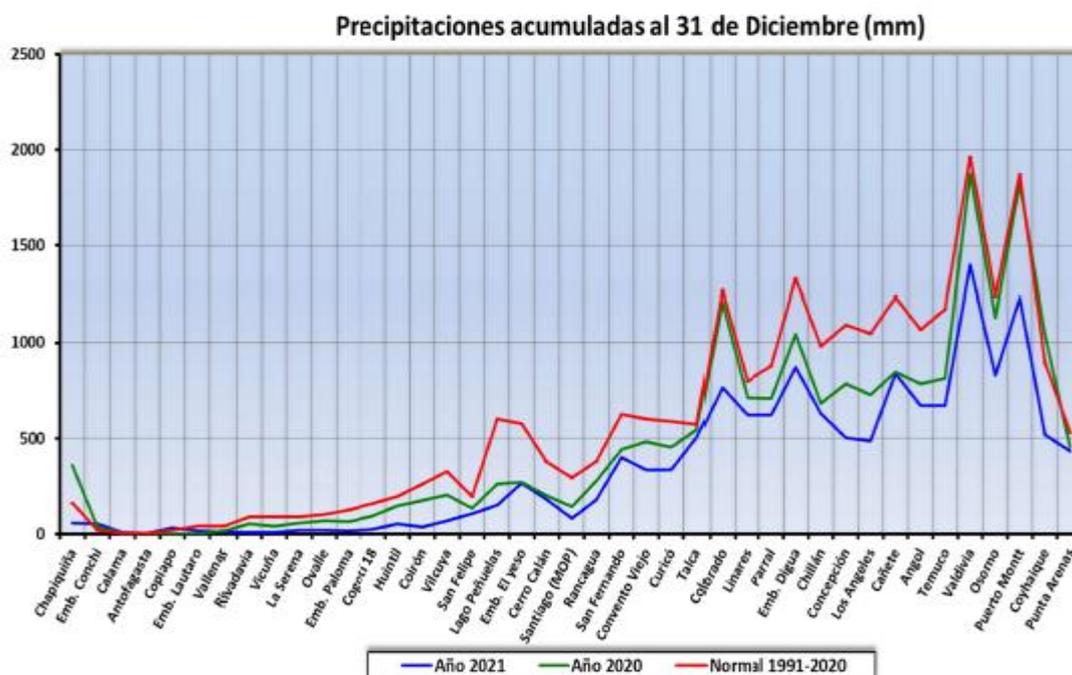


Figura 2-2: Precipitaciones acumuladas por año para 41 estaciones pluviométricas ubicadas desde el Maule al sur de Chile. Fuente: (DGA, 2021a)

En los últimos años, la Dirección General de Aguas (DGA) ha manifestado que Coquimbo es una de las regiones con mayor riesgo hídrico. Lo anterior, tomando en cuenta que sus cuencas han presentado un déficit cercano a los 40 m³/s y que, a su vez, se podría acentuar hacia el año 2050 con un déficit del orden de 95 m³/s (DGA, 2020a).

Según el estudio de diagnóstico de la cuenca del Río Limarí (DGA, 2020a) esta cuenca se compone de un sistema interconectado de ríos y acuíferos, cuya ubicación es delimitada en el norte por la cuenca del río Elqui, la cuenca del río Choapa hacia el sur, la Cordillera de Los Andes por el este y el Océano Pacífico en el oeste. Junto a esto, la cuenca abarca un área cercana a los 11800 km² y se caracteriza por un clima seco y árido que favorece períodos de sequía durante la mayor parte del año. Asimismo, presenta una temperatura promedio de 17°C, con mínimas de 10°C y máximas de 24°C.

En particular, el clima que domina la cuenca del Río Limarí se expresa localmente a partir de, principalmente, tres climas: i) Semiárido con alta nubosidad, ii) Semiárido templado con lluvias invernales y iii) Semiárido frío con lluvias invernales. Así, dado el clima en la cuenca y la presencia de un efecto de inversión térmica en la zona, la generación de precipitaciones es baja y se concentran, en general, en el periodo de invierno (i.e., junio a septiembre en Chile), donde se reporta en promedio el 70% del monto anual. Por otra parte, fuentes oficiales a nivel nacional (DGA, 2020a) indican que la provincia de Limarí recibe anualmente 90 mm de precipitación promedio por el norte y 280 mm por el sur. Sin embargo, el escenario actual revela que la zona ha experimentado un déficit de -25 mm/década, afectando particularmente sectores de altitud media y baja, donde las lluvias en épocas húmedas alcanzan entre 100 a 500 mm/año.

En cuanto a la situación del agua subterránea de la zona, DGA concluye para el año 2020 que en la provincia de Limarí existe un desbalance de $-0.34 \text{ m}^3/\text{s}$ que se ha desarrollado en los últimos 10 años debido a una disminución en la recarga de acuíferos y producto de un aumento del 52% en las extracciones, considerando el período histórico 1964-2018 (DGA, 2020). Se menciona también que la baja en cuanto a recarga del acuífero se justifica por la tendencia negativa en precipitaciones y escorrentía en la cuenca, donde si se suma el aumento en número de extracciones en el tiempo, se concluye que las condiciones actuales para la cuenca del Río Limarí corresponden a un riesgo que perjudica la sustentabilidad de sus aguas tanto superficiales como subterráneas.

2.3 Herramientas de estudio de Cambio Climático e Hidrológico

La necesidad de entender las anomalías en concentraciones atmosféricas de CO_2 , los drásticos cambios en temperatura del planeta y alteración en la ocurrencia de precipitaciones, ha impulsado el desarrollo de herramientas que apoyan el estudio del cambio climático y sus impactos. Así, desde aproximadamente la segunda mitad del siglo XX, han surgido grupos de investigación orientados al estudio de la dinámica atmosférica global en un contexto de clima cambiante y, a su vez, establecer lineamientos para un marco de trabajo unificado que permita comparaciones estadísticas (Rojas, 2012).

En este contexto, grupos especializados en el desarrollo de modelos climáticos se han encargado de ejecutar y evaluar distintas configuraciones y comparaciones entre simulaciones de proyecciones de cambio climático. Estos modelos incluyen, por ejemplo, la interacción entre la Atmósfera-Océano (AOGCM) y otros, como los denominados *Earth System Models (ESM)*, que además de la interacción Atmósfera-Océano, consideran vegetación y ciclo de carbono interactivo. Estos modelos conforman la base de los denominados Modelos de Circulación General (GCM), los cuales permiten generar simulaciones pasadas y futuras de la evolución del sistema climático. De esta forma, los GCMs proporcionan simulaciones de largo plazo (todo el siglo XXI), las cuales, en la quinta fase del CMIP son forzadas por los denominados *Representative Concentration Pathways (RCP)*, que serán descritos en el acápite “Proyecciones de Cambio Climático” del presente capítulo.

2.3.1 Proyecciones de Cambio Climático

Para generar simulaciones de cambio climático, Rojas (2012) establece que los GCM deben ser forzados por concentraciones de gases atmosféricos antropogénicos y naturales (i.e., gases de efecto invernadero, aerosoles generados por erupciones volcánicas, contaminación o quema de biomasa), incluyendo forzamiento por cambios de uso de suelo y por radiación solar. No obstante, definir las forzantes por sí solas no es suficiente para construir una simulación de cambio climático. Para ello, también es necesaria la implementación de escenarios de desarrollo socioeconómicos y políticos que faciliten la estimación de potenciales trayectorias de emisiones contaminantes de la atmósfera en el futuro.

De esta forma, tanto las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (GEI) como, por ejemplo, los cambios en uso de suelo, la demanda energética de la población mundial y el desarrollo de nuevas tecnologías industriales, generan un determinado cambio en el forzamiento radiativo natural. Estos escenarios se utilizan para configurar los modelos de simulación, con lo cual se obtienen estimaciones de diferentes variables climáticas como, por ejemplo, temperatura o precipitación.

En los acápites que se presentan a continuación, se profundiza respecto a los escenarios que sirven como base para las simulaciones climáticas agrupadas en el CMIP5 y, a su vez, sobre las técnicas de escalamiento y corrección de sesgo empleadas para el procesamiento de GCM y RCM.

2.3.1.1 Representative Concentration Pathways (RCP)

Los *Representative Concentration Pathways* o de forma abreviada RCPs permiten establecer una relación directa entre una cierta respuesta climática a una cierta estrategia para su mitigación y adaptación, lo cual permite evaluar los costos y beneficios asociados a ellas (Rojas, 2012). Los RCP han sido propuestos por la *Integrated Assessment Modelling Community* (IAMC) y se definen tomando en consideración diferentes escenarios de desarrollo socioeconómicos para el siglo XXI. Este desarrollo se traduce en trayectorias de emisiones de gases de efecto invernadero (considerando series de tiempo de emisiones para distintos gases como consecuencia de la actividad de diferentes sectores económicos y actividades humanas; ver Figura 2-3) y que son interpretadas luego en distintas concentraciones atmosféricas que implican un cambio en el forzamiento radiativo.

Las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera se utilizan como condición de borde para los GCM, permitiendo que estos simulen una respuesta asociada a la serie de tiempo respectiva la forzante, que en este caso se extiende al siglo XXI. De esta forma, los resultados obtenidos de los GCM aportan en la evaluación de impactos y vulnerabilidad de distintas estrategias de adaptación. Así, se proponen cuatro escenarios o vías representativas de concentraciones de gases de efecto invernadero, las cuales se nombran según el forzamiento radiativo que estos generan al año 2100. En la Tabla 2-1 se resumen los escenarios RCP en términos de la forzante radiativa, la anomalía de temperatura global promedio y la trayectoria de CO₂ asociada.

Tabla 2-1: Resumen en cuanto a escenarios RCP en términos de su forzante radiativa, anomalía de temperatura global y trayectoria de CO₂ asociada. Fuente:(Rojas, 2012).

Escenario	Forzante radiativa	Anomalía en temperatura (°C)	Trayectoria de CO ₂
RCP 2.6	Valores menores a 3 W/m ² antes del 2100, disminuyendo a 2.6 W/m ² al año 2100	1,5	Peak y posterior disminución
RCP 4.5	4.5 W/m ² al año 2100, sin haberlo excedido antes	2,4	Aumento y estabilización
RCP 6.0	6.0 W/m ² al año 2100	3,0	Aumento y estabilización
RCP 8.5	8.5 W/m ² en 2100	4,9	Creciente

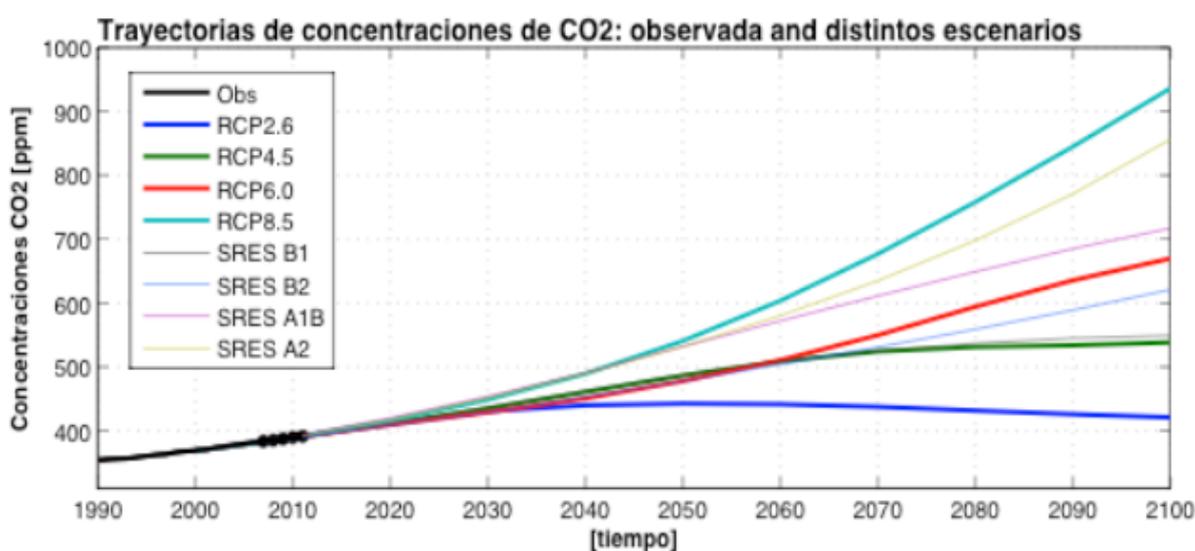


Figura 2-3: Trayectorias de concentraciones de CO₂ para los escenarios SRES B1, B2, SRES A1B y A2, junto a los RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5. Fuente:(Rojas, 2012).

2.3.1.2 Escalamiento de GCM y RCM

Como se ha mencionado en acápites anteriores, los Modelos Globales son una herramienta de gran utilidad para generar aproximaciones futuras de cambio climático a escala global. Sin embargo, como el dominio de estos modelos es el globo terráqueo, los GCM cuentan con una resolución espacial gruesa (100-200 km) en comparación a las requeridas para estudios del tipo hidrológicos. Lo anterior pues un solo píxel abarca grandes extensiones territoriales y, por tanto, pasa por alto la variabilidad climática a escalas más finas. Ejemplo de ello es lo que ocurre en el territorio nacional, donde la particularidad geográfica de Chile, que destaca por sus grandes variaciones topográficas dentro de pocos kilómetros, condiciona la presencia de diferentes tipos de climas de mar a cordillera y de norte a sur. Así, resulta necesario utilizar modelos que operen a partir de escalas espaciales más finas en comparación a los GCM, lo cual se podría traducir en el uso de modelos numéricos de mejor resolución para un área limitada como los Modelos Regionales (RCM). No obstante, en el caso de no contar con este tipo de modelos, que en general tienen asociado un alto costo computacional (Fowler et al., 2007), en la literatura se han propuesto diferentes métodos (e.g., Bozkurt et al., 2019; Dionizis et al., 2021) que permiten escalar los resultados derivados de la grilla de los GCMs a una resolución más fina mediante métodos estadísticos y post-procesamientos vinculados a la corrección de sesgo.

En el caso particular de los RCM, estos utilizan como condición de borde la información entregada por un GCM para reproducir simulaciones climáticas a menor escala (i.e., mayor resolución espacial). Típicamente, el rango de resolución de Modelos Regionales se encuentra dentro de los 50 km (Dionizis et al., 2021). Sin perjuicio de lo anterior, para efectos del estudio de la hidrología a escala de cuenca, se requiere de una resolución espacial mayor. En este sentido, resulta necesario aplicar un escalamiento estadístico y corrección de sesgo que permita capturar, en cierto grado, los patrones climáticos a escala regional y local. Por ejemplo, Bozkurt et al. (2019) toman como referencia valores derivados del reanálisis atmosférico ERA-Interim y evalúan simulaciones en retrospectiva realizadas con el modelo climático regional RegCM4 usando como base el GCM MPI-ESM-MR. Con ello estiman la temperatura y precipitación sobre la costa del Pacífico y la Cordillera de Los Andes de América del Sur. Allí concluyen que resoluciones espaciales superiores a 50 km, como las propias de los GCMs, pasan por alto gradientes climáticos importantes impuestos por una topografía compleja como la nacional. Adicionalmente, los resultados de la simulación histórica y futura a 10 km muestran una mejor representación de la temperatura del aire cerca de la superficie y la variabilidad de la precipitación en comparación con las simulaciones de 50 km. Otros puntos de interés que se desprenden del estudio se listan a continuación:

- Las simulaciones de alta resolución (e.g., 10 km) suprimen la sobreestimación de precipitación de simulaciones de 50 km sobre la Cordillera de Los Andes en el norte de Chile.
- Existen dificultades notables para capturar la tendencia de temperatura en la zona norte de Chile, tanto para el modelo de escala gruesa como para el modelo de escala espacial más fina.
- Ambas resoluciones (10 – 50 km) presentan valor agregado de temperatura y precipitación sobre gran parte de Chile, donde se destaca que para una resolución espacial de 10 km se resuelven las transiciones de Los Andes-Costa-Valle sobre Chile central.

2.3.2 Modelación hidrológica

Para comprender un sistema hidrológico que de por sí involucra distintos procesos propios de la naturaleza, es necesario llevar a cabo una simplificación del sistema que permita explicar su comportamiento. Para esto, a lo largo de la historia se han desarrollado distintos modelos hidrológicos que, si bien operan de forma diferente y se basan en taxonomías y filosofías de

modelación variadas, en general todos buscan ser una simplificación del mundo real que se basan en hipótesis que deben ser testeadas (Hrachowitz & Clark, 2017).

Los modelos hidrológicos se utilizan para reproducir y entender flujos y estados del ciclo hidrológico y sus procesos, facilitando el estudio asociado, por ejemplo, a la ocurrencia de crecidas o sequías, análisis de almacenamiento de aguas subterráneas, interacción de la capa terrestre con la atmósfera, entre otros. De este modo, se posicionan como una herramienta útil para la comprensión de dinámica hidrológica y la estimación de almacenamientos y flujos de los cuales no se tiene registro, o bien para evaluar hipótesis sobre el comportamiento actual y/o futuro bajo algún cambio en el sistema. Ejemplo de ello es el proyecto Actualización del Balance Hídrico Nacional, el cual, apoyado en el modelo hidrológico VIC (Variable Infiltration Capacity; Liang et al., 1994; Wood et al., 1992), busca entender cómo es el ciclo hidrológico en Chile y cuál sería el cambio asociado al contexto de clima cambiante actual (i.e., cambio hidrológico).

Bajo el contexto de cambio climático actual, algunas interrogantes que surgen entorno al ciclo hidrológico son: ¿De qué forma cambiará la participación de la precipitación en evapotranspiración y escorrentía?, ¿Cómo se verán afectadas otras componentes del ciclo hidrológico (e.g., almacenamiento nival, humedad del suelo y flujo base) ?, ¿Cómo cambiará la disponibilidad hídrica?, ¿Cuál será la magnitud y recurrencia de sequías en el futuro?, entre otras. Todas ellas, pueden ser abordadas mediante la modelación hidrológica, por lo que resulta fundamental la incorporación de esta herramienta en el estudio de la dinámica de los sistemas hidrológicos futuros a distintas escalas espaciales y temporales.

2.4 Índices de sequía

Las sequías corresponden a un fenómeno natural cuyas propiedades no pueden ser anticipadas en su totalidad. Estos eventos causan una reducción en la disponibilidad de agua en comparación con las condiciones normales en una cierta región y producen efectos ambientales y sociales negativos (Fernández & Gironás, 2021). Según Fernández y Gironás (2021), existen distintas definiciones de sequía, donde algunas se relacionan con componentes del ciclo hidrológico y su interacción con la actividad humana. Las definiciones comúnmente utilizadas en la literatura corresponden a sequía meteorológica, sequía hidrológica, sequía agrícola y sequía socioeconómica, las cuales se resumen en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2: Definiciones de los tipos de sequía. Fuente:(Valiente, 2001)

Tipo de sequía	Descripción	Impactos
Meteorológica	Escasez de precipitaciones durante un período prolongado de tiempo respecto a la estadística promedio en un periodo climatológico.	Reducción de infiltración, menor recarga a aguas subterráneas, incremento de temperatura, reducción de humedad, aumento de insolación, disminución de nubosidad e incremento de evapotranspiración.
Hidrológica	Deficiencia en el caudal o volumen de aguas superficiales o subterráneas (ríos, lagos, embalses, etc.) respecto a la estadística promedio en un periodo climatológico.	Menor caudal en ríos, disminución en nivel de lagos, embalses y otros cuerpos de agua.
Agrícola	Se presenta cuando la oferta hídrica (precipitación o aporte de agua de suelo) no es suficiente para el desarrollo adecuado de los cultivos.	Déficit hídrico en suelo y subsuelo, déficit hídrico en la vegetación, reducción de biomasa y pérdida de cosechas.
Socioeconómica	Cuando la disponibilidad de agua disminuye hasta el punto de producir daños económicos o personales a la población de la zona afectada por escasez de lluvias.	Económico, social y medioambiental.

2.5 Propagación de sequía meteorológica al ciclo del agua superficial

Si bien diferentes investigaciones se centran en plantear hipótesis que permitan entender, por ejemplo, las causas, duración, intensidad, propagación y otros aspectos relacionados a sequías meteorológicas (e.g., Boisier et al., 2016; Garreaud et al., 2017, 2020) aún existe una brecha en cuanto al estudio de cómo estos eventos impactan la hidrología a escala de cuenca. De esta forma, resulta interesante entender cómo el déficit de precipitaciones respecto a una referencia de “normalidad climática” (e.g., DGA, 2021b) se propaga a los sistemas hidrológicos (e.g., Figura 2-4) y los impactos que esta condición puede tener sobre los ecosistemas y la sociedad.

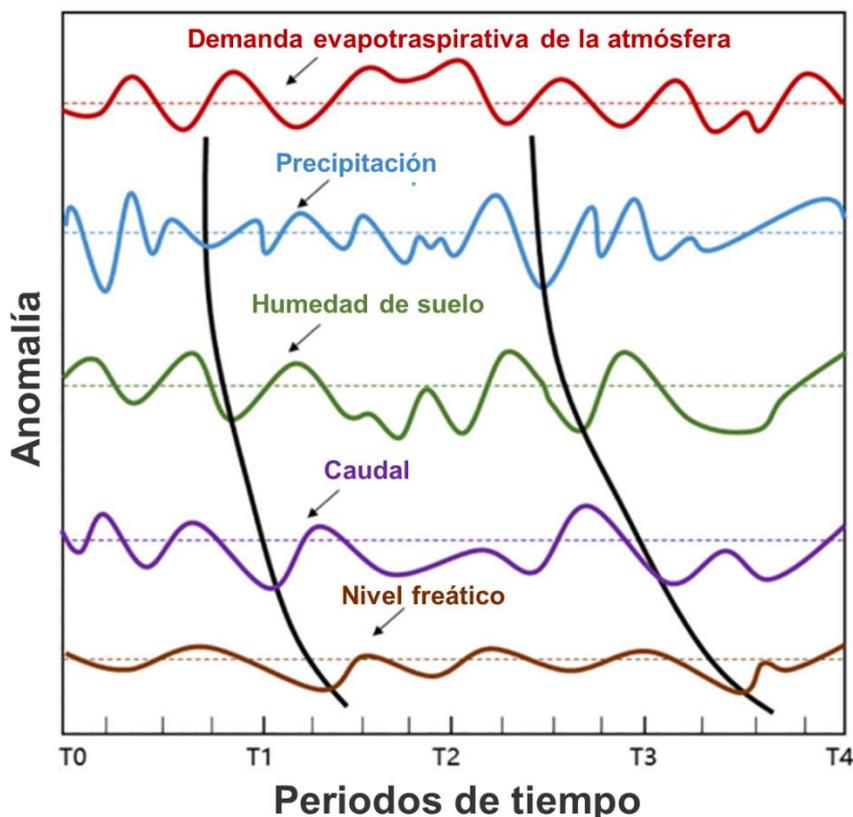


Figura 2-4: Ilustración de la propagación de la sequía a partir de déficits de precipitación (sequía meteorológica), que pueden ir acompañados de un aumento de la demanda de evaporación atmosférica (AED), a déficits de humedad del suelo (sequía agrícola), caudal bajo o nivel freático (sequía hidrológica). Fuente: Traducido de (Zhang et al., 2022).

La literatura sugiere una no-estacionariedad en la relación lluvia-escorrentía durante una sequía meteorológica prolongada, donde se intensifica la propagación de dicho déficit en la hidrología a escala de cuenca (e.g., Alvarez-Garretón et al., 2021a; Saft et al., 2016; Yang et al., 2017). Sin embargo, se debe tener en consideración que la respuesta de una cuenca a una sequía y cómo esta se propaga a los diferentes estados y flujos hidrológicos dependerá de su geomorfología, cobertura vegetal, patrones estacionales, entre otros atributos (e.g., Apurv & Cai, 2020; van Loon, 2015; Zhang et al., 2022). Por ejemplo, la propagación de una sequía en una cuenca de respuesta rápida diferirá de la que se tenga en una cuenca de respuesta lenta (van Loon, 2015), la cual tendrá un mayor desfase en su respuesta, lo cual refleja la complejidad del estudio de la forma en que se expresa la sequía meteorológica en la componente terrestre del ciclo hidrológico (Yang et al., 2017b).

2.6 Percepciones asociadas a sequías

Los eventos de sequía y sus impactos varían espacial y temporalmente debido a las diversas condiciones climáticas e hidrológicas, la exposición y la vulnerabilidad, la demografía y las

acciones de respuesta (Blauhut et al., 2022). En este sentido, la percepción de una sequía estará condicionada por las medidas y estrategias adaptativas que se tengan implementadas para afrontar este tipo de eventos, el cual está afectando a más personas que cualquier otra amenaza socionatural en el mundo (Aldunce et al., 2017). Así, las sequías se expresan en términos prácticos como un constructo social que, por tanto, podrían diferir en términos de su percepción. Por ejemplo, Blauhut et al. (2022) muestran que, respecto a la sequía de 2018-19, en Europa se evidenció una alta diversidad en la percepción de la misma en diferentes países, así como de las estrategias de gestión de la sequía implementadas para aliviar los impactos mediante el aumento de la conciencia y la resiliencia nacionales y subnacionales. De manera análoga, para la megasequía en Chile (2010-act), Aldunce et al. (2017) dan cuenta de un reconocimiento general de la sequía y confirma que las personas identifican el inicio de la sequía de manera similar a la información meteorológica, pero sólo basados en el reconocimiento de los impactos en la vida personal y social, los sectores productivos, los sistemas de gestión del agua y el medio ambiente. En consecuencia, más allá de la amenaza natural que sugiere la ocurrencia de una sequía, en la percepción converge el riesgo, la exposición y la vulnerabilidad de una determinada comunidad y/o país, así como la actitud o postura que estas adoptan en respuesta a la amenaza.

2.7 Síntesis de la revisión de antecedentes

En base a la revisión de antecedentes se desprende que:

- El sistemático aumento de emisiones de GEI a partir de la década de 1950, vinculadas principalmente a actividades antropogénicas, indican un potencial vínculo entre la actividad humana y el cambio del sistema climático actual y la dinámica que este podría seguir a futuro.
- Existe una vasta evidencia del calentamiento del planeta, lo cual se expresa en registros de aumento de temperatura a nivel de atmósfera y océanos del orden de 1°C. Esto ha traído como consecuencia que las reservas de nieve y hielo perenne hayan disminuido, aumentando el nivel del mar en aproximadamente 0,19 m.
- Existe un déficit de precipitaciones en Chile que, en 2021, se ha visto reflejado en 37 de 41 estaciones pluviométricas analizadas en DGA (DGA, 2021a), siendo las disminuciones más críticas las reportadas en la zona norte del país, con valores entre 85% y 90%.
- Estudios de diagnóstico de la DGA han manifestado que Coquimbo corresponde a una de las regiones con mayor riesgo hídrico. Lo anterior considerando un déficit en sus caudales que se acerca a los 40 m³/s. Adicionalmente, se muestra un desbalance de -0.34 m³/s en los acuíferos de la zona durante la última década, debido a una disminución en la recarga de acuíferos y producto de un aumento del 52% en las extracciones.
- Los GCM de resolución gruesa pasan por alto gradientes climáticos importantes impuestos por la topografía. Los resultados de la simulación RCM de alta resolución (10 km) son prometedores y mejoran la representación de temperatura y precipitación en el centro-sur de Chile. Por lo tanto, la resolución espacial es fundamental para una mejor estimación de la variabilidad espacial y temporal de las condiciones climáticas actuales.
- Existen distintas definiciones de sequía (meteorológica, hidrológica y agrícola), las cuales deben ser evaluadas de manera complementaria para efectos de establecer un diagnóstico integral sobre la condición de la cuenca de interés.

3 ZONA DE ESTUDIO

En este capítulo, se describe la zona de estudio mediante una caracterización geomorfológica, fisiográfica e hidroclimática. Asimismo, se expone un análisis general en cuanto a la disponibilidad de observaciones locales de caudal (i.e., controles fluviométricos) y de precipitación, describiendo atributos como su nombre, ubicación, estado de vigencia, variables que reporta, entre otros.

3.1 Antecedentes generales

La zona de estudio corresponde a la cuenca del embalse Cogotí, la cual es una subcuenca ubicada en la parte sur de la cabecera de la cuenca del río Limarí ($31^{\circ}21' S$; $71^{\circ}9' O$), comuna de Combarbalá, Región de Coquimbo, Chile (Figura 3-1). La cuenca tiene una superficie de 1.601 km^2 , lo cual representa $\sim 17\%$ del área total de la cuenca del río Limarí ($\sim 11760 \text{ km}^2$). La elevación de la cuenca en estudio recorre valores desde los 650 m s.n.m (salida de la cuenca y entrada al Embalse Cogotí) a los 4200 m s.n.m .

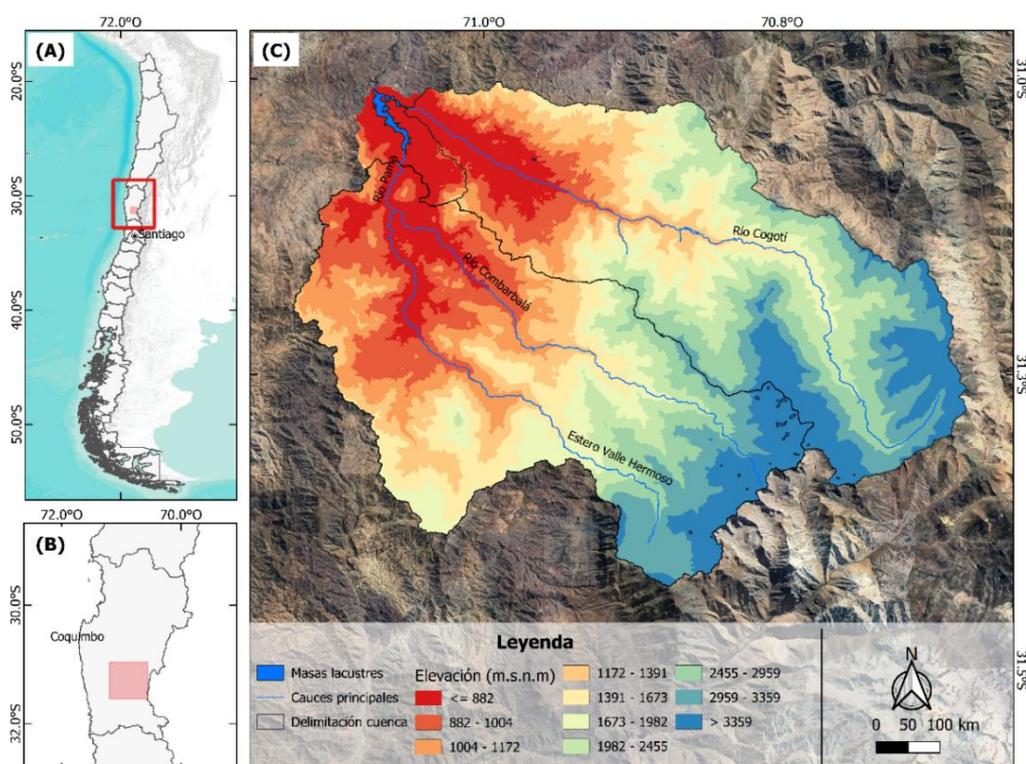


Figura 3-1: Zona de estudio. Cuenca del embalse Cogotí.

Respecto a la geología de la zona, según la base de datos CAMELS-CL (<https://camels.cr2.cl/>; Alvarez-Garretón et al., 2018), la clase predominante de rocas corresponde a volcánicas básicas, seguida de rocas plutónicas ácidas, lo cual facilitaría la recarga/interacción con acuíferos dada la permeabilidad de este tipo de rocas. La cobertura de suelo, obtenida a través del Visualizador de Cobertura de Suelo (<https://lcviewer.vito.be>) al año 2019, se encuentra definida mayoritariamente por praderas y matorrales, que corresponden a campos de vegetación de clima mediterráneo, característicos de las regiones de la zona norte de Chile. Seguido a esto, existe presencia de terrenos agrícolas en la zona no cordillerana (elevaciones menores a 2000 m s.n.m), lo cual trae consigo que, para la comuna de Combarbalá, el uso del recurso hídrico dirigido a riego corresponda al 98% del caudal medio anual (<https://dga.mop.gob.cl/Paginas/default.aspx>; DGA), dejando de manifiesto que la agricultura es una de las principales actividades económicas de la zona. Finalmente, y en menor medida ($<1\%$), la cobertura de suelo incluye también bosques, cuerpos de agua (embalses), áreas urbanas e industriales. Cabe mencionar que la principal obra de infraestructura hidráulica presente en la cuenca de estudio corresponde al embalse Cogotí (150 Hm^3).

Tabla 3-1: Clasificación de tipo de suelo para la Cuenca del río Cogotí construída a partir de información de Land Cover (Zhao et al., 2016).

Cobertura de suelo	Porcentaje de área (%)	Área (km ²)
Matorrales (áridos y suculentas)	69,66	1115,40
Tierras desnudas (rocas y gravas)	25,83	413,59
Cultivos (huertos, barbechos, otros cultivos)	1,85	29,62
Pastizales (áridos, praderas anuales, otros pastizales)	1,65	26,42
Superficies impermeables	0,47	7,53
Bosques (nativos de hoja ancha renovales)	0,29	4,64
Cuerpos de agua (lagos y reservorios)	0,25	4,00
Humedales (marismas)	0,01	0,11

3.2 Geomorfología

En cuanto a la geomorfología de la cuenca, la Tabla 3-2 resume algunos de los principales atributos geomorfológicos obtenidos del procesamiento del modelo de elevación digital (DEM) derivado de la misión SRTM 1 arc-second (resolución 30x30 m; Farr et al., 2007).

Tabla 3-2: Características geomorfológicas de la cuenca del Río Cogotí.

Atributo	Valor (Unidad)
Área	1601 (km ²)
Elevación mínima	680 (m s.n.m)
Elevación máxima	4186 (m s.n.m)
Rango de elevación	3506 (m)

La cuenca se encuentra dentro de la agrupación de Planicies Litorales y Cuencas del Sistema Montañoso Andino (DGA, 2020c), presentando elevaciones que superan los 2000 m s.n.m en aproximadamente el 75% de ésta, mientras que el 5% de la superficie total de la cuenca se encuentra por sobre los 4000 m s.n.m. Lo anterior se verifica en la curva hipsométrica (Figura 3-2), donde se aprecia que la cuenca presenta un estado de evolución en equilibrio (principalmente ríos maduros), caracterizada por una topografía con presencia de pendientes abruptas, que se debe principalmente a la erosión provocada por la acción nival, eólica e hidráulica (DGA, 2020c).

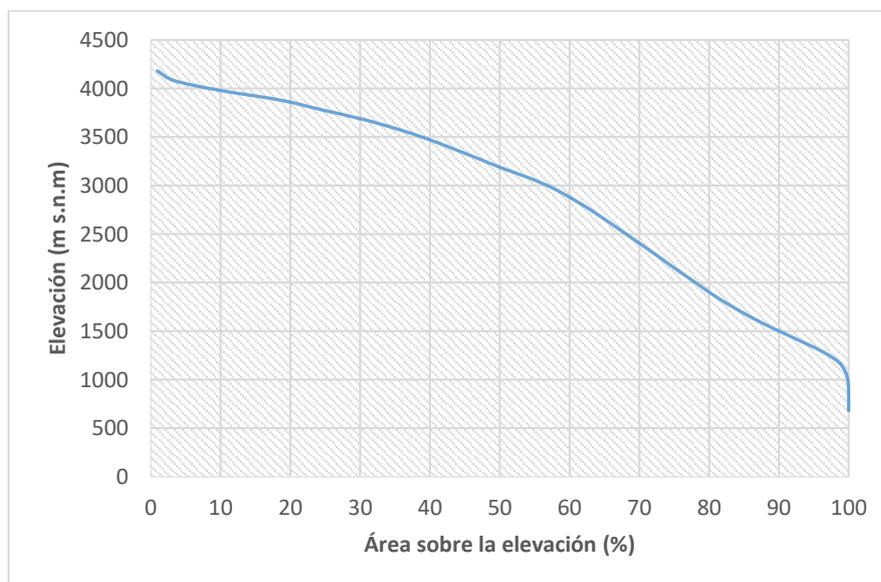


Figura 3-2: Curva Hipsométrica para la cuenca del Río Cogotí.

3.3 Disponibilidad de registros fluviométricos y meteorológicos

La cuenca cuenta con diferentes controles fluviométricos y meteorológicos que permiten conocer la dinámica de algunas variables hidrometeorológicas de interés. La ubicación de dichas estaciones, presentada en la Figura 3-3, se recupera de la Mapoteca de la Dirección General de Aguas (DGA) y, para efectos prácticos, se identifica cada estación fluviométrica anteponiendo el identificador “F”, mientras que, en forma análoga, las estaciones meteorológicas se individualizan anteponiendo el identificador “M”. En forma complementaria a la Figura 3-3, la Tabla 3-3 y Tabla 3-4 individualizan las estaciones consideradas para efecto del presente estudio.

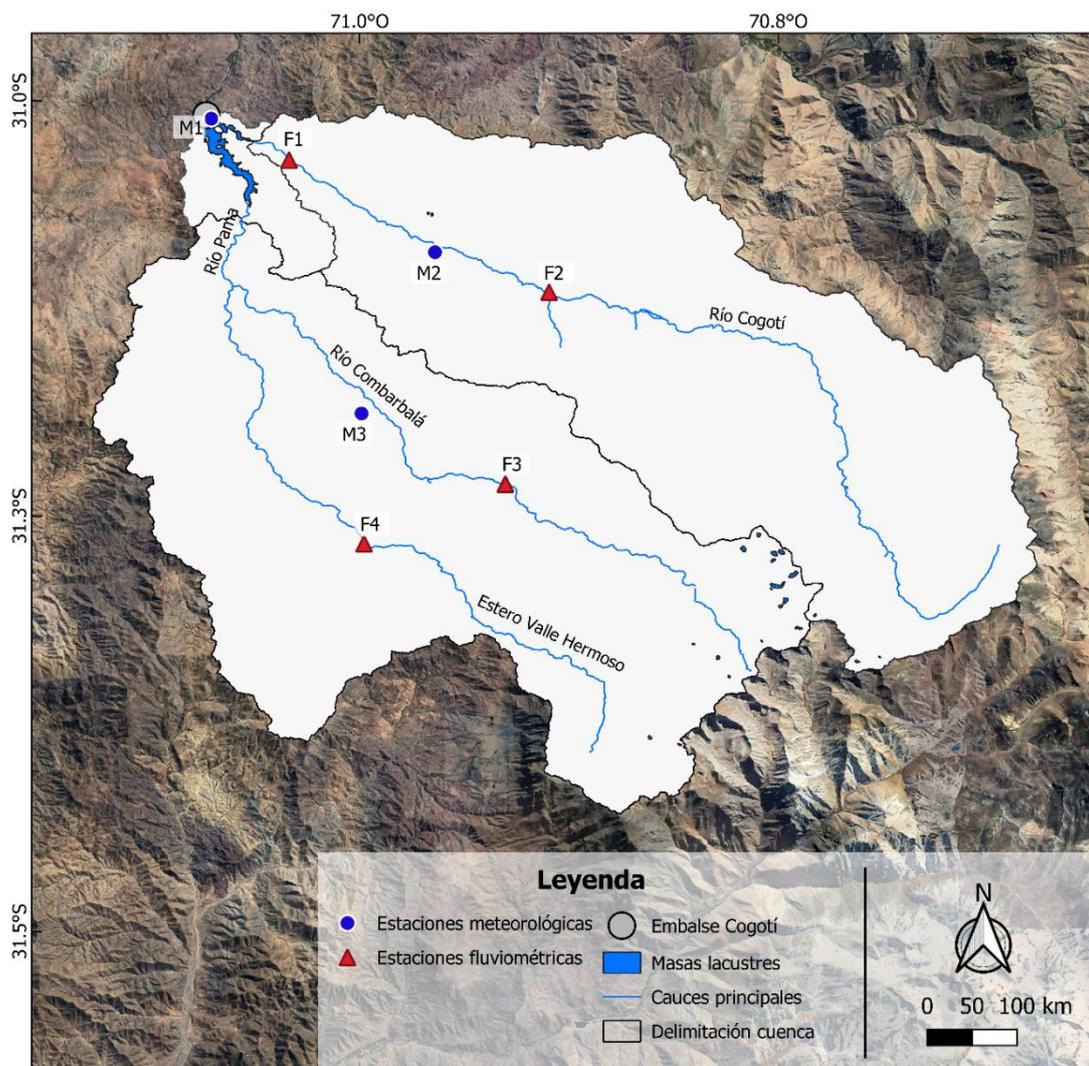


Figura 3-3: Estaciones Fluviométricas y Meteorológicas presentes en la cuenca de estudio.

Tabla 3-3: Nombres e identificadores de estaciones meteorológicas en vigencia presentes en la cuenca del río Cogotí.

ID Estación	Nombre/Código BNA	Ubicación (Lat; Lon; Elevación)	Inicio de registro	Variables que reporta
M1	Cogotí Embalse (04535001-0)	-31,01; -71,09 740 m s.n.m	1936-01-01	Precipitación diaria
M2	Cogotí 18 (04531003-5)	-31,08; -70,95 840 m s.n.m	1943-01-01	Precipitación diaria
M3	Combarbalá (04532006-5)	-31,17; -71,00 870 m s.n.m	1977-01-01	Precipitación diaria

Tabla 3-4: Nombres e identificadores de estaciones fluviométricas en vigencia presentes en la cuenca del Río Cogotí.

ID Estación	Nombre/Código BNA	Ubicación (Lat; Lon; Elevación)	Inicio de registro	VARIABLES que reporta
F1	Río Cogotí entrada Embalse Cogotí (04531002-7)	-31,03; -71,04 648 m s.n.m	1980-01-25	Caudal diario
F2	Río Cogotí en Fraguita (04530001-3)	-31,11; -70,89 1010 m s.n.m	1980-12-06	Caudal diario
F3	Río Combarbalá en Ramadillas (04532001-4)	-31,23; -70,91 1285 m s.n.m	1979-01-01	Caudal diario
F4	Río Pama en Valle Hermoso (04533002-8)	-31,27; -70,99 1026 m s.n.m	1987-11-02	Caudal diario

3.4 Caracterización Hidroclimatológica

La cuenca del Río Cogotí presenta subcuencas con regímenes de tipo nival y nivo/pluvial, lo cual se puede observar en las curvas de variación estacional (CVE) de escorrentía media diaria. Allí se puede notar el régimen nival de la cuenca para los casos de Figura 3-4B y Figura 3-4C, donde la escorrentía de mayor magnitud (i.e., peak o máximo estacional) se manifiestan durante la temporada de primavera-verano (i.e., octubre-marzo) como consecuencia de los deshielos. Para estos casos, se puede ver que, en años húmedos (i.e., probabilidades de excedencia bajas), los valores más altos de escorrentía se presentan entre los meses de octubre y diciembre, mientras que los valores mínimos lo hacen entre febrero y julio. Para el caso de Figura 3-4A, se observa un régimen mixto del tipo nivo/pluvial, con máximos de escorrentía en la época de invierno (julio a septiembre) y primavera (octubre a diciembre), debido a lluvias y deshielos. En estos casos se puede notar que, para probabilidades de excedencia bajas, tanto del 5% como del 10%, existe un aporte importante de escorrentía a lo largo del año, acentuándose en los meses de agosto y noviembre. Los resultados en cuanto al Balance Hídrico en el período 1985-2015 se ven en Tabla 3-5.

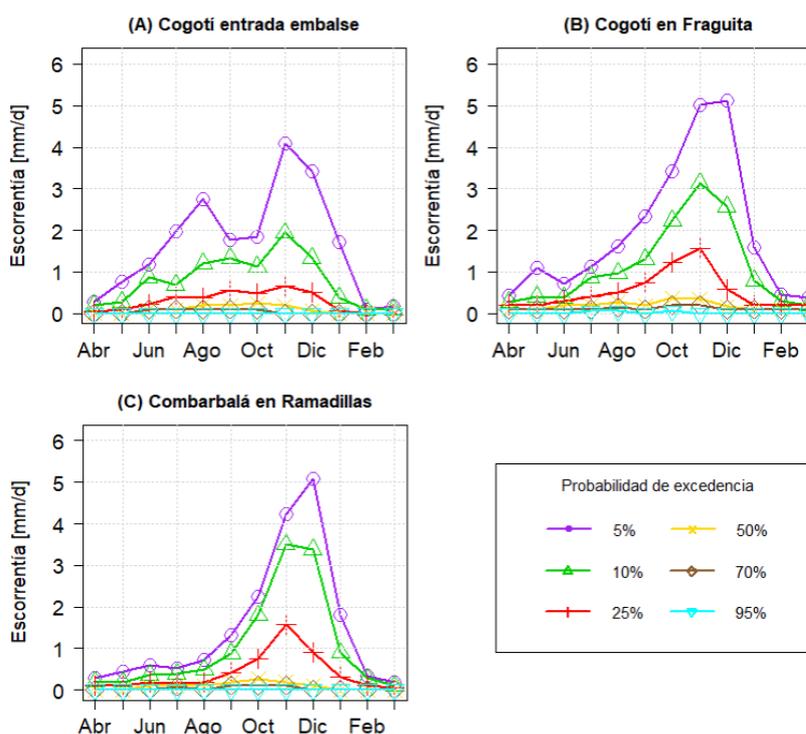


Figura 3-4: Curvas de variación estacional en el periodo 1979-2015 para las estaciones fluviométricas Cogotí entrada embalse, Cogotí en Fraguita y Combarbalá en Ramadillas.

Tabla 3-5: Balance Hídrico para el período 1985-2015.

Caso	Periodo	T (°C)	ETP (mm/año)	P (mm/año)	ET (mm/año)	Q (mm/año)	1/P*dS/dt
CR2MET	1985-2015	10,8	150,0	151,9	132,3	22,0	-2%
GCM	1985-2015	11,0	169,6	167,3	150,8	27,9	-7%
RCM	1985-2015	11,0	170,2	145,5	131,6	24,3	-7%

Al comparar las curvas de duración (CD) de escorrentía media diaria durante el período 1979-2015 (Figura 3-5), se evidencia que, para probabilidades de excedencia bajas (menores a 5%), las tres subcuencas presentan magnitud de valores medios diarios similares, situación que deja de ocurrir al analizar probabilidades de excedencia mayores, donde se puede notar que la escorrentía media diaria para Cogotí en Fraguita es mayor a la presente en Cogotí entrada embalse y Combarbalá en Ramadillas, presentando una menor pendiente. Esto da cuenta de una respuesta a largo plazo más rápida en el caso de las cuencas Cogotí en Embalse y Combarbalá en Ramadillas respecto a Cogotí en Fraguita.

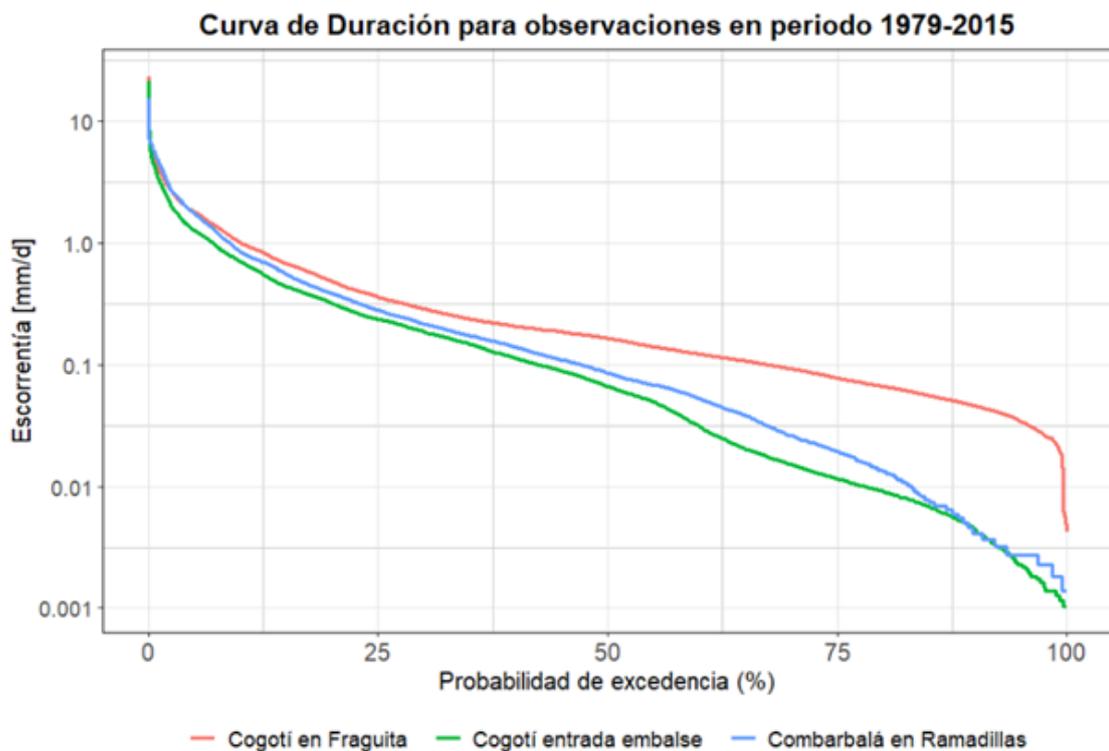


Figura 3-5: Curva de duración de escorrentía media diaria para Cogotí en Fraguita, Cogotí entrada embalse y Combarbalá en Ramadillas.

En términos del clima, DGA (2020) define según la clasificación climática de Köppen-Geiger la zona de estudio identificando que: i) para la parte media y media-alta en los valles de la cuenca la clasificación climática indica la predominancia de un clima de tipo seco semiárido de lluvia invernal o BSk (s), el cual se caracteriza por ser frío y seco, de escasas precipitaciones y temperatura media anual inferior a los 18°C; y ii) al ascender en la cuenca, la clasificación climática indica un clima mediterráneo de lluvia invernal o Csb (h), donde en las zonas de mayor altura existe un clima frío de tundra de lluvia invernal, denominado ET (s).

Para estudiar la climatología de las cuencas de interés y complementar la clasificación realizada en DGA (2020) se construyeron climogramas a partir de las observaciones de precipitación y temperatura registradas y obtenidas de CAMELS-CL (<https://camels.cr2.cl/>; Alvarez-Garretón et al., 2018) para el período 1979-2015, en las estaciones Cogotí en Fraguita Figura 3-6A, Cogotí entrada Embalse Figura 3-6B, y Combarbalá en Ramadillas Figura 3-6C. De

allí se desprende que el clima de la cuenca es principalmente semiárido, con veranos que presentan altas temperaturas medias y bajas precipitaciones, sumado a la presencia de lluvia invernal que se concentra en mayor parte a lo largo del período otoño-invierno (abril-septiembre).

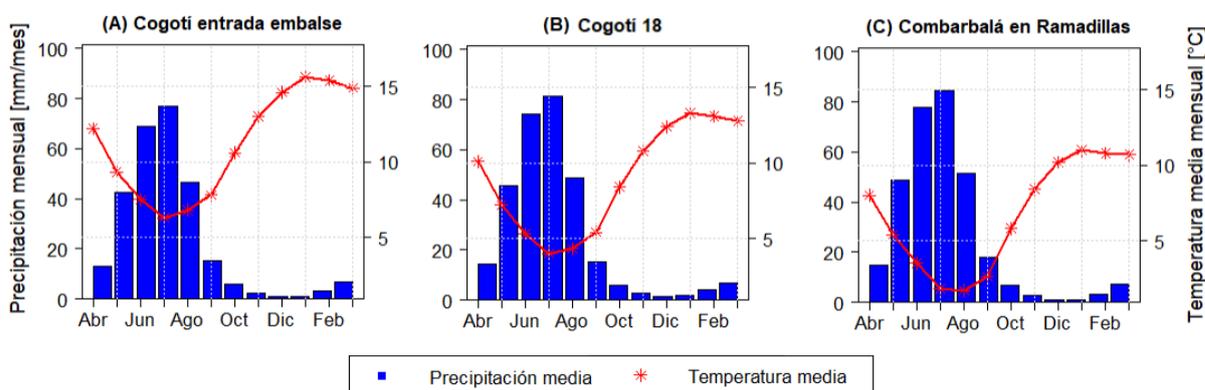


Figura 3-6: Climogramas obtenidos para Cogotí entrada embalse, Cogotí 18 y Combarbalá en Ramadillas a partir de observaciones de precipitación y temperatura recuperadas de CAMELS- CL para el período 1979-2015

3.5 Actividades productivas y derechos de agua

Los derechos de aprovechamiento de agua (DAA) superficial en la cuenca del embalse Cogotí, se obtienen de la base de datos de la DGA (<https://dga.mop.gob.cl/Paginas/default.aspx>). En total, para la cuenca, se tienen 70 DAA superficiales otorgados, los cuales se distribuyen en consuntivos (92%) y no consuntivos (8%). Por otra parte, de la información recuperada de la base de datos de la DGA, se tiene que el recurso hídrico se distribuye en diferentes actividades productivas según se muestra en Figura 3-7.

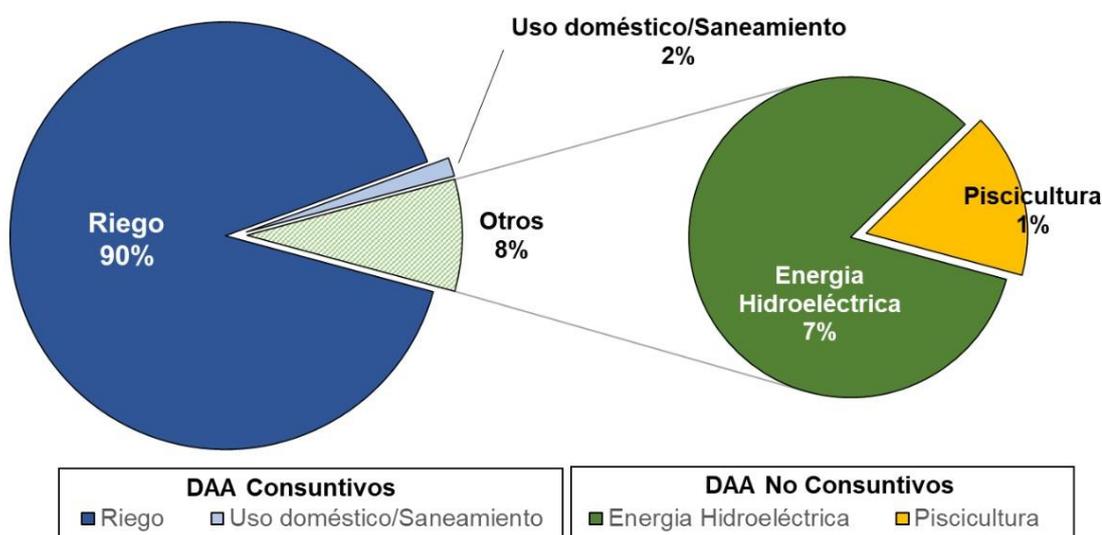


Figura 3-7: Distribución del recurso hídrico según distintas actividades productivas para derechos de aprovechamiento de agua superficial consuntivo y no consuntivo.

En consecuencia, predomina el uso asociado al riego (98%), seguido del uso para Bebida/Usos Domésticos/Saneamiento (20%), ambos vinculados a DAA consuntivos. En términos de la evolución temporal de los derechos de agua asignados, la Figura 3-8 muestra la demanda asociada a los diferentes ejercicios de los DAA superficiales. De esta forma, se puede ver que a lo largo del período 1979-2015, existe un aumento paulatino en el uso de DAA superficiales orientados a un ejercicio permanente y continuo, lo cual tiene sentido considerando que, gran mayoría de los DAA con uso

de riego fueron entregados desde el año 1999 a 2007, provocando un aumento en producción agrícola y extensión en las superficies plantadas a lo largo de los años (Castillo & Ríos, 2016).

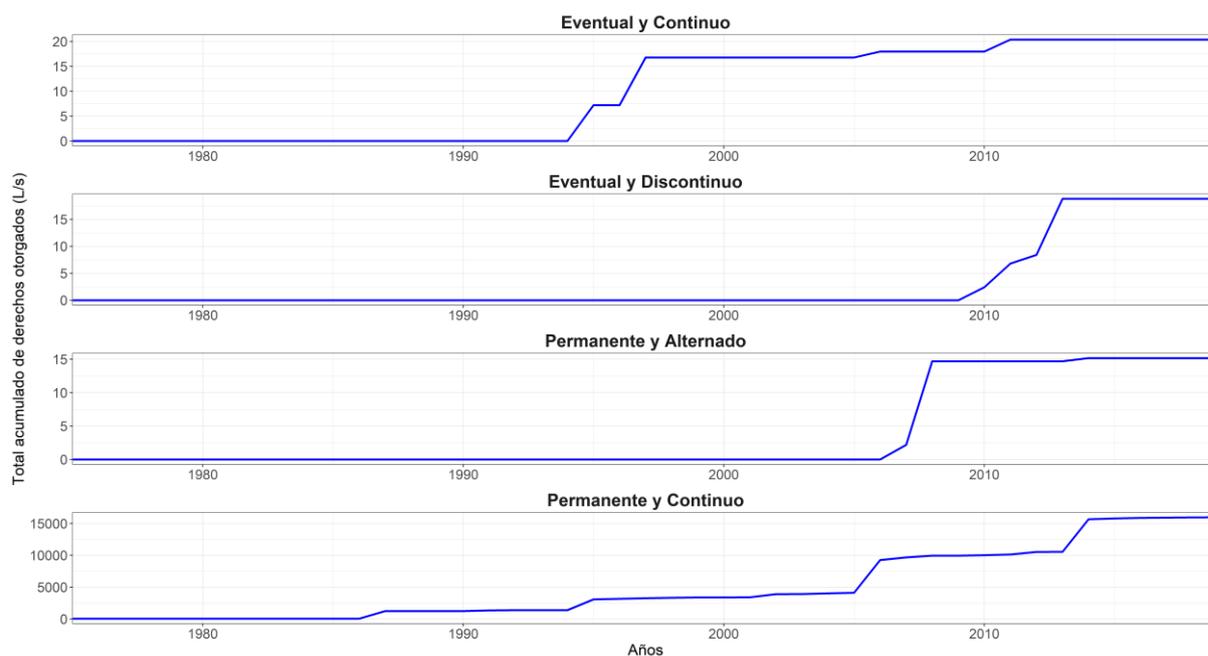


Figura 3-8: Demanda asociada a los distintos tipos de Derechos de Aprovechamiento de Aguas en la zona de estudio.

4 METODOLOGÍA

4.1 Metodología general

En este capítulo, se detalla la metodología adoptada para la obtención de forzantes meteorológicas de precipitación y temperatura en condiciones de cambio climático a nivel de URH. Asimismo, se describe el procedimiento de modelación hidrológica desarrollada en WEAP para la obtención de caudales. Finalmente, se presenta el detalle del cálculo de diferentes índices de sequía. La metodología general, la cual se describe en los acápites posteriores, se esquematiza según la Figura 4-1.

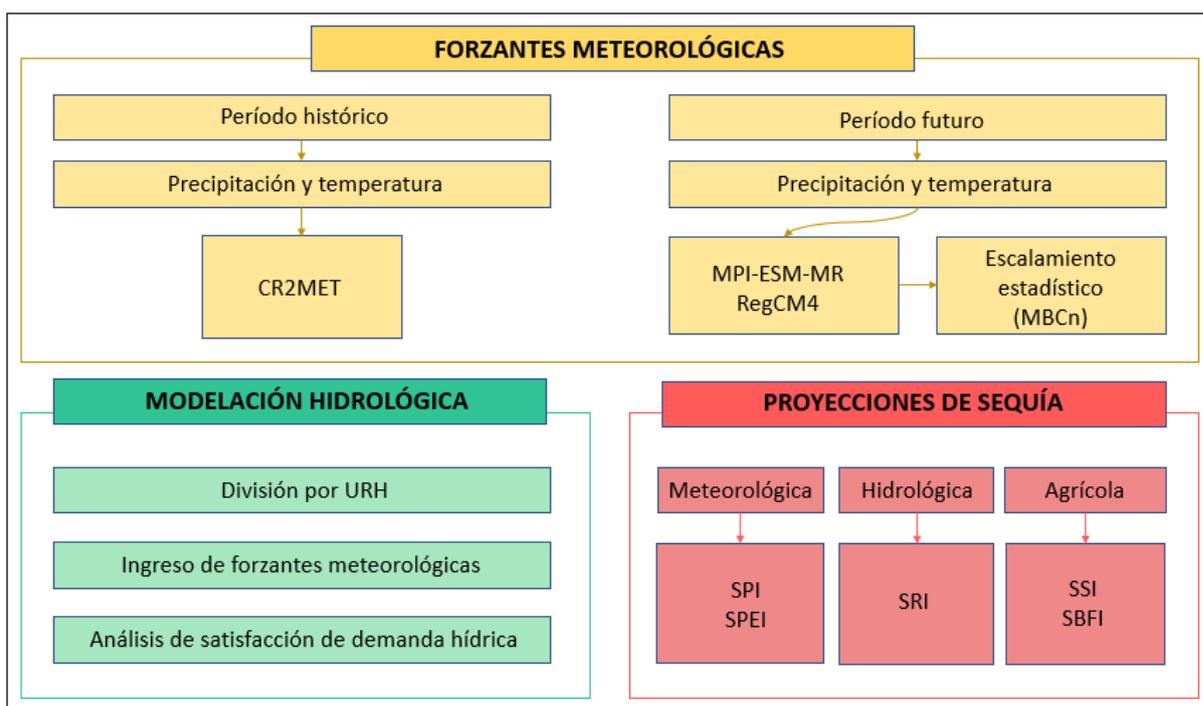


Figura 4-1: Esquema general de la metodología adoptada.

4.2 Delimitación de Unidades de Respuesta Hidrológica (URHs)

Para el desarrollo de este estudio, se define como unidad básica la Unidad de Respuesta Hidrológica (URH). Una URH corresponde a una unidad espacial de cálculo de balance de masa y energía (dependiendo del modelo), dentro de la cual los procesos y estados pueden describirse adecuadamente para el cálculo mediante conjuntos únicos de parámetros, variables de estado y flujos (Pomeroy et al., 2007). De esta forma, se obtienen forzantes de precipitación y temperatura para la zona de estudio en 8 URHs, definidas a partir del modelo WEAP Limarí (DGA, 2020b), las cuales se muestran en Figura 4-2 y, de manera complementaria, se describen en Tabla 4-1.

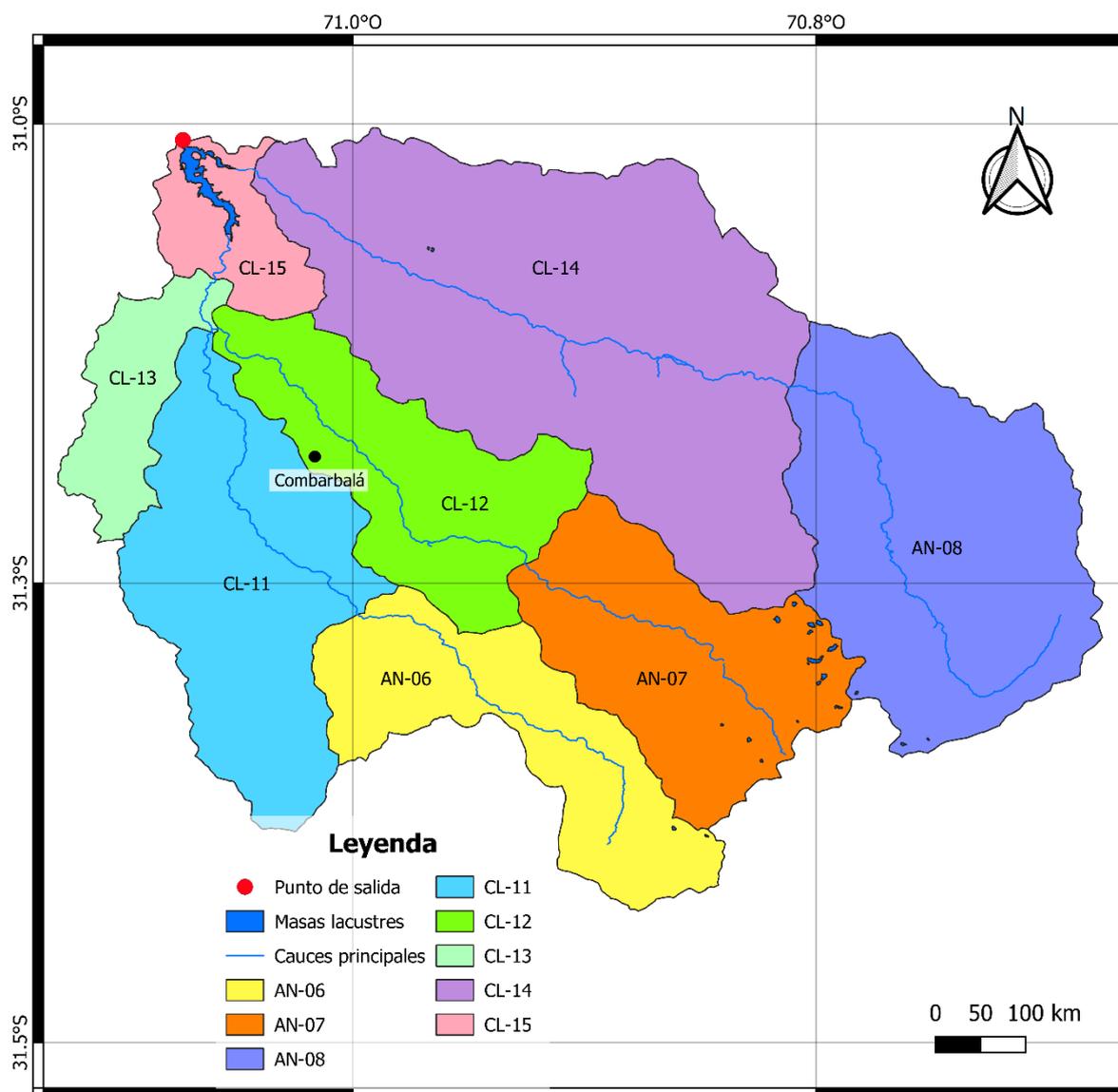


Figura 4-2: División de la zona de estudio por Unidades de Respuesta Hidrológica.

Tabla 4-1: Listado de URHs de la cuenca, régimen hidrológico y área.

Código WEAP	Nombre	Régimen	Área (km ²)
AN-06	Estero Valle Hermoso en cabecera	Nival/Pluvial	157,101
AN-07	Río Combarbalá en cabecera	Pluvial	181,771
AN-08	Río Cogotí en cabecera	Pluvial	284,324
CL-11	Estero Valle Hermoso	Pluvial	225,772
CL-12	Río Combarbalá	Pluvial	160,582
CL-13	Estero Valle Hermoso entre río Combarbalá y entrada embalse Cogotí	Pluvial	63,821
CL-14	Río Cogotí	Nival/Pluvial	469,358
CL-15	Embalse Cogotí	Pluvial	58,477
		TOTAL	1601,206

4.3 Obtención de forzantes meteorológicas

4.3.1 Datos y proyecciones climáticas

Para la obtención de forzantes de precipitación y temperatura, se considera como referencia, las variables obtenidas del producto grillado CR2MET para los años 1979-2015 (v1.4.2 para precipitación y v1.3 para temperatura mínima/máxima), las cuales se encuentran a escala diaria para una grilla regular de 0,05° latitud-longitud para el territorio de Chile continental.

Para efectos de simulaciones climáticas, se dispone de las variables meteorológicas extraídas para el escenario RCP 8.5 del Modelo de Circulación General (GCM) MPI-ESM-MR (200 km) y del Modelo de Circulación Regional (RCM) RegCM4 (10 km), el cual utiliza como base para su operación el modelo MPI-ESM-MR. Para efectos de analizar el desempeño de estos modelos en el periodo base, se utilizan las series de tiempo históricas asociadas a estos, ajustadas al periodo con estimaciones disponibles en el producto CR2MET, según lo cual se establece el periodo comprendido entre 1979-2005 como periodo climático base. En cuanto a las proyecciones climáticas futuras, para efectos de obtención de forzantes meteorológicas, tanto para el GCM como el RCM, se considera el período 2006-2060.

4.3.2 Verificación del producto grillado CR2MET

Tomando en cuenta la naturaleza estadística del producto CR2MET, resulta apropiado realizar una verificación de las estimaciones asociadas al mismo respecto a los registros disponibles en estaciones ubicadas en la zona de interés o cercana a ella. Lo anterior a modo de tener un diagnóstico general sobre el desempeño del producto en la zona de interés.

Para la verificación de variables de precipitación media diaria (CR2MET; v1.4.2) y temperatura mínima/máxima (CR2MET; v1.3) en el período histórico (1979-2015), se comparan las respectivas series con los datos meteorológicos disponibles en las estaciones Cogotí 18, Cogotí embalse y Combarbalá, recuperadas del Explorador Climático (<https://explorador.cr2.cl/>). Los resultados indican que, tanto precipitación media diaria (Figura 4-3) como temperaturas mínima y máxima (Figura 4-4), los registros de estaciones y el producto CR2MET se ajustan de manera adecuada a nivel mensual y, en consecuencia, a nivel anual, lo cual se verifica con la obtención de coeficiente de correlación de Pearson cercanos a 1 (ver Tabla 4-2, Tabla 4-3 y Tabla 4-4). Lo anterior indica que, en términos de temporalidad, existe una representación adecuada por parte de CR2MET.

En términos cualitativos, se aprecia en Figura 4-3 que existe una buena representación de la variabilidad interanual de los montos de precipitación, lo cual se puede verificar en los respectivos gráficos de dispersión, donde los valores se acercan a la línea 1:1. Para el caso de temperaturas mínima y máxima (Figura 4-4), si bien los gráficos de caja muestran una altura similar, lo cual daría cuenta de una buena representación de la variabilidad interanual de la variable, se evidencia un sesgo frío en la estimación de CR2MET, el cual luego se verifica en los gráficos de dispersión.

En este sentido, el sesgo frío resulta sistemático y no se explica por las diferencias de elevación entre píxel y estación, puesto que la estación se encuentra a mayor elevación que el centroide. De esta forma, dicho sesgo se podría atribuir a la particularidad de la zona donde se ubica la estación meteorológica y los efectos locales que allí puedan tenerse, o bien, por un sesgo intrínseco al modelo.

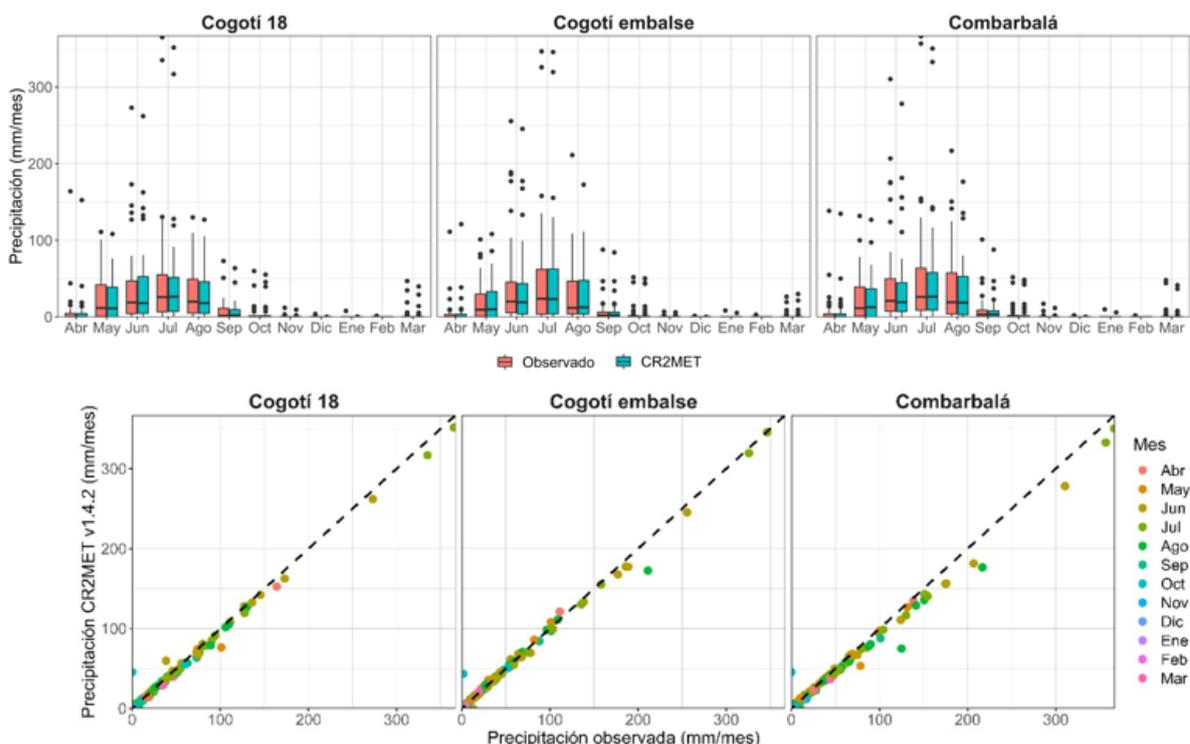


Figura 4-3: Verificación del producto de precipitación CR2MET 1.4.2 respecto a los registros en las estaciones Cogotí 18, Cogotí embalse y Combarbalá en el periodo 1979-2015. Panel superior: patrón de variación estacional de la precipitación mensual. Panel inferior: gráfico de dispersión de la precipitación mensual observada en la estación respecto a la estimada en CR2MET v1.4.2.

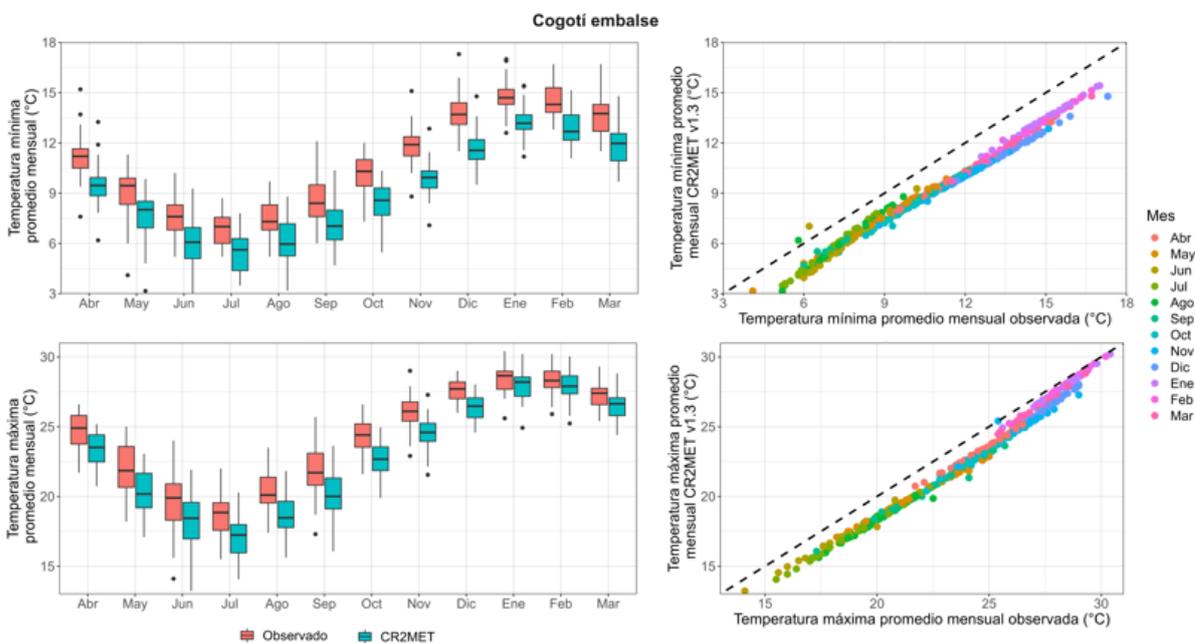


Figura 4-4: Verificación del producto de temperaturas extremas de CR2MET v1.3 respecto a los registros en la estación Cogotí embalse en el periodo 1979-2015. Panel izquierdo: patrón de variación estacional de la precipitación mensual. Panel derecho: gráfico de dispersión de la precipitación mensual observada en la estación respecto a la estimada en CR2MET v1.3.

Por otra parte, los promedios de precipitación media de la serie completa observada versus precipitación media CR2MET para Cogotí 18, indican que el producto CR2MET presenta un promedio 4,9% menor a lo reportado en la estación, mientras que para Cogotí embalse y Combarbalá, este comportamiento se mantiene, pero con porcentajes de 0,87% y 9,35% respectivamente. En cuanto a la desviación estándar de precipitaciones, se puede ver que, los valores del producto grillado presentan una menor dispersión en comparación a las

precipitaciones observadas en la totalidad de estaciones, sin embargo, esta diferencia es mínima (4,65% en Cogotí 18; 2,71% en Cogotí embalse; 9.51% en Combarbalá). Finalmente, el RMSE para la muestra de precipitaciones observadas en las tres estaciones en comparación al producto grillado CR2MET, indica que el nivel de dispersión de valores residuales para la serie completa no es significativo (3,48 en Cogotí 18; 3,23 en Cogotí embalse; 5,40 en Combarbalá). De esta forma, se observa que los montos de precipitación mensuales, estacionales y anuales de CR2MET, se ajustan de buena forma a las observaciones reportadas por las estaciones.

Tabla 4-2: Cuadro resumen de métricas estadísticas calculadas para precipitación CR2MET v1.4.2 y precipitación en estación Cogotí 18, disponible en el Explorador Climático (<https://explorador.cr2.cl/>). El análisis se obtiene a nivel mensual, estacional, anual y para la serie completa.

Periodo	r (-)	RMSE (mm/mes)	PromObs (mm/mes)	PromSim (mm/mes)	StdObs (mm/mes)	StdSim (mm/mes)
Abr	1,00	2,11	8,13	7,55	27,29	25,37
May	0,99	4,57	25,17	23,44	30,74	28,54
Jun	1,00	4,79	41,81	42,90	59,19	57,64
Jul	1,00	4,53	53,07	50,82	79,53	75,86
Ago	1,00	3,13	31,34	31,43	35,06	36,91
Sep	1,00	2,26	8,37	7,41	14,76	12,78
Oct	0,82	7,44	4,09	5,11	11,84	12,98
Nov	0,93	0,86	0,54	0,33	2,07	1,57
Dic	0,01	0,65	0,12	0,01	0,65	0,05
Ene	1,00	1,22	0,21	0,01	1,30	0,07
Feb	1,00	0,24	0,04	0,00	0,24	0,00
Mar	1,00	1,84	3,31	2,66	9,70	8,14
Abr-Sep	1,00	11,35	169,49	161,34	118,89	114,51
Oct-Mar	0,99	2,82	8,43	7,11	14,64	13,07
Anual	1,00	12,53	178,15	168,64	122,65	118,12
Serie completa	1,00	3,48	14,55	13,86	37,16	35,51

El análisis para temperaturas mínimas y máximas, indica que CR2MET presenta un sesgo frío para la zona de estudio, siendo éste de 1,6 °C para temperaturas mínimas a nivel anual y 1,3 °C para temperaturas máximas. Por otra parte, se puede ver que, para las series completas, las desviaciones estándar para temperaturas mínimas/máximas de observaciones y producto grillado CR2MET, muestran que ambas series presentan una dispersión comparable, superando en 0,11 °C la desviación estándar de observaciones en comparación a CR2MET para temperaturas mínimas, y siendo inferior en 0,33 °C para temperaturas máximas. Finalmente, según el RMSE de temperaturas mínimas/máximas para las series completas, se puede extraer nuevamente que, el nivel de dispersión de valores residuales no es significativo.

Tabla 4-3: Cuadro resumen de métricas estadísticas calculadas para temperatura mínima CR2MET v1.3 y temperatura mínima en estación Cogotí embalse, disponible en el Explorador Climático (<https://explorador.cr2.cl/>). El análisis se obtiene a nivel mensual, estacional, anual y para la serie completa.

Periodo	r (-)	RMSE (°C)	PromObs (°C)	PromSim (°C)	StdObs (°C)	StdSim (°C)
Abr	1,00	1,69	11,19	9,50	1,32	1,24
May	1,00	1,39	9,05	7,66	1,47	1,40
Jun	0,95	1,61	7,57	6,06	1,15	1,41
Jul	1,00	1,40	6,81	5,43	0,96	1,21
Ago	0,96	1,38	7,53	6,20	1,05	1,25

Periodo	r (-)	RMSE (°C)	PromObs (°C)	PromSim (°C)	StdObs (°C)	StdSim (°C)
Sep	1,00	1,44	8,49	7,07	1,38	1,26
Oct	1,00	1,76	10,19	8,43	1,11	1,15
Nov	1,00	1,96	11,82	9,86	1,09	1,00
Dic	1,00	2,15	13,76	11,57	1,16	1,07
Ene	1,00	1,50	14,78	13,27	0,96	0,92
Feb	1,00	1,63	14,57	12,94	1,00	1,02
Mar	1,00	1,78	13,67	11,88	1,12	1,11
Abr-Sep	1,00	1,48	8,52	7,04	0,70	0,76
Oct-Mar	1,00	1,79	13,15	11,36	0,87	0,84
Anual	1,00	1,63	10,81	9,17	0,57	0,58
Serie completa	1,00	1,66	10,77	9,14	3,02	2,91

Tabla 4-4: Cuadro resumen de métricas estadísticas calculadas para temperatura máxima CR2MET v1.3 y temperatura máxima en estación Cogotí embalse, disponible en el Explorador Climático (<https://explorador.cr2.cl/>). El análisis se obtiene a nivel mensual, estacional, anual y para la serie completa.

Periodo	r (-)	RMSE (°C)	PromObs (°C)	PromSim (°C)	StdObs (°C)	StdSim (°C)
Abr	1,00	1,33	24,71	23,39	1,32	1,22
May	1,00	1,72	22,03	20,33	1,82	1,56
Jun	1,00	1,44	19,62	18,26	2,20	1,99
Jul	1,00	1,63	18,80	17,17	1,58	1,53
Ago	0,99	1,76	20,33	18,59	1,37	1,34
Sep	1,00	1,73	21,86	20,11	1,88	1,70
Oct	1,00	1,70	24,29	22,60	1,20	1,23
Nov	0,98	1,52	26,04	24,54	1,16	1,11
Dic	1,00	1,24	27,62	26,38	0,87	0,97
Ene	1,00	0,47	28,39	27,93	0,95	1,04
Feb	1,00	0,41	28,29	27,89	0,90	1,01
Mar	1,00	0,75	27,21	26,47	0,94	1,03
Abr-Sep	1,00	1,59	21,28	19,69	0,97	0,89
Oct-Mar	1,00	1,01	26,97	25,96	0,67	0,71
Anual	1,00	1,30	24,10	22,80	0,66	0,64
Serie completa	0,99	1,39	24,09	22,80	3,62	3,95

4.3.3 Escalamiento estadístico y corrección de sesgo por URH

Dada la baja resolución que presentan los GCMs resulta necesario efectuar un proceso de escalamiento orientado a mejorar la representación espacio-temporal de los patrones meteorológicos a escala local. De este modo, se lleva a cabo un escalamiento estadístico para el GCM, el cual se replica para el RCM con el fin de compatibilizar la resolución espacial de ambos modelos respecto a la resolución de CR2MET (0,05° latitud-longitud). Para ello, en primer lugar, se realiza una interpolación bilineal y, posteriormente, una corrección de sesgo utilizando el método *Multivariate Quantile Mapping Bias Correction* o MBCn (Cannon, 2018). Lo anterior permite escalar de forma estadística y multivariada a ambos modelos, manteniendo la relación y/o codependencia existente entre precipitación y temperatura (Dionizis et al., 2021) en el dominio de cada URH que compone la zona de estudio.

Para el caso de la precipitación, se calculan trazas móviles por mes tanto para el GCM como para el RCM, reemplazando con valores nulos los datos de precipitación menores o iguales al valor traza encontrado en cada caso. Lo anterior busca eliminar aquellos valores de precipitación que no aportan una acumulación significativa, ajustando así la cantidad de días con precipitación de las series simuladas a la cantidad de días con precipitación de la serie del producto grillado CR2MET.

Para estudiar el desempeño del RCM en la zona de estudio y contrastarlo respecto al GCM, se propone estimar el Valor Agregado (VA) del escalamiento estadístico. Dicho indicador se define a partir de la diferencia entre el valor promedio de una cierta variable X recuperada del GCM y RCM respecto al valor promedio de la referencia que, en este caso, estaría dada por CR2MET. Así, en términos matemático el Valor Agregado se define según la siguiente expresión:

$$VA = \frac{(X_{GCM} - X_{OBS})^2 - (X_{RCM} - X_{OBS})^2}{Max((X_{GCM} - X_{OBS})^2, (X_{RCM} - X_{OBS})^2)}$$

Donde:

- X_{OBS} : Valor promedio de la variable X observada o de referencia en un determinado periodo.
- X_{GCM} : Valor promedio de la variable X recuperada del GCM en un determinado periodo.
- X_{RCM} : Valor promedio de la variable X recuperada del RCM en un determinado periodo.

En términos de la interpretación del VA, el cual puede adoptar valores entre -1 y 1, se debe tener en consideración que, valores menores a 0 dan cuenta de que no existe un valor agregado en usar un RCM, mientras que valores positivos dan cuenta de un valor agregado del uso de estos datos.

4.4 Modelación Hidrológica

De acuerdo con los objetivos de este trabajo, lo que se desea es estudiar impactos del cambio climático en precipitaciones, recursos hídricos superficiales y sus implicancias en la actividad agrícola de la cuenca del Río Cogotí (Subsistema de la cuenca del Río Limarí). Para este fin se utiliza el modelo Water Evaluation and Planning (WEAP) asociado a la cuenca del río Limarí, elaborado en el marco del estudio “Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca de Limarí” (DGA, 2020c).

4.4.1 Modelo WEAP

El modelo *Water Evaluation And Planning* (WEAP) corresponde a una plataforma creada cerca de la década de los 90 por el *Stockholm Environment Institute*, y se caracteriza por ser una herramienta computacional capaz de simular y trabajar sistemas hidrológicos a nivel de cuenca mediante la integración de un balance entre oferta y demanda hídrica (SEI et al., 2009). Adicionalmente, el modelo permite trabajar mediante una interfaz gráfica flexible y de uso amigable con el usuario, permitiendo elaborar los sistemas hidrológicos que se requieran a través de archivos tipo vector o ráster como capas de fondo para definir el sistema.

Una forma útil para trabajar cuencas de alta montaña, debido a la variabilidad altimétrica, es subdividir la zona de estudio en Unidades de Respuesta Hidrológica (URH), las cuales se delimitan según uso de suelo, orientación o topografía (Aguayo et al., 2016). Para la simulación de escorrentía en las captaciones o *Catchments*, el modelo utiliza el método *Rainfall Runoff – Soil Moisture* o método de humedad del suelo, el cual se esquematiza en la Figura 4-5.

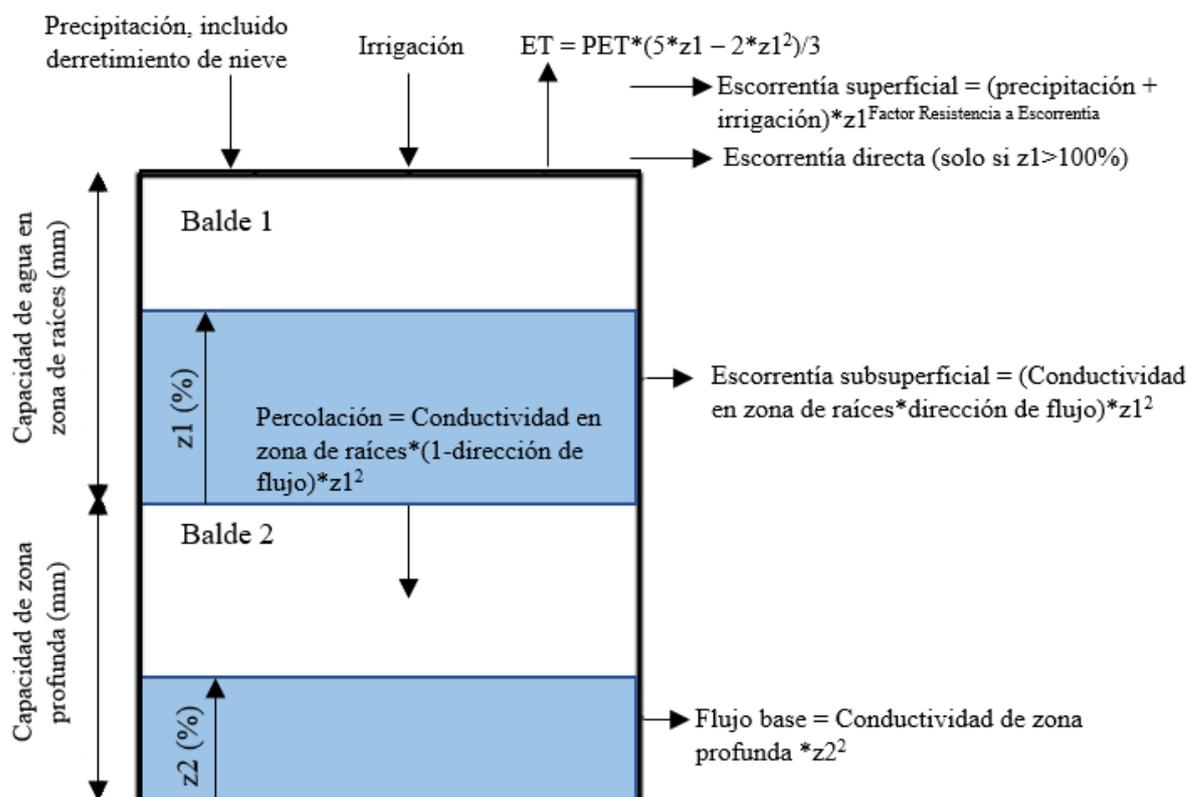


Figura 4-5: Diagrama conceptual del método de humedad de suelo.

Este método se basa en la interacción mediante flujos entre dos estanques o capas de suelo (Figura 4-5). Los flujos se definen mediante variables meteorológicas de entrada y parámetros correspondientes al uso de suelo que establecen la relación entre éste y su humedad (Tabla 4-5).

Tabla 4-5: Lista de parámetros climáticos y de uso de suelo. Fuente: (Danús Del Pedregal, 2018)

Parámetro	Unidad	Descripción
Área	km ²	Área asociada a la captación o URH
Kc	-	Coefficiente de cultivo para cálculo de ET (FAO)
Soil Water Capacity (SWC)	mm	Capacidad de retención de agua de la capa superior
Deep Water Capacity (DWC)	mm	Capacidad de retención de agua de capa profunda
Runoff Resistance Factor (RRF)	-	Factor que controla la escorrentía directa
Root Zone Conductivity (RC)	mm/día	Conductividad hidráulica de capa superior
Deep Conductivity (DC)	mm/día	Conductividad hidráulica de capa profunda
Preferred Flow Direction (PFD)	%	Factor que controla la dirección del flujo de la capa superior (flujo vertical = 0 y flujo horizontal = 1)
Albedo	%	Porcentaje medio de albedo en cada área
Freezing Point (FP)	°C	Temperatura a la cual la nieve comienza a congelarse
Melting Point (MP)	°C	Temperatura a la cual la nieve comienza a derretirse

4.4.2 Configuración del modelo hidrológico

Para la modelación hidrológica se utiliza el modelo WEAP, que corresponde a un modelo computacional para la planificación de recursos hídricos. En términos generales, el modelo realiza un balance de oferta de agua con demanda de agua, siendo la oferta generada mediante módulos físicos de tipo hidrológico a escala de subcuenca y la demanda descrita como un sistema de distribución de variabilidad espacial/temporal que respeta prioridades de demanda y oferta.

Para la modelación hidrológica, se utiliza parte del modelo WEAP desarrollado en el contexto del “Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca de Limarí” (DGA, 2020b). En particular, el

dominio del presente estudio se limita a la cuenca del embalse Cogotí y, por ende, sólo considera la cabecera sur de la cuenca del río Limarí (Ver Figura 4-6).

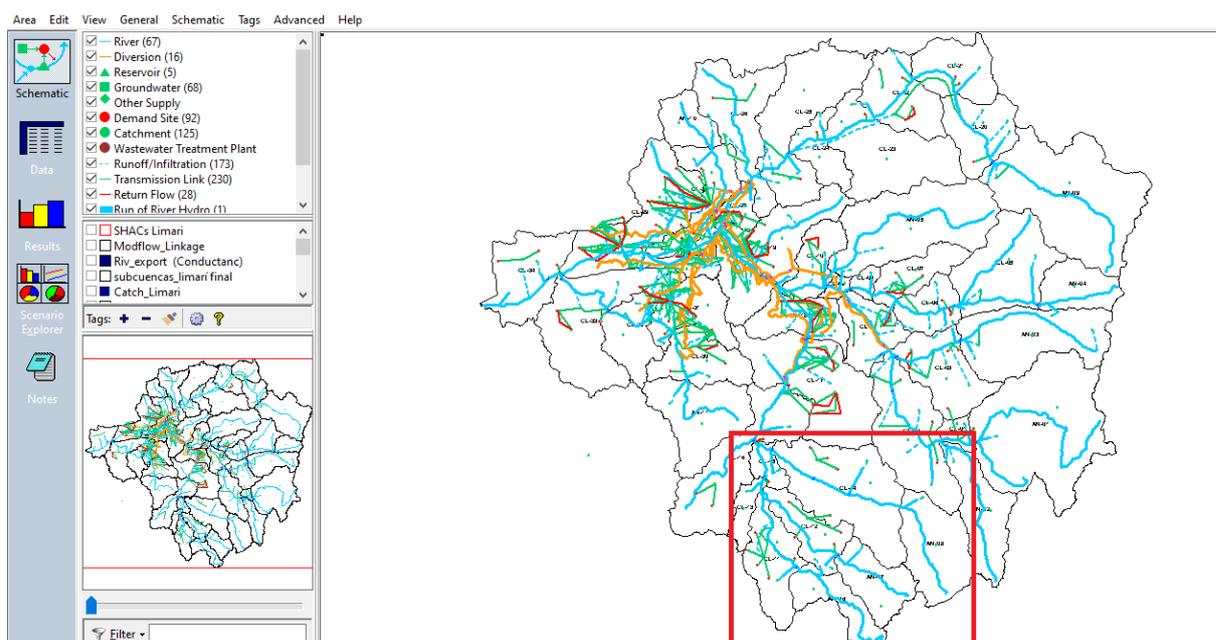


Figura 4-6: Captura de la interfaz gráfica del modelo WEAP de la Cuenca Limarí. Enmarcado en rojo la zona de estudio.

Cabe mencionar que, al simular caudales para el período futuro 2006-2099 con los parámetros calibrados en el contexto del estudio DGA (2020b), se obtienen resultados incoherentes en cuanto al caudal simulado para el río Cogotí (e.g., Cogotí en Fraguita y Cogotí entrada embalse; Figura 4-2). En dicho caso, a partir del año 2060, el modelo no simula escorrentía en dichas cuencas (definidas por los Catchments AN-08 y CL-14), a pesar de estar forzando el sistema con precipitación y obtener flujos y estados asociados a, por ejemplo, flujo base, flujo intermedio, humedad de suelo, profundidad de nieve, entre otros. Para abordar aquel problema, se realizaron diferentes ejercicios de calibración manual, modificando los parámetros Soil Water Capacity, Runoff Resistance Factor, Root Zone Conductivity y Kc (ver Tabla 4-5). No obstante, si bien se recuperó una condición que lograba proyectar las simulaciones hacia el año 2099, esta no lograba replicar el patrón estacional promedio observado en el río Cogotí en el período histórico de referencia (1979-2005). En consecuencia, se decidió mantener los parámetros originales del modelo y acotar el período de modelación hidrológica futura al año 2060.

En cuanto a la extracción de resultados sobre satisfacción de demanda hídrica, el modelo hidrológico incorpora nodos de demanda de tipo superficial y subterráneo. En particular, para efectos de cumplir con los alcances del presente estudio en cuanto a un análisis enfocado en disponibilidad de recursos hídricos superficiales, se trabaja con el modelo en su forma no acoplada, por lo tanto, los nodos de demanda a considerar corresponden únicamente a los de tipo superficial que el modelo incluye. Estos nodos, para la zona de estudio, corresponden a AP_COM01 (consumo en agua potable río Combarbalá), AP_PAM01 (consumo en agua potable río Pama en cabecera), AP_PAM02 (consumo en agua potable río Pama) y ET_AC_COM01 (demanda representativa de evapotranspiración en río Combarbalá). La distribución espacial de los nodos de demanda descritos se puede ver en Figura 4-7.

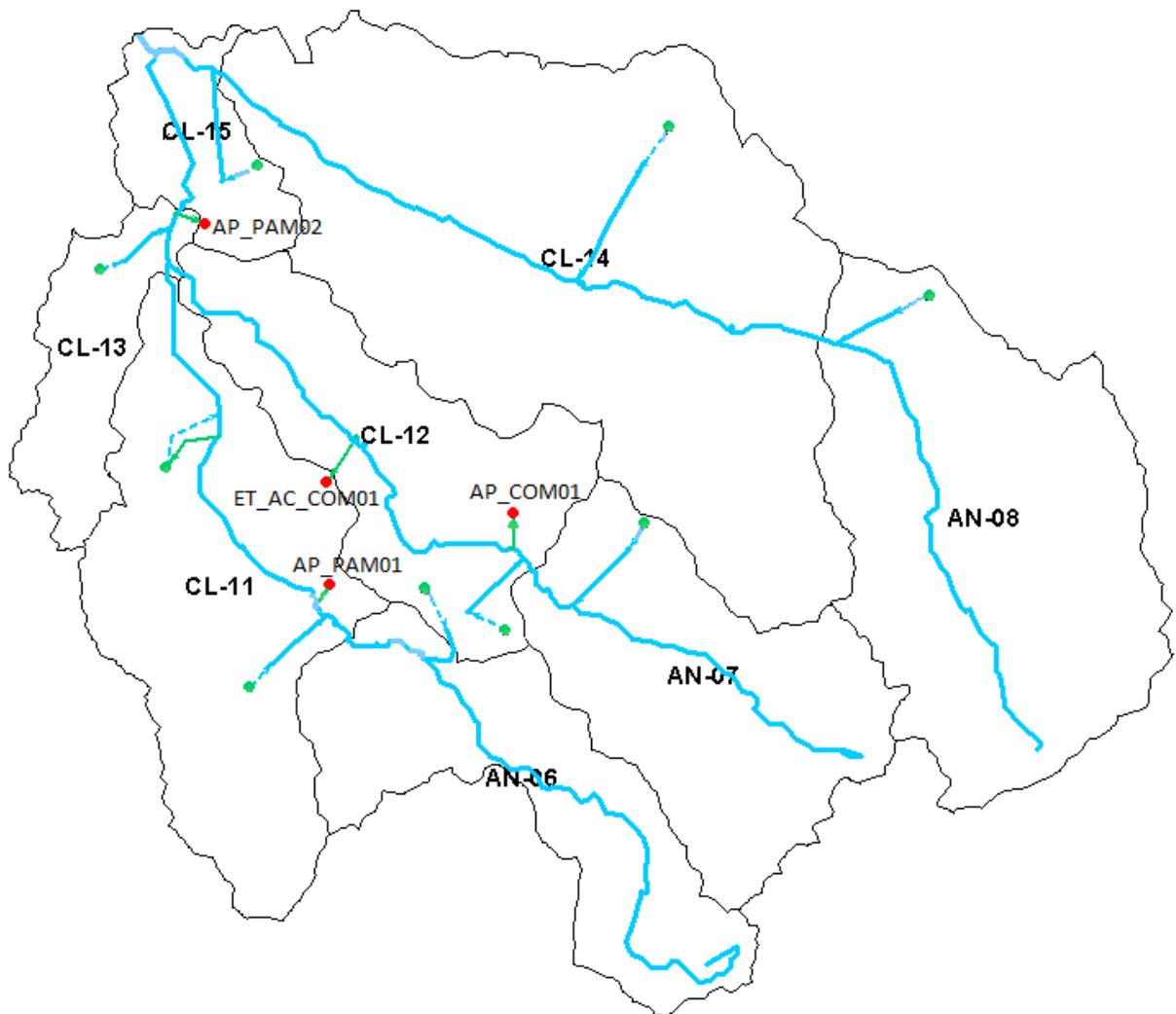


Figura 4-7: Distribución espacial de nodos de demanda superficial (en rojo) para la zona de estudio. En verde las ubicaciones de los Catchment que suministran caudal a los respectivos cauces en el modelo hidrológico.

4.4.3 Incorporación de forzantes meteorológicas

Dentro de los datos climáticos de entrada que permite modificar WEAP, se encuentran precipitación, temperatura, humedad y velocidad del viento. En este caso, para el período histórico, se ingresan las forzantes de precipitación y temperatura obtenidas a escala mensual, conservando los datos de humedad y velocidad del viento con los que el modelo calibrado trabaja por defecto. Para el período futuro, se ingresan los respectivos valores de precipitación mensual y temperatura media mensual de cada modelo, obtenidos del escalamiento estadístico y corrección de sesgo. De forma adicional, se calculan series sintéticas de humedad y velocidad del viento. Este cálculo se lleva a cabo teniendo como referencia las series de humedad y velocidad del viento con las cuales el modelo WEAP trabaja, siendo estas series mensuales para el período 1979-2018. El procedimiento de cálculo consiste en obtener los promedios y desviaciones estándar a nivel mensual, para luego mediante tales valores, sumado a la generación de números aleatorios entre 0 y 1, calcular valores utilizando la inversa de una distribución normal de probabilidades.

4.4.4 Evaluación del desempeño del modelo WEAP-Cogotí

Para evaluar el desempeño del modelo en la simulación del comportamiento de la cuenca, existen distintos índices de eficiencia que comparan las simulaciones con las observaciones. Los índices de eficiencia utilizados en esta investigación se muestran en Tabla 4-6:

Tabla 4-6: Índices de eficiencia utilizados para evaluar el modelo hidrológico.

Índice de eficiencia	Ecuación	Valor óptimo
KGE (Kling-Gupta Efficiency)	$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$ $\alpha = \sigma_s / \sigma_o$ $\beta = \mu_s / \mu_o$	1
NSE (Nash-Sutcliffe 1970)	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$	1
Coefficiente de determinación (R^2)	$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}} \right)^2$	1

Donde r =coef. de correlación de Pearson entre caudales simulados y observados, σ_s =desviación estándar de caudales simulados, σ_o = desviación estándar de caudales observados, μ_s =caudales medios simulados, μ_o = caudales medios observados, S_i =valor simulado para la variable en un tiempo $t = t_i$ y O_i = valor observado para la variable en $t = t_i$.

Por otra parte, para complementar el análisis del desempeño del modelo hidrológico se propone estimar algunos índices hidrológicos derivados de la curva de duración. Así, se recurre a los índices descritos en Tabla 4-7, los cuales permiten estimar el sesgo en diferentes segmentos de la curva de duración como, por ejemplo, segmentos asociados a flujos altos (BiasFHV), medios (BiasFMS) y bajos (BiasFLV) (Yilmaz et al., 2008). Adicionalmente, se calcula el coeficiente de correlación de Pearson asociado al patrón de variación estacional promedio del caudal medio mensual asociado a cada cuenca de interés con control fluviométrico.

Tabla 4-7: Índices hidrológicos derivados de la curva de duración.

Índice	Ecuación
BiasFMS	$\%BiasFMS = \frac{[\log(QS_{m1}) - \log(Q_{m2})] - [\log(QO_{m1}) - \log(Q_{m2})]}{[\log(QO_{m1}) - \log(QO_{m2})]} \times 100$
BiasFHV	$\%BiasFHV = \frac{\sum_{h=1}^H (QS_h - QO_h)}{\sum_{h=1}^H QO_h} \times 100$
BiasFLV	$\%BiasFLV = -1 \cdot \frac{\sum_{l=1}^L [\log(QS_l) - \log(QS_L)] - \sum_{l=1}^L [\log(QO_l) - \log(QO_L)]}{\sum_{l=1}^L [\log(QO_l) - \log(QO_L)]} \times 100$
BiasFMM	$\%BiasFMM = \frac{\log(QS_{med}) - \log(QO_{med})}{\log(QO_{med})} \times 100$

De este modo, se evalúa el desempeño de la modelación hidrológica para el período histórico 1990-2005 en las cuencas Cogotí en Fragueta, Cogotí entrada embalse y Combarbalá en Ramadillas. A modo de ejemplo, la Figura 4-8 muestra los resultados obtenidos para Cogotí en Fragueta, donde se reporta el mejor ajuste ($KGE > 0,8$), superando ampliamente los valores obtenidos para las demás estaciones ($KGE = 0,55$ en Cogotí entrada embalse; $KGE = 0,49$ en Combarbalá en Ramadillas). De forma análoga, la correlación e índice NSE para Cogotí en Fragueta, supera lo obtenido para Cogotí entrada embalse y Combarbalá en Ramadillas, siendo esta última, la estación con el ajuste más desfavorable ($NSE = 0,63$; $r = 0,85$). De manera complementaria, la Tabla 4-8 muestra los resultados obtenidos para los índices hidrológicos derivados de la curva de duración en

las tres cuencas evaluadas. Allí se mantienen los buenos resultados reportados para Cogotí en Fraguita y resulta curioso notar que, si bien para las otras cuencas existen sesgos considerables en algunos casos (e.g., BiasFHV en Cogotí Embalse igual a 103%; BiasFMM en Combarbalá en Ramadillas igual a 111%), la pendiente de la curva de duración (i.e., tiempo de la respuesta a largo plazo de la cuenca) estaría bien representada en todos los casos (sesgos absolutos menores al 1%).

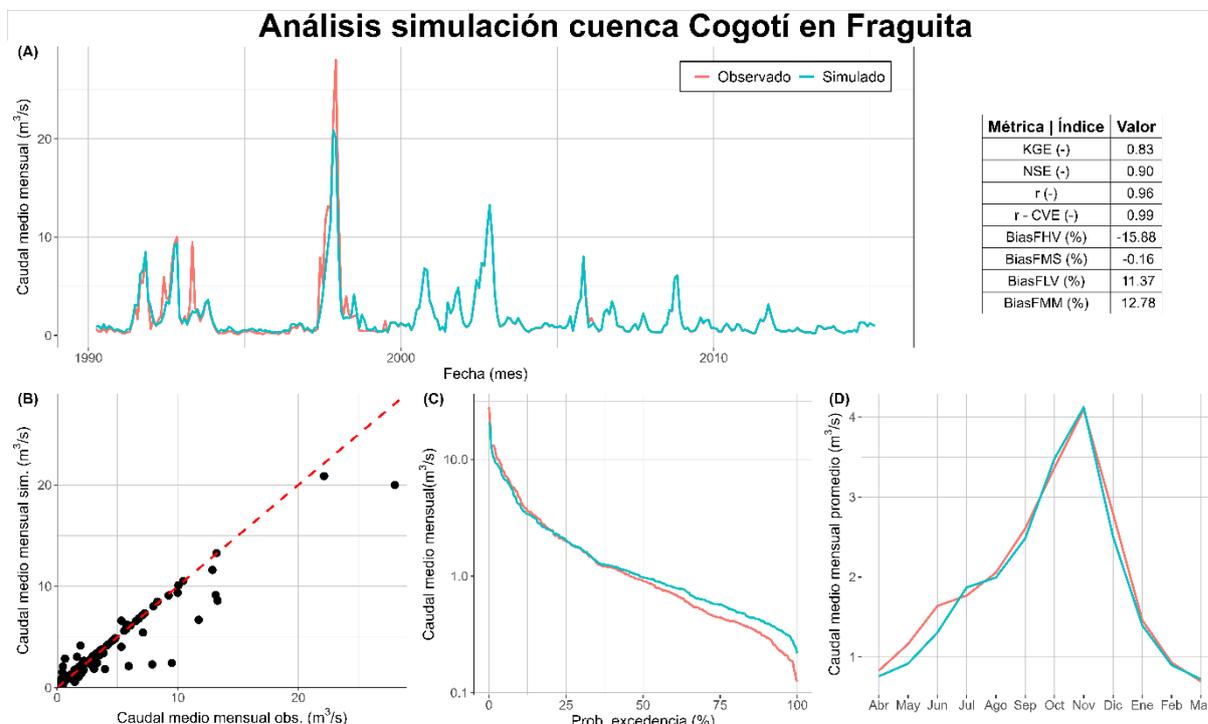


Figura 4-8: Resumen del desempeño de la modelación hidrológica asociada a la cuenca Cogotí en Fraguita.

Tabla 4-8: Resumen de índices hidrológicos derivados de la curva de duración de caudal medio anual estimados para las cuencas de interés en el periodo 1990-2005.

	BiasFHV	BiasFMS	BiasFLV	BiasFMM
Cogotí en Fraguita	-15,88	-0,16	11,37	12,78
Cogotí entrada embalse	102,55	-0,52	62,97	381,71
Combarbalá en Ramadillas	-41,38	-0,58	39,13	111,00

4.5 Índices de sequía

Para el análisis de sequías se calculan diferentes índices a partir de la definición de sequía meteorológica, hidrológica y agrícola. Los índices empleados para efectos del presente estudio se definen a continuación.

- *Standardized Precipitation Index* – SPI: Índice que evalúa el número de desviaciones estándar que la precipitación acumulada se desvía del promedio climatológico. Puede calcularse para diferentes períodos de acumulación (1, 2, 3, 6, 9, 12, 24, 36 o 48 meses) (Mckee et al., 1993).
- *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* – SPEI: Extensión del SPI, cuya modificación consiste en incluir tanto precipitación como evapotranspiración potencial. A diferencia evapotranspiración potencial. A diferencia del SPI, el SPEI captura el impacto del aumento de temperaturas sobre la demanda de agua, y puede calcularse para un rango de escalas de tiempo de 1 a 48 meses (Araneda-Cabrera et al., 2022).

- *Standardized Runoff Index* – SRI: Basado en la estandarización de la serie temporal de caudales en un punto de control de un río. Su cálculo sigue el mismo procedimiento matemático del SPI (Araneda-Cabrera et al., 2022).
- *Standardized Soil Index* - SSI: Índice que estudia la anomalía en cuanto a humedad para distintas capas de suelo (Sam et al., 2019).
- *Standardized Base Flow Index* – SBFI: Índice que calcula la anomalía en cuanto a flujo base presente en un cauce (Kelly et al., 2019).

Para clasificar las condiciones de sequía/superávit, se proponen los valores definidos en Tabla 4-9, los cuales se basan en el trabajo de Hao et al. (2013).

Tabla 4-9: Clasificación de sequía o superávit según el valor del índice estandarizado.

Condición	Tipo	Valor Índices
Superávit	Excepcional	$\geq 2,0$
	Extremo	1,60 a 1,99
	Severo	1,30 a 1,59
	Moderado	0,80 a 1,29
	Normal	0,50 a 0,79
Normal	-	-0,50 a 0,50
Sequía	Normal	-0,79 a -0,50
	Moderado	-1,29 a -0,80
	Severa	-1,59 a -1,30
	Extrema	-1,99 a -1,60
	Excepcional	$\leq -2,0$

Cabe mencionar que, salvo el SPEI, los índices empleados mantienen la formulación del índice estandarizado de precipitación (SPI por sus siglas en inglés) y se implementan a través del paquete SPEI (Beguería et al., 2017) en el programa de libre acceso y código abierto R (<https://www.r-project.org/>). El cálculo de estos índices se basa, a grandes rasgos, en ajustar una función de densidad de probabilidad gama de dos parámetros y luego aplicar la inversa de una distribución normal a dichos valores para el caso del SPI (Farahmand & AghaKouchak, 2015), mientras que para el SPEI se ajusta una función log-logística. En cuanto a los parámetros asociados a las distribuciones de probabilidad, estos se estiman mediante el método de máxima verosimilitud implementado internamente en el paquete SPEI.

5 RESULTADOS

En el presente capítulo se exponen los resultados de Valor Agregado (VA) para el escalamiento estadístico de precipitación y temperatura media en el período histórico para el GCM y RCM. Seguido a esto, se presentan los resultados obtenidos de la modelación hidrológica en WEAP, para finalmente incluir un análisis en cuanto a proyecciones de sequía meteorológica, hidrológica y agrícola en la zona de estudio.

5.1 Análisis del Valor Agregado del uso de un RCM respecto a GCM

En Figura 5-1 se puede ver el resultado de valor agregado al utilizar el RCM versus el GCM en sus versiones crudas y corregidas para la estimación de precipitación y temperatura media. Para precipitación promedio se obtiene que, a nivel anual, el RCM no agrega valor en su estado crudo, a diferencia del caso escalado y corregido, donde se observa que para las URH 6, 11, 13 y 15 (ver Figura 4-2), el modelo sí aporta valor. En cuanto a la estimación de temperatura media, se puede ver que, en su versión cruda, el RCM aporta valor en las URH 6, 7, 11 y 15, sin embargo, para el caso corregido, se observa un aporte de valor en la totalidad de la cuenca. Pese a lo anterior, considerando que el valor agregado en el caso corregido reporta valores en torno a cero, se puede decir que, en términos de la climatología promedio en el periodo histórico, tanto para la estimación de precipitación como de temperatura media, ambos modelos corregidos son comparables (i.e., ninguno predomina sobre el otro). Sin perjuicio de lo anterior, se debe tener en consideración que podrían existir otras características y/o propiedades estadísticas que se pierden o suavizan al evaluar a nivel climatológico el valor agregado del RCM respecto al GCM (e.g., frecuencia de meses/años secos, probabilidad de un año seco/normal/húmedo dado un año anterior diferente, etc.).

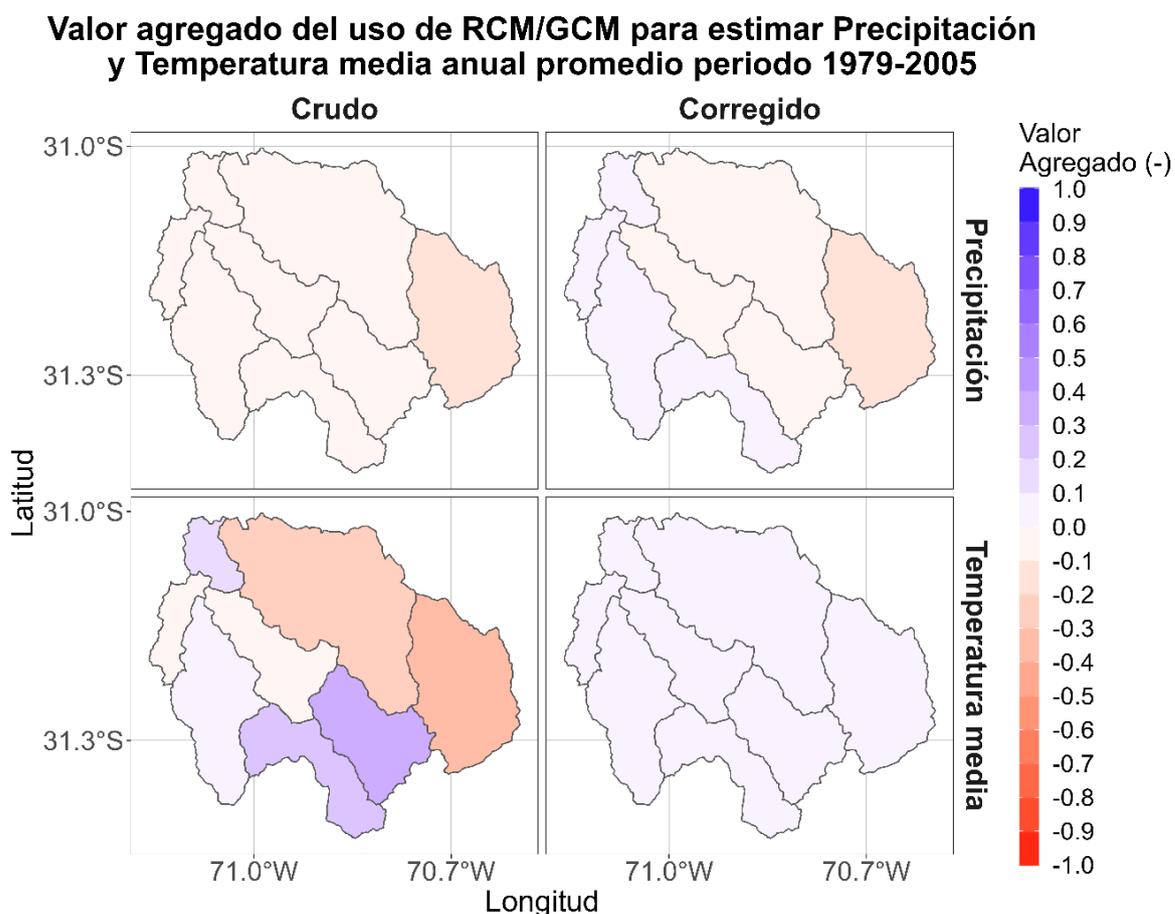


Figura 5-1: Valor agregado del uso del RCM versus GCM para la estimación de precipitación y temperatura media anual promedio en el período 1979-2005. Valores entre 0 y 1 indican que RCM aporta valor. Valores entre 0 y -1 indican que RCM no aporta valor.

5.2 Proyecciones futuras de cambio climático e hidrológico período 2030-2060

Para el período futuro, con el objetivo de trabajar con períodos de tiempo estadísticamente comparables respecto a la referencia definida en el período histórico 1985-2015, se trabaja con series de precipitación y temperatura media para el período 2030-2060. A continuación, se presentan las proyecciones climáticas de precipitación y temperatura media derivadas de la corrección mediante escalamiento estadístico del GCM y RCM, junto a proyecciones de cambio hidrológico y un análisis de satisfacción de demanda hídrica tanto para el modelo regional como para el modelo global.

5.2.1 Proyecciones climáticas

En Figura 5-2, la proyección de cambio futuro de precipitación anual promedio para el período 2030-2060, indica que el RCM proyecta cambios más severos en términos de variación en precipitación en la totalidad de la cuenca respecto al GCM, donde la mayor disminución promedio en el período corresponde a 1,7%. El RCM indica que, en zonas bajas de la cuenca, existe una disminución en la precipitación anual cercana al 20%, mientras que, en zonas altas, se proyecta un incremento del 3%. En términos generales, se observa que el RCM acentúa las proyecciones de cambio futuro en precipitación anual a nivel de cuenca, proyectando una disminución más severa en la zona baja de la cuenca.

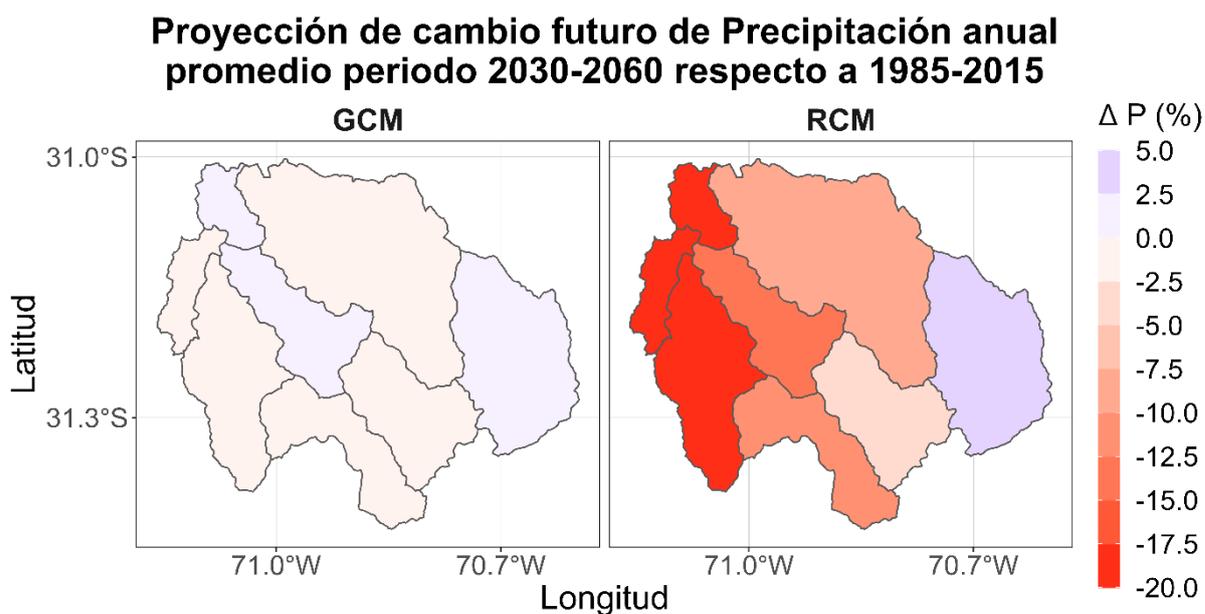


Figura 5-2: Proyección de cambio futuro de precipitación anual promedio para la cuenca en el período 2030-2060 respecto al período 1985-2015.

La proyección de cambio futuro para temperatura media anual promedio se puede ver en la Figura 5-3, donde se observa que, a diferencia del GCM, el RCM acentúa de forma más “localizada” las proyecciones de cambio, indicando que, para parte de la zona media de la cuenca, el alza en temperatura media anual proyectada para el período 2030-2060 respecto a 1985-2015 alcanza los 1,9 °C. Este valor supera por poco en magnitud las proyecciones de cambio futuro que reporta el GCM, donde la proyección de cambio apunta a un aumento de 1,8°C en parte de la zona alta de la cuenca. Sumado a esto, los resultados indican que, para el GCM, el rango de variación en temperatura media anual va entre 1,1°C y 1,8°C, a diferencia del RCM, donde se presenta un rango de variación que va desde 0,5°C a 1,9°C.

Proyección de cambio futuro de Temperatura media anual promedio periodo 2030-2060 respecto a 1985-2015

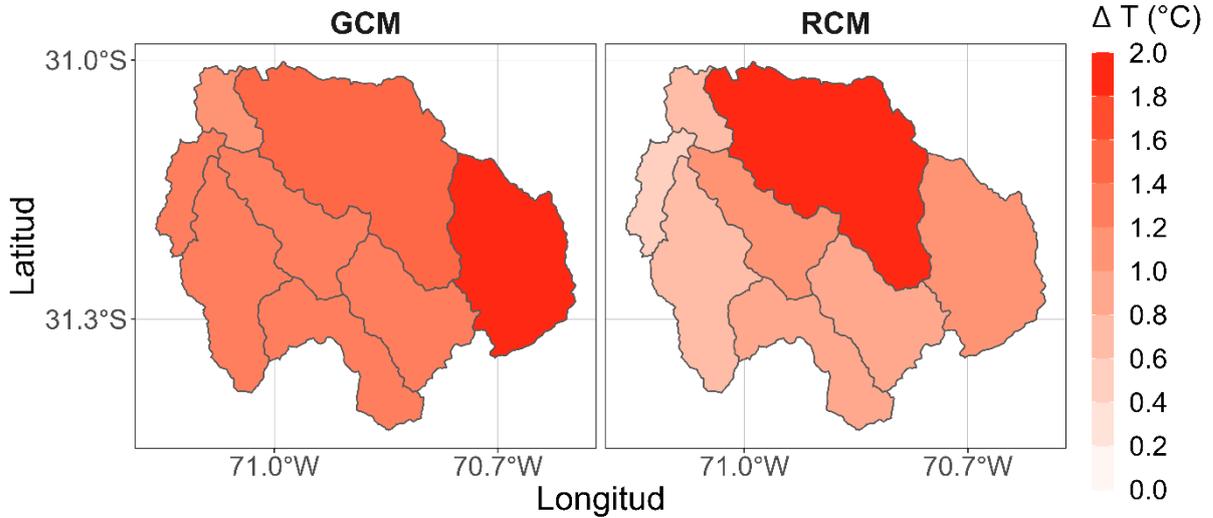


Figura 5-3: Proyección de cambio futuro de temperatura media anual promedio para la cuenca en el período 2030-2060 respecto al período 1985-2015.

En Figura 5-3 y Figura 5-4 se muestra la proyección de cambio anual promedio de precipitación y temperatura media para el período 2030-2060 respecto al periodo 1985-2015. De allí se desprende que, a nivel promedio de cuenca, el GCM no reporta un cambio porcentual de gran magnitud en cuanto a disminución de precipitaciones, a diferencia del RCM, el cual registra una disminución de 11 mm o 7,5% (Figura 5-4). Para el caso de temperatura media, la proyección de cambio anual promedio en el GCM a nivel de cuenca corresponde a un aumento cercano a 1,5°C, mientras que, para el RCM, el aumento promedio es de 1,2 °C.

Proyección de cambio anual promedio periodo 2030-2060 respecto al periodo 1985-2015

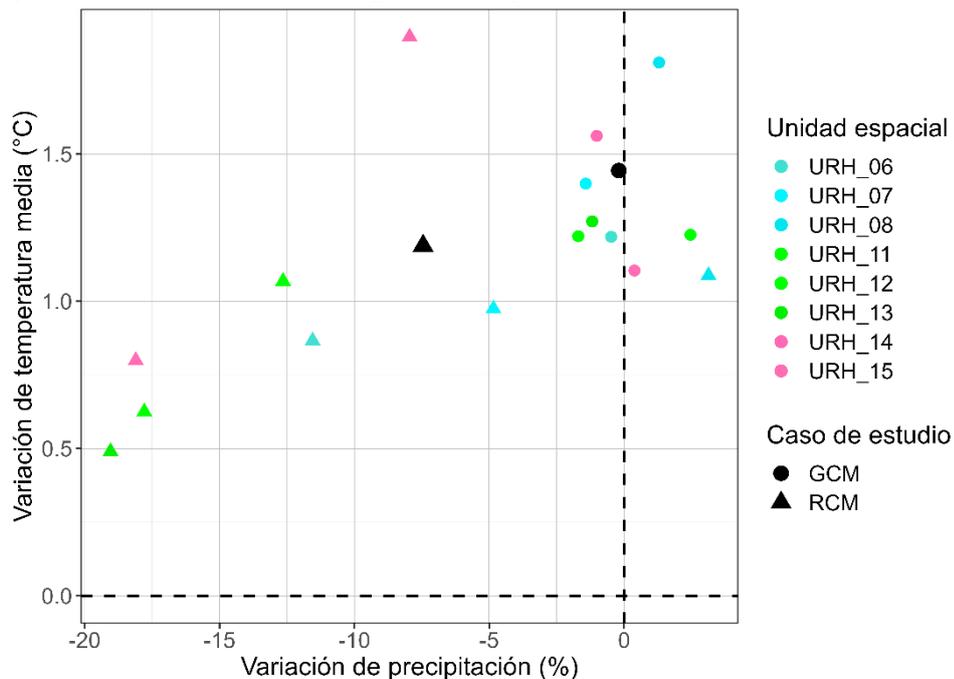


Figura 5-4: Proyección de cambio anual promedio para precipitación (%) y temperatura media (°C) para el período 2030-2060 respecto al período 1985-2015. En caso de estudio, los círculos y triángulos negros hacen referencia al promedio a nivel de cuenca en cada caso. En Unidad espacial, los colores indican la clasificación de URHs pertenecientes a zonas altas (celeste), medias (verde) y bajas (rosado) de la cuenca.

En cuanto a las proyecciones de cambio mensual en la temperatura media, en Figura 5-5 se puede ver que, en general, para la totalidad de meses, existe un desplazamiento hacia la derecha de las curvas de probabilidad acumulada (ECDF). Lo anterior se traduce, en términos prácticos, en un aumento en temperaturas medias para el período 2030-2060 respecto a 1985-2015. En particular, para los meses de abril, mayo y junio, el GCM reporta temperaturas más altas para el período 2030-2060 en comparación al RCM. En este sentido, para abril se observa que, para el 50% de probabilidad de excedencia, el período histórico reporta 12,5°C, a diferencia del futuro cercano, donde la temperatura media es cercana a los 15°C. En el caso del RCM, para la misma probabilidad de excedencia, en el período histórico se observan 12°C, mientras que en el 2030-2060 este valor alcanza los 13,2°C.

En general, se puede apreciar que existen meses donde el alza en temperaturas medias tiende a ser menor (septiembre-noviembre). Por otra parte, se puede ver que el RCM tiende a ser más representativo en cuanto a la referencia CR2MET en el período histórico, excepto en agosto y diciembre, donde el RCM presenta un comportamiento más cálido en 0,5°C.

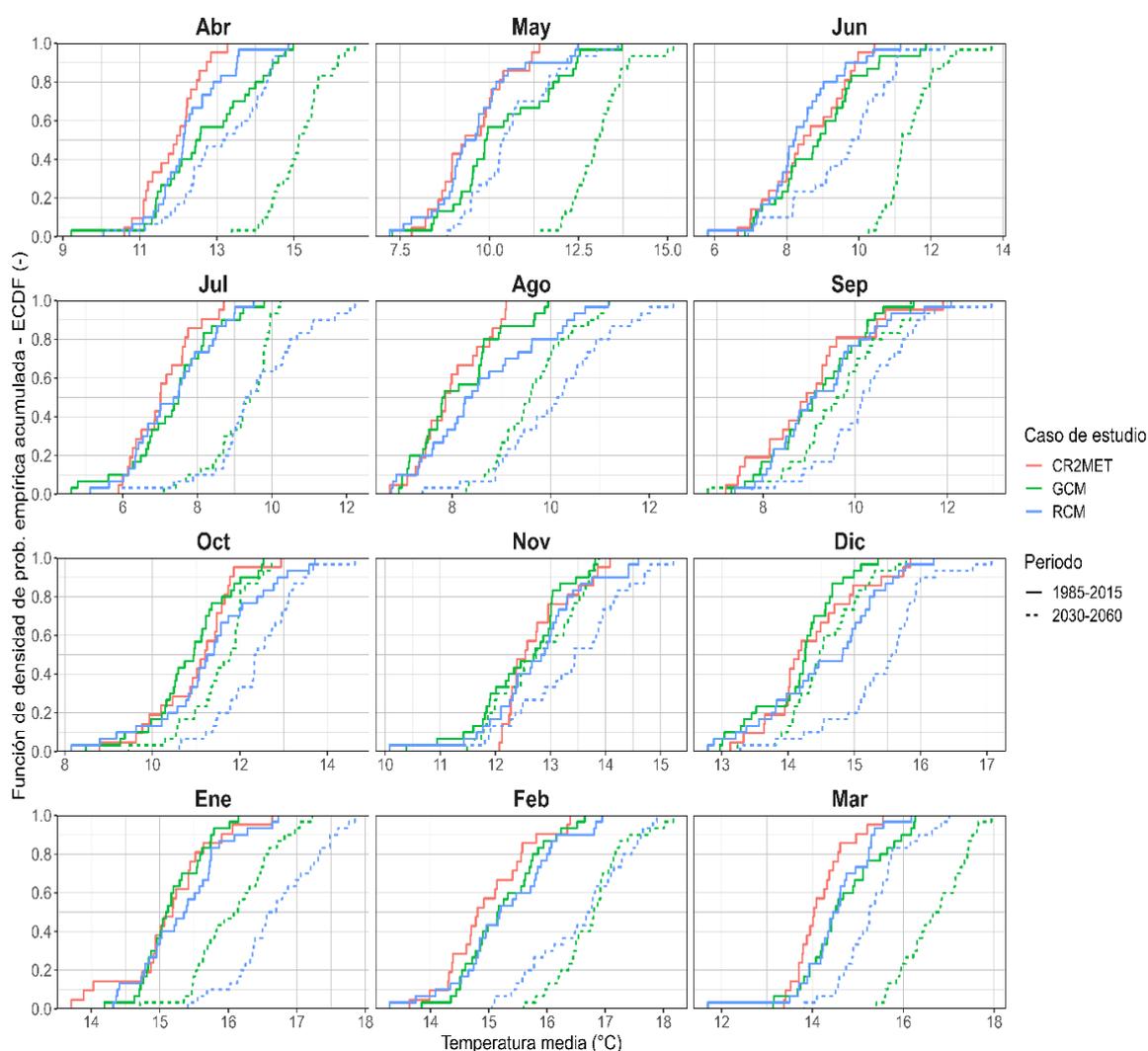


Figura 5-5: Comparativa de curvas ECDF por mes para temperatura media a escala de cuenca entre el período de referencia 1985-2015 y el período futuro cercano 2030-2060.

Para precipitaciones mensuales, las ECDF de Figura 5-6 muestran que, en general, para el periodo histórico éstas tienden a ser mayores para ambos modelos a las que reporta CR2MET, excepto en los meses de junio y agosto. Si bien, dada la aplicación de la corrección de sesgo mediante MBCn por construcción las curvas debiesen converger, se debe considerar que el periodo histórico empleado para la comparación ya incluye parte de proyecciones climáticas futuras (2006-

2015). En consecuencia, la incorporación de este periodo que no está forzado a tener un comportamiento estadístico cercano a la referencia puede sesgar la comparación, más aun teniendo en cuenta el periodo seco que ha marcado la última década en Chile central. Respecto al periodo futuro 2030-2060, en general, las precipitaciones proyectadas son menores, excepto en los mismos meses ya señalados (i.e., junio y agosto).

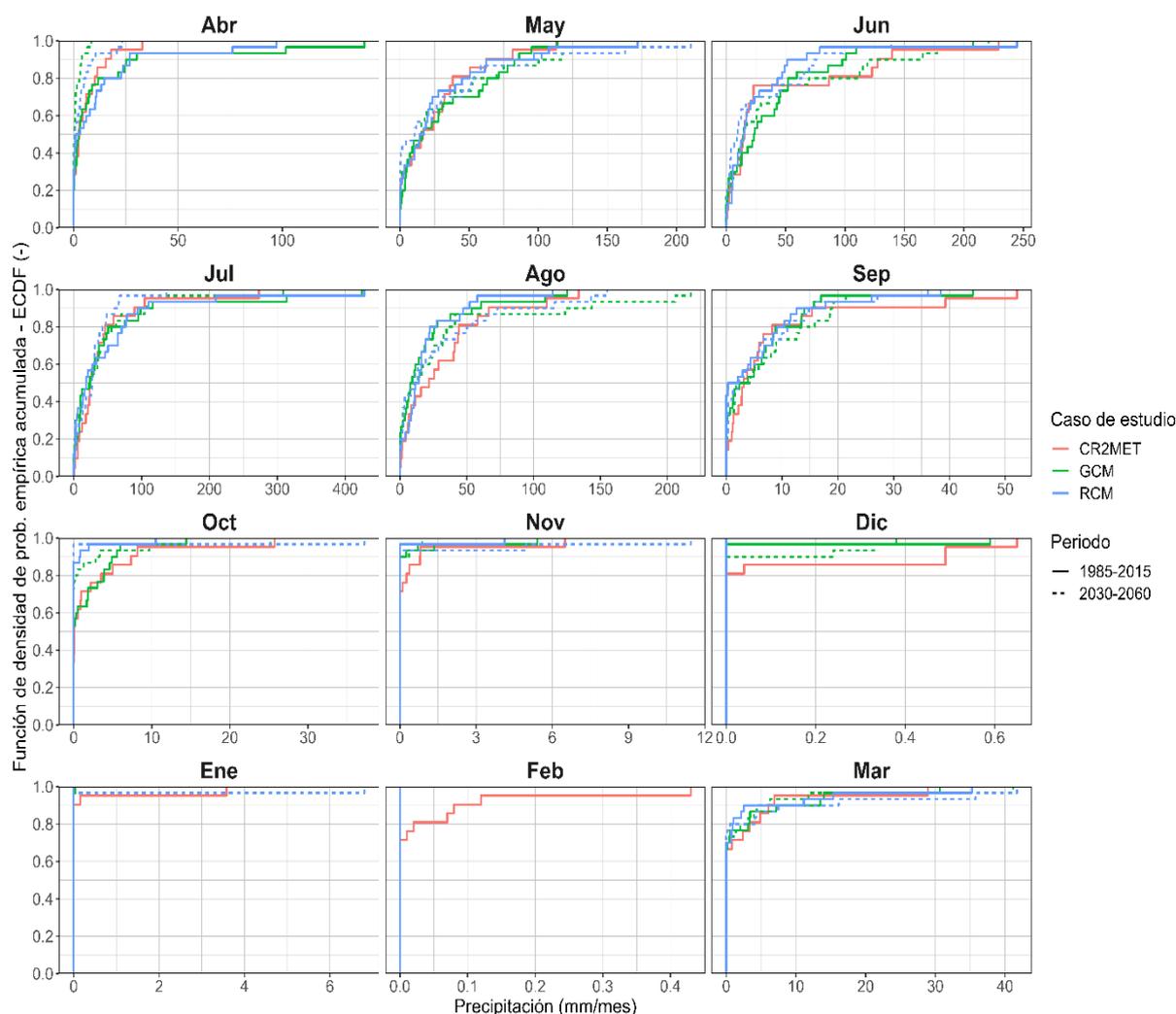


Figura 5-6: Comparativa de curvas ECDF por mes para precipitación a escala de cuenca entre el período de referencia 1985-2015 y el período futuro cercano 2030-2060.

5.2.2 Proyecciones de cambio hidrológico

Los resultados de la modelación hidrológica se resumen en las curvas de variación estacional (CVE) y curvas de duración (CD) de caudal medio mensual por cuenca controlada que se presenta en Figura 5-7 y Figura 5-8 respectivamente. Tanto para CVE como para CD, las proyecciones de cambio hidrológico se realizan hacia el período futuro 2030-2060, tomando como referencia la serie de tiempo 1985-2015.

En Figura 5-7 se puede ver que, tanto para Cogotí entrada embalse, como para Cogotí en Fraguita, para el período de referencia, las CVE del GCM y RCM se ajustan de buena forma a la estacionalidad descrita por CR2MET. Para Combarbalá en Ramadillas y Pama en Valle Hermoso, si bien el comportamiento de la estacionalidad del GCM y RCM respetan lo señalado por CR2MET, se puede notar que el RCM se ajusta de mejor forma a la CVE descrita por CR2MET (Tabla 5-1), sobre todo entre los meses de noviembre a marzo. Por otra parte, al analizar las CVE del período 2030-2060, se observa que para Cogotí entrada embalse existe un desplazamiento de la

estacionalidad en la cuenca, donde el máximo caudal medio mensual ocurre entre los meses de abril y julio, alcanzando un valor máximo de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, a diferencia del período de referencia, donde el máximo caudal medio mensual ocurre en el mes de noviembre alcanzando un valor de $4 \text{ m}^3/\text{s}$. De forma análoga, para Cogotí en Fraguita se desplaza la estacionalidad e incrementa el caudal medio mensual máximo en $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. En cuanto a Combarbalá en Ramadillas y Pama en Valle Hermoso, se puede ver un cambio más notorio en la estacionalidad proyectada por el GCM, lo cual se puede atribuir al aumento de temperatura que el GCM reporta en las URHs asociadas a dichas cuencas, el cual es mayor en términos de magnitud a lo reportado por el RCM.

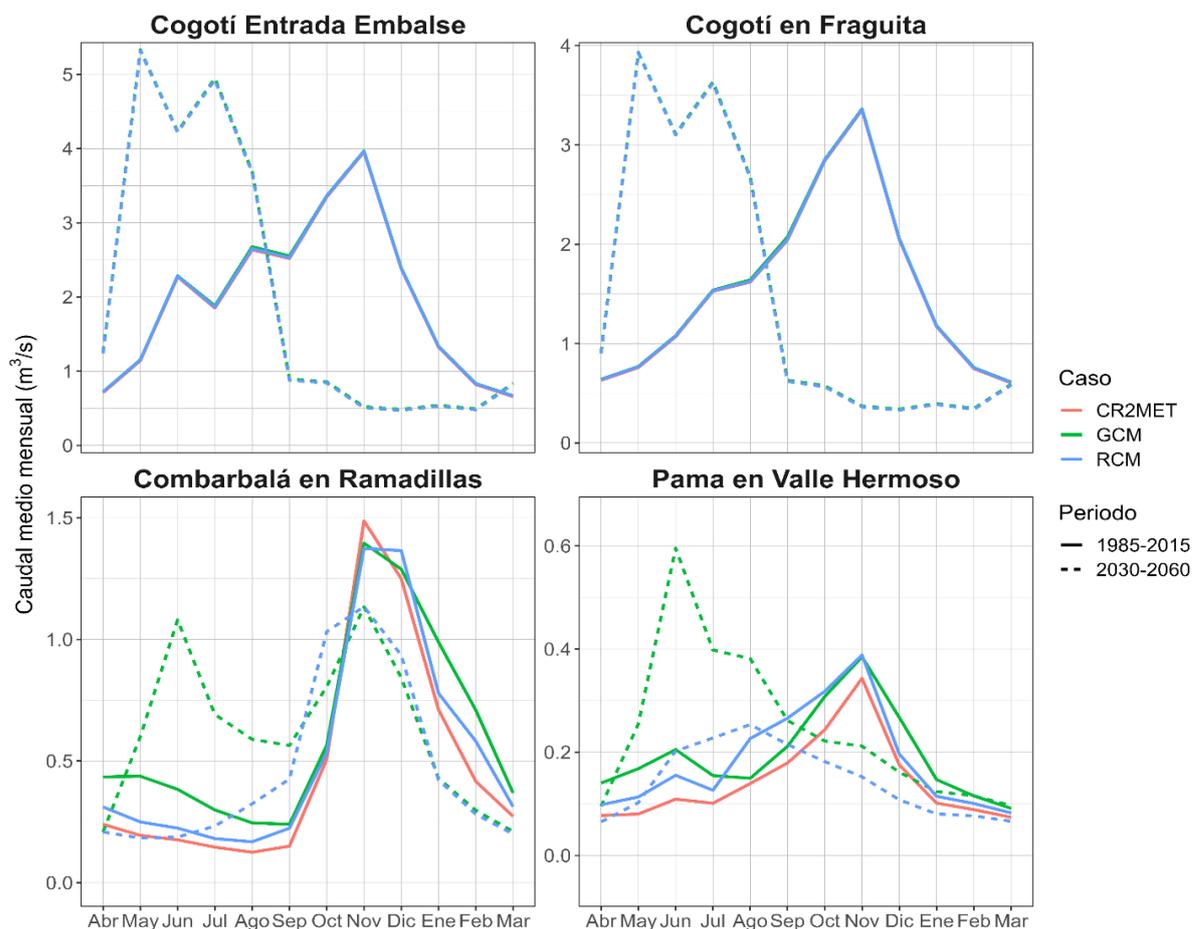


Figura 5-7: Curvas de variación estacional en el período de referencia 1985-2015 y en el período proyectado 2030-2060, para las cuencas Cogotí entrada embalse, Cogotí en Fraguita, Combarbalá en Ramadillas y Pama en Valle Hermoso.

Tabla 5-1: Evaluación de desempeño del GCM y RCM en la modelación hidrológica del periodo histórico 1985-2015.

Cuenca	Caso	Sesgo	r
Cogotí Entrada Embalse	GCM	0.95%	1.00
	RCM	0.53%	1.00
	VA	43.56%	92%
Cogotí en Fraguita	GCM	0.85%	1.00
	RCM	0.44%	1.00
	VA	48%	98%
Combarbalá en Ramadillas	GCM	32.86%	0.97
	RCM	15.07%	0.99
	VA	54%	63%
Pama en Valle Hermoso	GCM	36.86%	0.94
	RCM	27.70%	0.97
	VA	25%	42%

Las CD presentadas en Figura 5-8 indican que, hacia el período 2030-2060, tanto para Cogotí entrada embalse como para Cogotí en Fraguita existe un incremento en la magnitud de los caudales bajos (e.g., probabilidad de excedencia mayor al 85%), lo cual no ocurre para las cuencas de Combarbalá en Ramadillas y Pama en Valle Hermoso. En dichas cuencas se observa que, si bien la CD futura no muestra grandes diferencias respecto a la referencia histórica en términos de los caudales bajos, si existen diferencia en los valores con probabilidades de excedencia menores al 50%, los que se acentúan de mayor forma en el GCM.

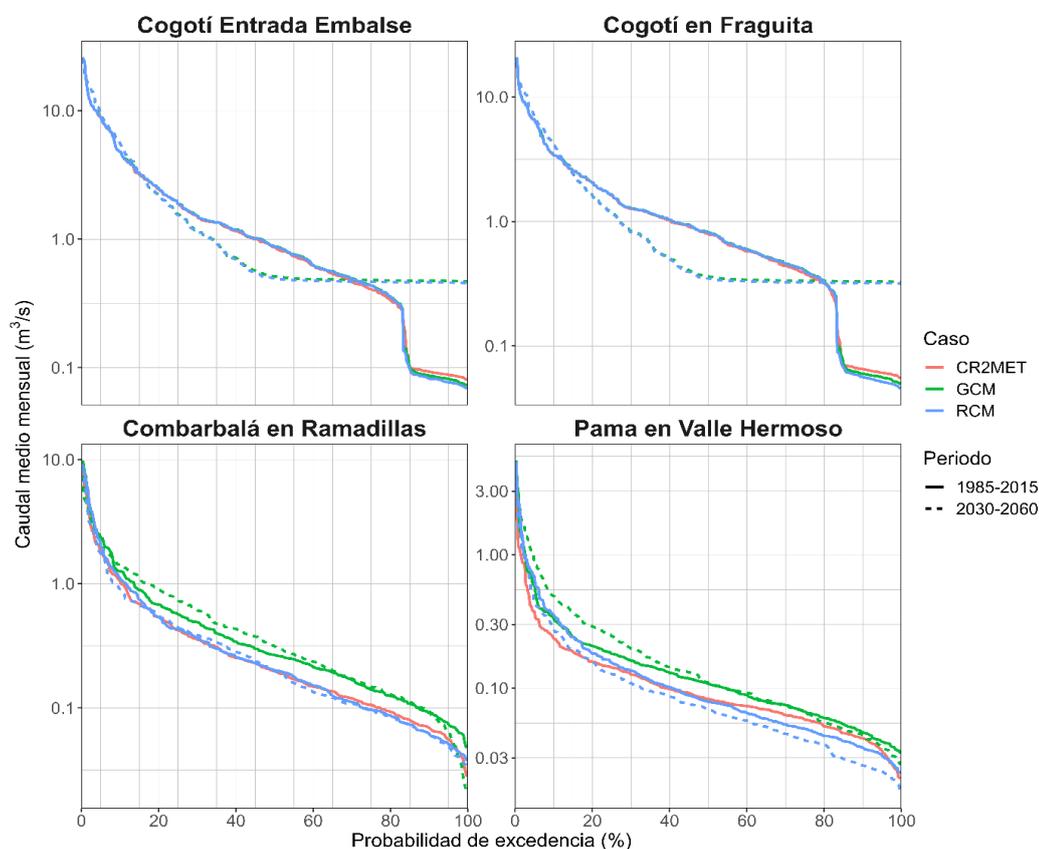


Figura 5-8: Curvas de duración en el período de referencia 1985-2015 y en el período proyectado 2030-2060, para las cuencas Cogotí entrada embalse, Cogotí en Fraguita, Combarbalá en Ramadillas y Pama en Valle Hermoso.

En Figura 5-9 se resume la proyección de cambio para el período 2030-2060 del caudal medio y evapotranspiración real a nivel trimestral, donde los símbolos en negro representan el cambio promedio a nivel de cuenca. En cuanto a los valores en celeste, estos representan URHs pertenecientes a zonas altas de la cuenca, seguido de URHs en zonas medias en verde y URHs en zonas bajas en rosado. Allí se observa que, para el primer trimestre, a escala de cuenca ambos modelos demuestran tener sensibilidad al cambio en evapotranspiración, indicando una disminución de esta variable cercana a 3,5 mm/mes. Además, se observa que sólo el GCM reporta cambios en el caudal medio, aumentando éste en magnitudes cercanas a 0,08 m³/s. Para el segundo trimestre, se puede ver que el RCM no demuestra cambios en caudal medio ni evapotranspiración a escala de cuenca, sin embargo, el GCM indica un aumento en el caudal medio de igual magnitud al ocurrido en el primer trimestre. Sumado a esto, se observa un aumento en evapotranspiración real cercana a 4 mm/mes, lo cual puede explicarse por un aumento del 5% en precipitaciones para tal trimestre (ver Figura 5-10). En el caso del tercer y cuarto trimestre, se observa que tanto GCM como RCM responden con una disminución tanto del caudal medio como de la evapotranspiración real a escala de cuenca, reportando disminuciones de caudal medio cercanas a 0,04 m³/s en ambos trimestres y de evapotranspiración real de 5 mm/mes para el tercer trimestre y de 2,5 mm/mes para el cuarto.

A escala de URH se observa que existe una gran dispersión en torno al valor promedio a escala de cuenca, lo cual da cuenta de la heterogeneidad de la respuesta hidrológica en la zona de

estudio. A modo de ejemplo, para el segundo trimestre se puede ver que, pese a que el RCM no reporta señales de cambio a nivel de cuenca, existen URHs que se alejan de este resultado, tanto para caudal medio como para evapotranspiración real.

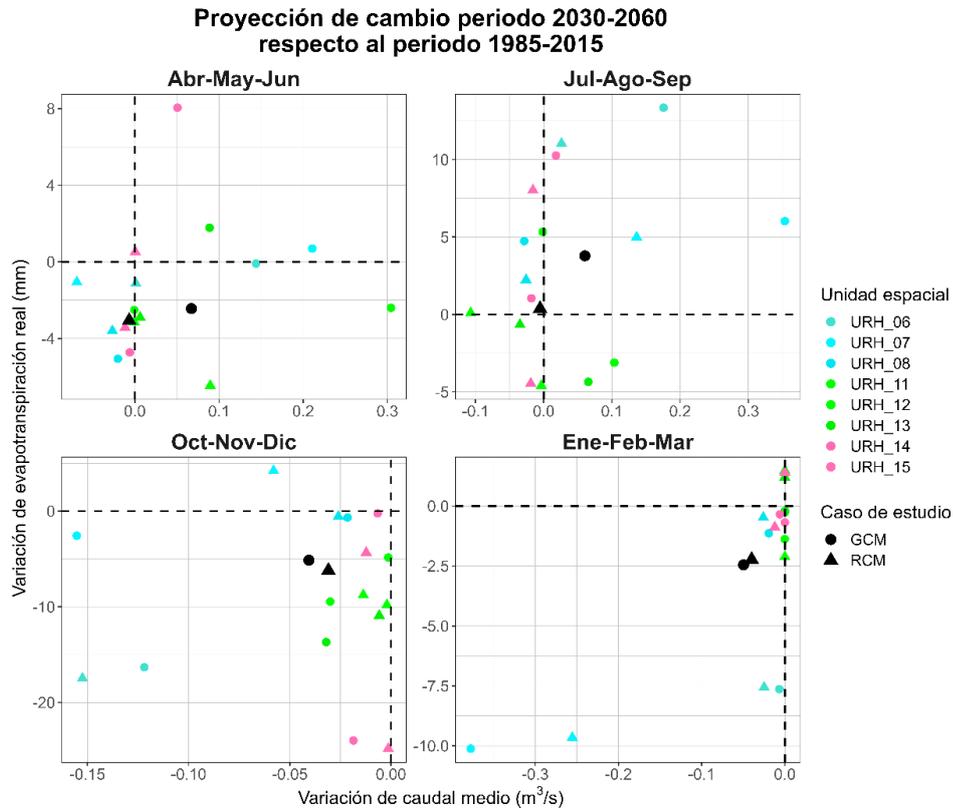


Figura 5-9: Proyecciones de cambio de caudal medio y evapotranspiración real hacia el período 2030-2060 a nivel trimestral.

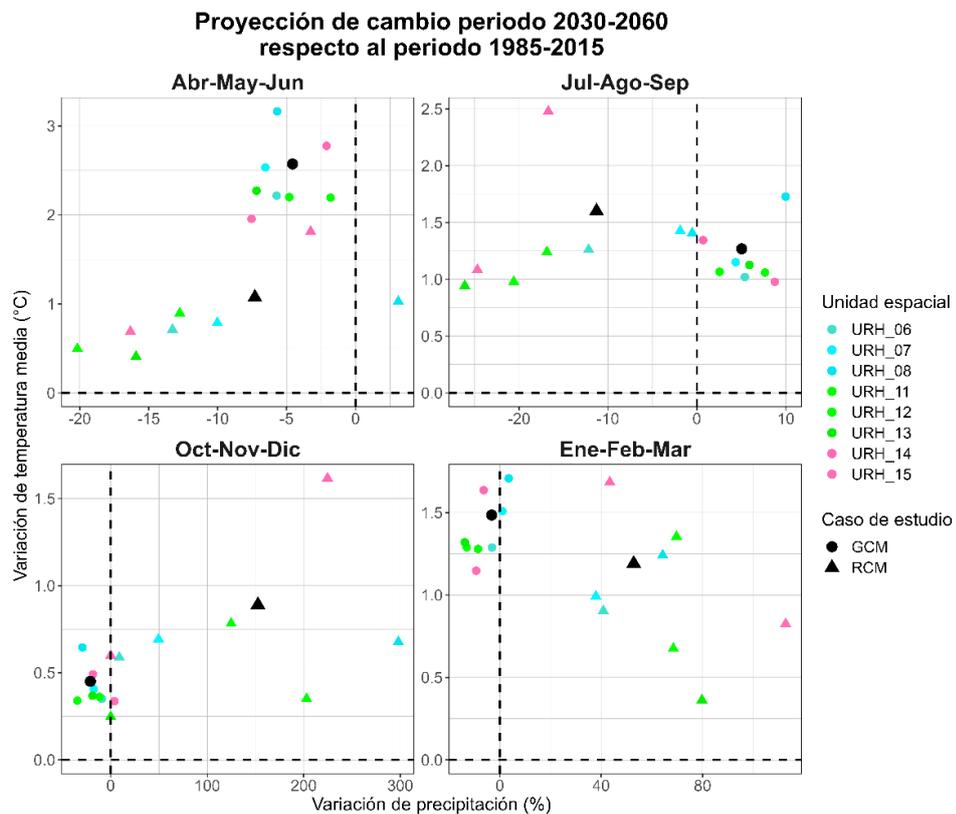


Figura 5-10: Proyecciones de cambio de precipitación (%) y temperatura media (°C) hacia el período 2030-2060 a nivel trimestral.

5.2.3 Satisfacción de demanda hídrica

En Figura 5-11 se pueden ver las satisfacciones de demanda hídrica en el período de referencia 1985-2015 y período futuro 2030-2060 para los nodos de demanda AP_COM01, AP_PAM01, AP_PAM02 y ET_AC_COM01 presentes en el modelo hidrológico WEAP Limarí que se ve en Figura 4-7. Los resultados muestran que en algunos nodos de demanda (AP_COM01, AP_PAM02 y ET_AC_COM01) existe un aumento en la satisfacción de la demanda hídrica hacia el período 2030-2060. Lo anterior podría deberse a las proyecciones de cambios en la estacionalidad de las cuencas que componen al sistema, junto al aumento en caudales bajos hacia el período 2030-2060 y el aumento porcentual de precipitación en el trimestre enero-febrero-marzo (donde en el periodo histórico se reportaban las bajas en cobertura de demanda) proyectado para algunas URHs.

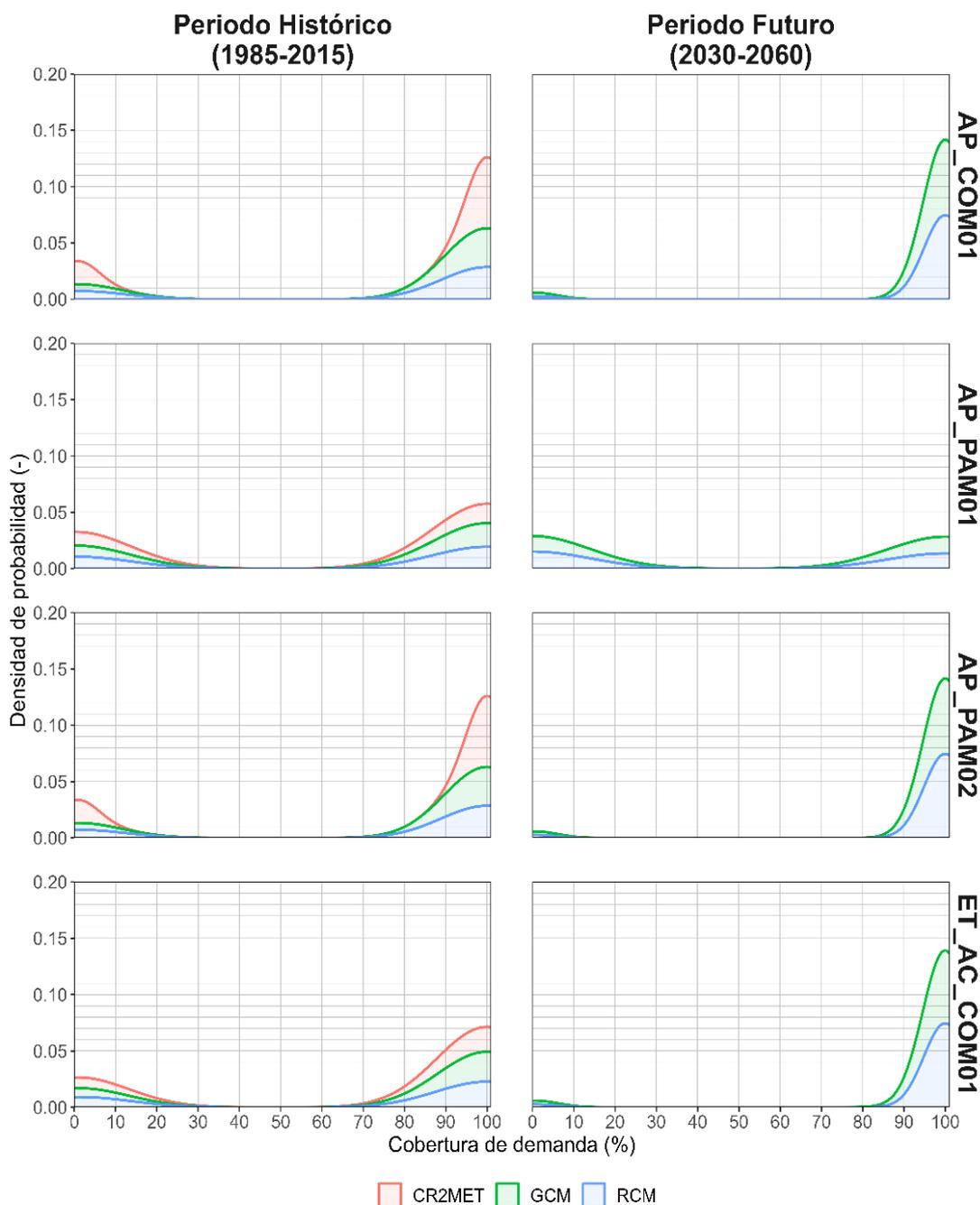


Figura 5-11: Satisfacción de demanda para cada nodo del modelo WEAP en el período histórico 1985-2015 y período futuro 2030-2060.

5.3 Análisis de sequías

En Figura 5-12 se observan los resultados de sequía a una escala de 12 meses obtenidos para la cuenca de interés. Allí se muestran los índices de sequía meteorológica (SPI y SPEI), hidrológica (SRI) y agrícola (SSI y SBFI) para la serie de tiempo 1979-2060. Los resultados para el período 1985-2015 muestran que, en general, se identifican períodos de sequía/superávit en precipitaciones con alta variabilidad interanual y que identifican períodos de sequía moderada y extrema entre 1995-2000. Por otra parte, se observa que la disminución en la variabilidad interanual del índice SPEI es más evidente en comparación al SPI, puesto que este último no muestra sus valores más bajos entre 2010-2015. Al contrastar los resultados de los índices de sequía meteorológica con los de sequía hidrológica y agrícola, es posible dar cuenta de que la ocurrencia de una sequía meteorológica de elevada magnitud no necesariamente conlleva a una sequía hidrológica del mismo tipo. Por ejemplo, al analizar el año 1998, se observa que SPI y SPEI dan cuenta de una sequía extrema, mientras que el SRI indica una sequía severa.

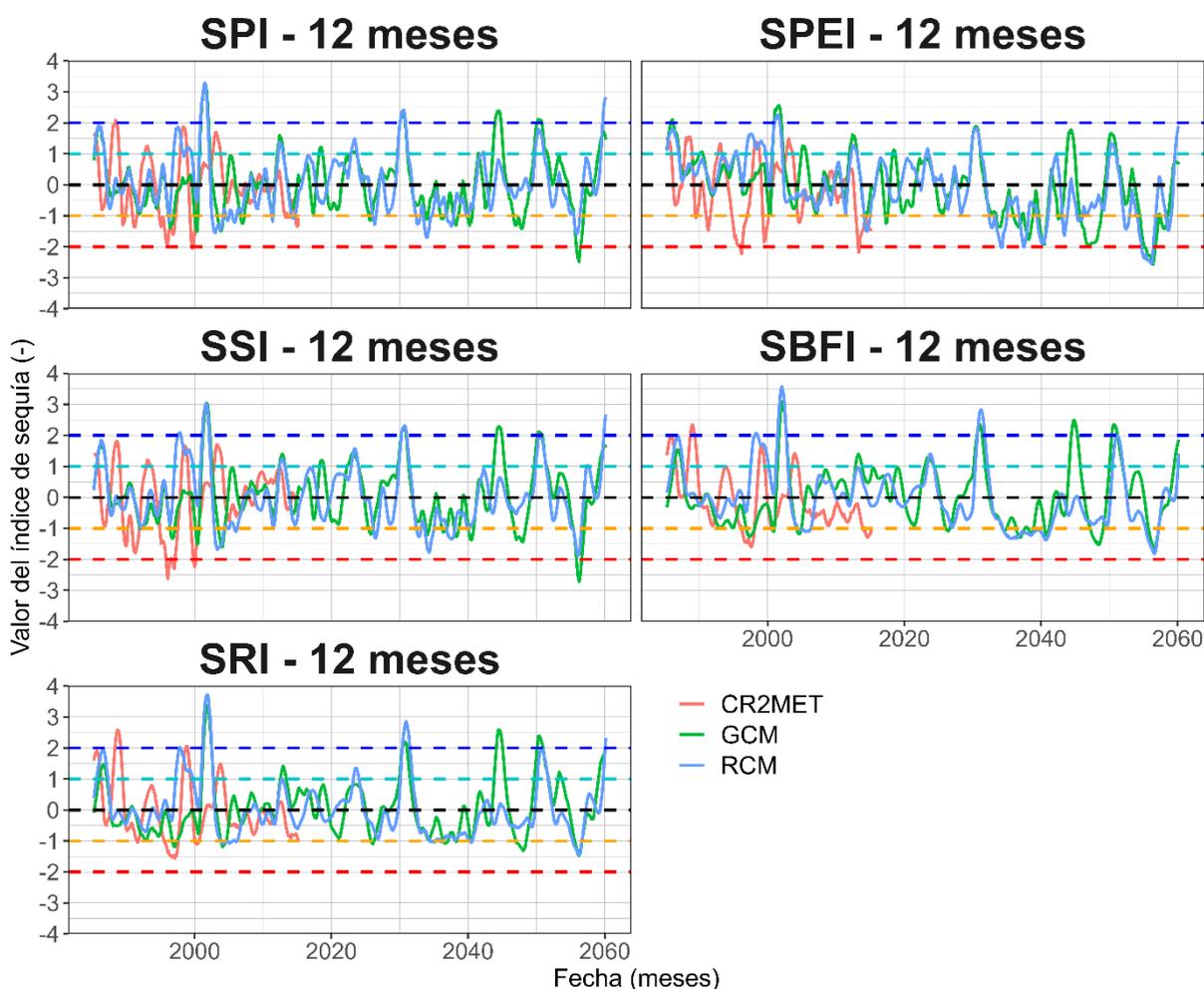


Figura 5-12: Comparativa en resultados de índices de sequía meteorológica (SPI y SPEI), hidrológica (SRI) y agrícola (SSI y SBFI) para la serie de tiempo 1979-2060 a escala de cuenca. Las líneas punteadas indican delimitación en intensidad del índice, siendo roja una sequía severa, naranja una sequía moderada, celeste y azul períodos de humedad moderada y severa respectivamente.

Por otra parte, se puede ver que, la señal reportada por el índice SSI es similar al comportamiento en los índices SPI y SPEI, lo cual se explica por los valores asociados al coeficiente de correlación de Pearson existente entre éstos, siendo éste de 0,86 entre SPI y SSI, y de 0,80 entre SPEI y SSI (Figura 5-13). Siguiendo esta idea, el coeficiente de determinación entre SPI y SSI corresponde a 0,74, indicando que la variabilidad del SPI permite explicar un 74% de la variabilidad del SSI. Del mismo modo, al comparar con el índice SRI, este porcentaje desciende a 48%. A partir

de lo anterior, se evidencia que el impacto de una sequía meteorológica se ve modulado por los procesos e interacciones que ocurren a escala de cuenca.

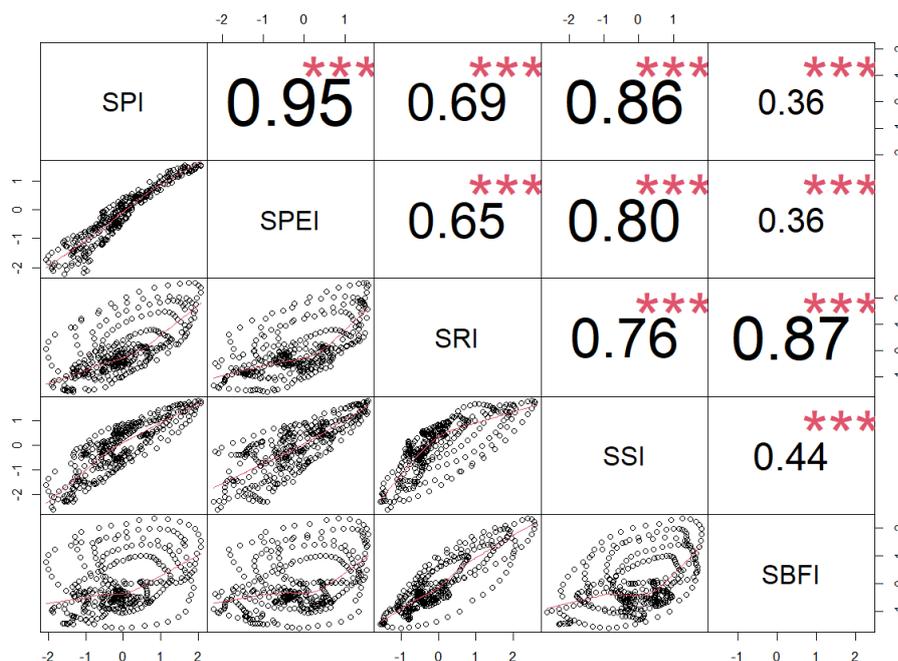


Figura 5-13: Correlación cruzada entre índices de sequía. Se puede ver el ajuste lineal, coeficientes de correlación de Pearson y significancia estadística (asteriscos indican p-value < 5% en todos los casos).

A modo de caracterizar los eventos de sequía y cómo se expresan a nivel de URH, los resultados del análisis de sequías se exponen para cada URH según frecuencia y número de eventos de sequía con duración mayor o igual a 12 meses. Así, en Figura 5-14 y Figura 5-15 se observa que, el índice SPI reporta una frecuencia de sequías meteorológicas con un rango de variación más acotado a lo estimado mediante el índice SPEI. Así, el SPI indica rangos de frecuencia entre 24% y 40%, mientras que el SPEI registra porcentajes entre 5% y 70%. En términos del periodo histórico, tanto GCM como RCM logran replicar el patrón espacial de CRMET para el caso del SPI, mientras que en el SPEI se tiene una subestimación de la frecuencia de eventos de sequía por parte del GCM y RCM. Por otra parte, se observa que para la proyección futura del SPI, tanto GCM como RCM, indican un aumento en la frecuencia de sequías, sin embargo, el RCM muestra este aumento de forma localizada en las zonas bajas de la cuenca.

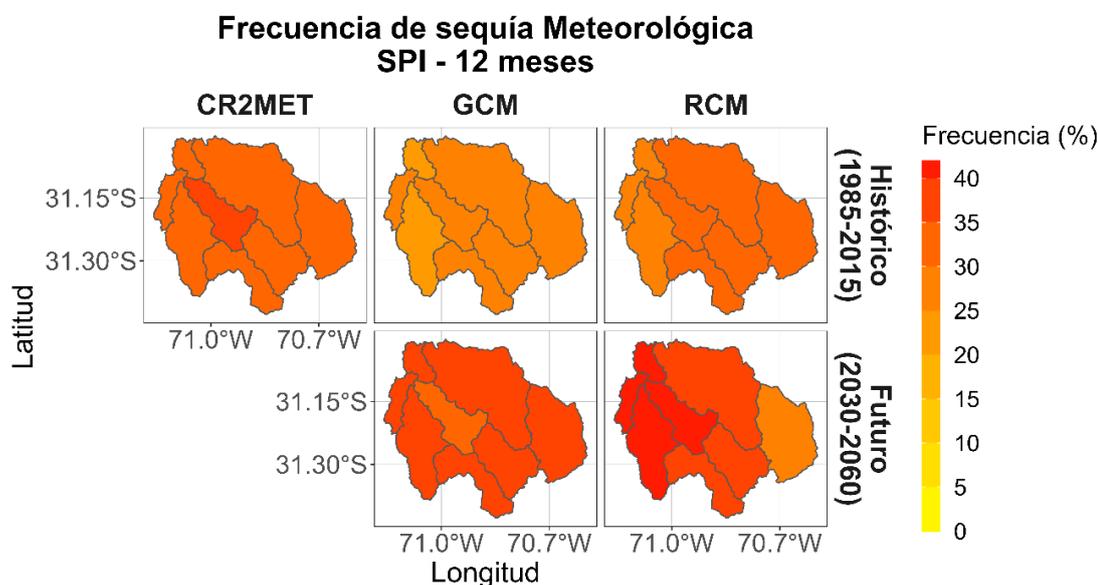


Figura 5-14: Frecuencia de sequía meteorológica por URH para el índice SPI – 12 meses. Colores cercanos a amarillo indican frecuencias bajas, mientras que colores cercanos a rojo hacen alusión a frecuencias elevadas.

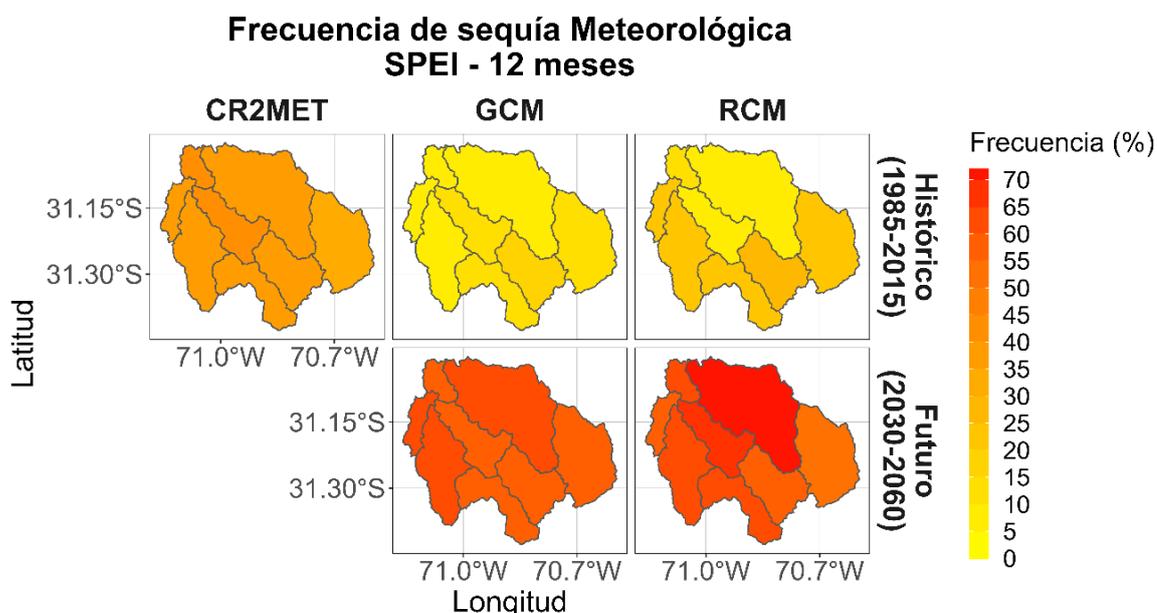


Figura 5-15: Frecuencia de sequía meteorológica por URH para el índice SPEI – 12 meses. Colores cercanos a amarillo indican frecuencias bajas, mientras que colores cercanos a rojo hacen alusión a frecuencias elevadas.

A modo de extender los antecedentes presentados anteriormente, la frecuencia por evento de sequía según los distintos índices, tanto para el período histórico como para el futuro, se resumen en Tabla 5-3, Tabla 5-4 y Tabla 5-4. Allí, considerando la relevancia que, para efectos del estudio, tienen URHs que componen la cuenca del río Cogotí (URH 8 y 14), se resaltan en tonalidad verde. En este sentido, si bien es cierto que, el estudio comprende el sistema de cuencas que son aportantes al embalse Cogotí como una forma de comparar el cómo se puede expresar de manera distinta las proyecciones de cambio climático en cuencas cercanas que componen un sistema hidrológico, el enfoque principal radica en la cuenca del río Cogotí. Cabe mencionar que, de manera complementaria, en el ANEXO D se presentan figuras resumen asociadas a los índices de sequía analizados.

Para los índices SRI, SSI y SBFi (ver Tabla 5-2, Tabla 5-3 y Tabla 5-4) se observa que, en términos generales, las proyecciones de sequía hidrológica muestran para las URH 8 y 14, un aumento en frecuencia de 61% y 76% para el GCM, mientras que para el RCM el aumento corresponde al 87% y 89%. En cuanto a sequía agrícola, se desprende que el SBFi reporta, para las URH 8 y 14, un aumento más drástico en cuanto a las proyecciones de frecuencia en sequías agrícolas (71% y 82% para el GCM; 84% y 83% para el RCM) en comparación al SSI (18% y 17% para el GCM; 0% y 9% para el RCM).

Tabla 5-2: Frecuencias (en %) de sequía meteorológica (SPI y SPEI), hidrológica (SRI) y agrícola (SSI y SBFi) obtenidas por CR2MET para el período histórico 1985-2015 por URH.

URH	CR2MET				
	SPI	SPEI	SRI	SSI	SBFI
AN-06	33	41	33	30	36
AN-07	32	40	30	30	29
AN-08	31	39	40	31	41
CL-11	34	41	39	31	31
CL-12	36	42	33	34	0
CL-13	34	42	35	31	39
CL-14	32	41	38	32	36
CL-15	34	40	13	34	38

Tabla 5-3: Frecuencias (en %) de sequía meteorológica (SPI y SPEI), hidrológica (SRI) y agrícola (SSI y SBFI) obtenidas por cada modelo para el período histórico 1985-2015 por URH.

URH	GCM					RCM				
	SPI	SPEI	SRI	SSI	SBFI	SPI	SPEI	SRI	SSI	SBFI
AN-06	28	24	28	27	29	32	29	21	26	24
AN-07	26	25	25	29	28	33	31	22	28	20
AN-08	29	16	14	23	12	35	23	0	34	0
CL-11	25	4	11	20	0	30	15	8	24	0
CL-12	29	19	33	26	0	31	18	8	32	0
CL-13	26	14	31	27	46	28	22	17	31	23
CL-14	29	8	4	24	2	31	5	0	29	0
CL-15	24	17	2	28	44	28	16	0	33	19

Tabla 5-4: Frecuencias (en %) de sequía meteorológica (SPI y SPEI), hidrológica (SRI) y agrícola (SSI y SBFI) obtenidas por cada modelo para el período futuro 2030-2060 por URH.

URH	GCM					RCM				
	SPI	SPEI	SRI	SSI	SBFI	SPI	SPEI	SRI	SSI	SBFI
AN-06	38	49	32	34	33	36	49	29	34	33
AN-07	38	48	34	29	33	36	46	37	313	38
AN-08	36	54	75	41	83	27	50	87	32	84
CL-11	40	59	64	41	80	42	61	79	45	79
CL-12	35	52	25	31	0	41	61	6	37	0
CL-13	36	58	29	33	36	42	56	17	33	41
CL-14	37	59	80	41	84	37	72	89	38	83
CL-15	38	52	3	33	23	41	57	0	31	52

En cuanto al número de sequías meteorológicas con duración mayor o igual a 12 meses, en la Figura 5-16 y Figura 5-17 se observa que, para el período histórico, SPI reporta, en la mayoría de los casos, un mayor número de eventos largos de sequía en comparación al SPEI. Resulta curioso notar que, para el caso del SPI, el número de eventos reportado por el RCM es más cercano al caso base dado por CR2MET (ver Tabla 5-5). Asimismo, si se analizan las URH 8 y 14 (Tabla 5-6), con efectos de no perder de vista el río principal al cual se enfoca este estudio, se observa que el GCM reporta un número de eventos de 8 y 9, mientras que el RCM se encuentra dentro de un rango de 3 a 6. En términos del patrón espacial, al igual que para el caso de la frecuencia de los eventos, en cuanto a la estimación realizada a partir del SPI, tanto el GCM como el RCM recuperan el patrón definido por CR2MET, mientras que en el caso del SPEI se estaría subestimando la cantidad de eventos.

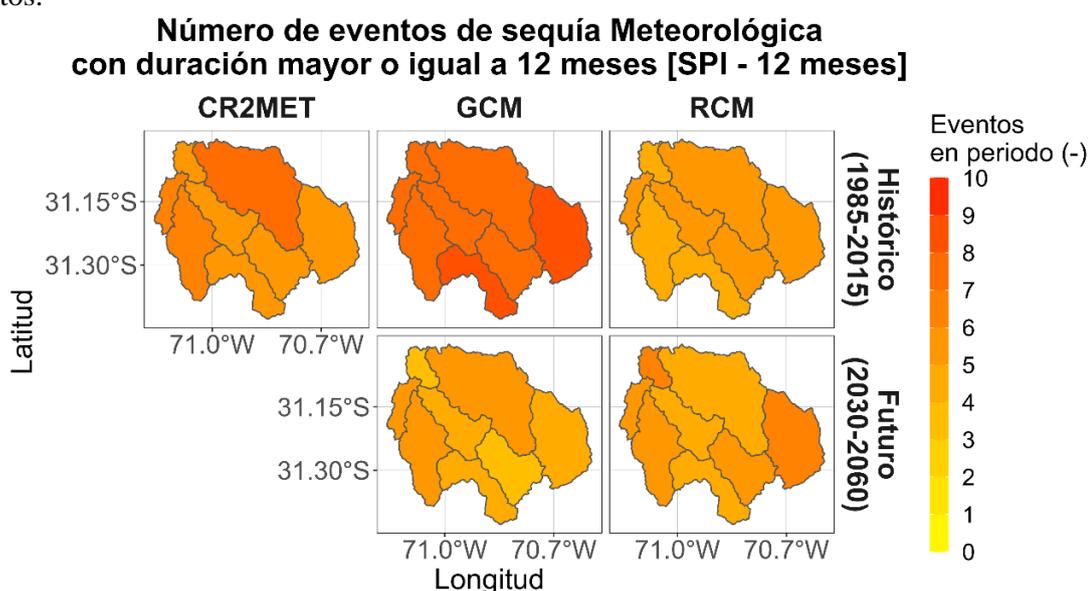


Figura 5-16: Número de eventos de sequía meteorológica con duración mayor o igual a 12 meses. Resultados se ven por URH para el índice SPI – 12 meses. Colores cercanos a amarillo indican frecuencias bajas, mientras que colores cercanos a rojo hacen alusión a frecuencias elevadas.

Número de eventos de sequía Meteorológica con duración mayor o igual a 12 meses [SPEI - 12 meses]

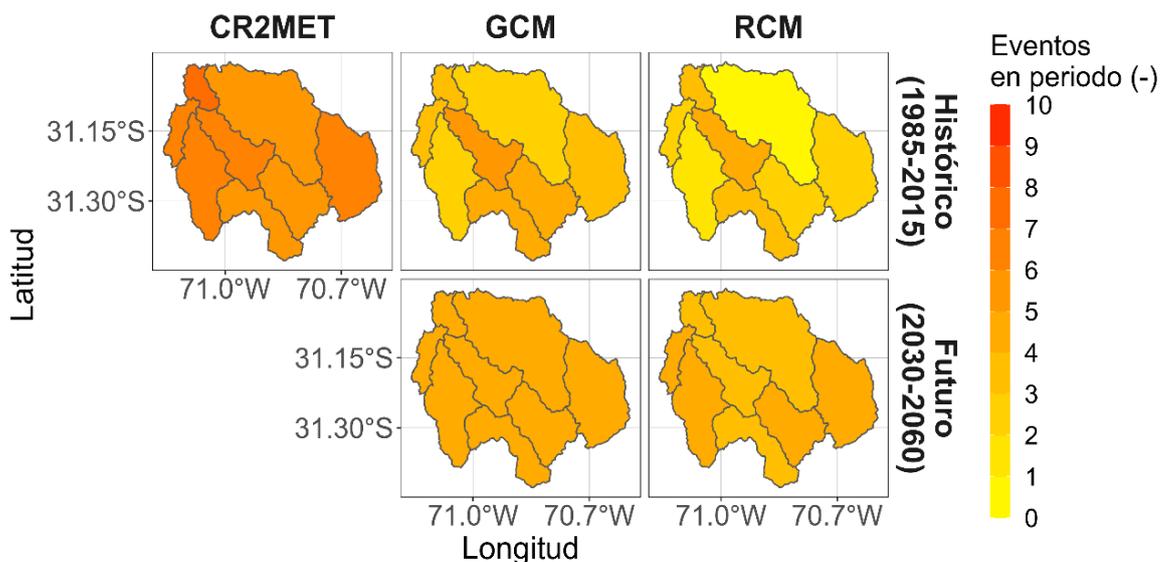


Figura 5-17: Número de eventos de sequía meteorológica con duración mayor o igual a 12 meses. Resultados se ven por URH para el índice SPEI – 12 meses. Colores cercanos a amarillo indican frecuencias bajas, mientras que colores cercanos a rojo hacen alusión a frecuencias elevadas.

Por otra parte, se observa que las proyecciones de sequía meteorológica según SPI indican una disminución para el GCM en número de eventos con duración mayor o igual a 12 meses, mientras que, para el RCM, la proyección muestra una tendencia a mantener el comportamiento del período histórico (AN-08 y CL-14 en Tabla 5-6 y Tabla 5-7). Para el caso del SPEI, las proyecciones muestran que la tendencia corresponde a un aumento leve entre 1 o 2 unidades de magnitud.

Tabla 5-5: Número de eventos con duración mayor o igual a 12 meses para sequía meteorológica (SPI y SPEI), hidrológica (SRI) y agrícola (SSI y SBF) obtenidas por CR2MET para el período histórico 1985-2015 por URH.

URH	CR2MET				
	SPI	SPEI	SRI	SSI	SBFI
AN-06	6	6	3	5	3
AN-07	6	6	6	7	6
AN-08	6	7	2	5	0
CL-11	7	7	4	6	0
CL-12	6	7	5	5	0
CL-13	7	7	5	5	3
CL-14	8	6	2	5	1
CL-15	6	8	4	6	3

Tabla 5-6: Número de eventos con duración mayor o igual a 12 meses para sequía meteorológica (SPI y SPEI), hidrológica (SRI) y agrícola (SSI y SBF) obtenidas por cada modelo para el período histórico 1985-2015 por URH.

URH	GCM					RCM				
	SPI	SPEI	SRI	SSI	SBFI	SPI	SPEI	SRI	SSI	SBFI
AN-06	9	5	4	5	4	5	4	2	4	2
AN-07	8	5	7	6	5	6	3	5	6	4
AN-08	9	4	2	6	2	6	3	3	6	2
CL-11	8	3	5	8	2	5	2	3	6	0
CL-12	8	6	3	9	1	6	5	5	6	1
CL-13	8	4	3	9	3	6	3	3	6	2
CL-14	8	3	3	7	1	6	1	1	6	0
CL-15	8	4	6	8	3	5	4	0	4	2

Tabla 5-7: Número de eventos con duración mayor o igual a 12 meses para sequía meteorológica (SPI y SPEI), hidrológica (SRI) y agrícola (SSI y SBFI) obtenidas por cada modelo para el período futuro 2030-2060 por URH.

URH	GCM					RCM				
	SPI	SPEI	SRI	SSI	SBFI	SPI	SPEI	SRI	SSI	SBFI
AN-06	5	5	4	5	4	5	4	3	5	3
AN-07	4	5	4	5	4	6	5	4	5	3
AN-08	5	5	2	5	0	7	5	1	5	0
CL-11	6	5	5	4	0	6	5	2	6	0
CL-12	5	5	4	5	0	5	4	5	6	0
CL-13	6	5	4	7	3	6	5	4	6	2
CL-14	6	5	2	6	0	5	4	1	5	0
CL-15	4	5	4	5	3	7	4	0	6	2

Respecto a sequía hidrológica, las proyecciones asociadas al número de eventos de sequía con duración mayor o igual a 12 meses muestran que, para las URH 8 y 14, existe una mayor disminución por parte del RCM en comparación al GCM (Tabla 5-6 y Tabla 5-7). Sumado a esto, se puede ver que el SSI obtenido en base al GCM, muestra que existen ciertas URH con mayor sensibilidad respecto a la ocurrencia de sequías, siendo estas las URH 11, 12, 13, 14 y 15. Bajo esta misma premisa, para el caso del RCM, se observa que existe mayor sensibilidad en cuanto a ocurrencia de sequías para la URH 6, 7, 8, 14 y 15. Por otra parte, se puede ver también que, tanto para el SSI como para el SBFI resulta una tendencia a disminuir el número de eventos de sequía agrícola con duración mayor o igual a 12 meses (Tabla 5-6 y Tabla 5-7), siendo esta disminución más notoria para el SSI a escala de cuenca. Lo anterior puede verse al comparar Figura 5-18 y Figura 5-19, donde se observa que, en la zona baja de la cuenca, el GCM reproduce disminuciones en eventos de sequía agrícola de 12 meses hacia el período futuro 2030-2060, lo cual no es posible apreciar de forma clara en los resultados del SBFI.

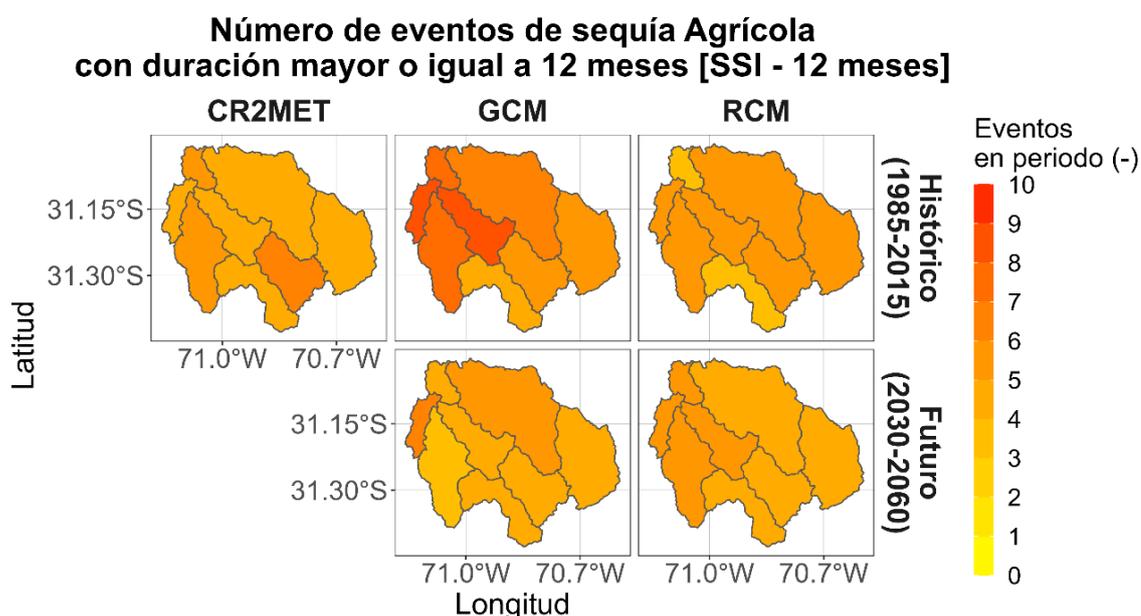


Figura 5-18: Número de eventos de sequía meteorológica con duración mayor o igual a 12 meses. Resultados se ven por URH para el índice SSI – 12 meses. Colores cercanos a amarillo indican frecuencias bajas, mientras que colores cercanos a rojo hacen alusión a frecuencias elevadas.

**Número de eventos de sequía Agrícola
con duración mayor o igual a 12 meses [SBFI - 12 meses]**

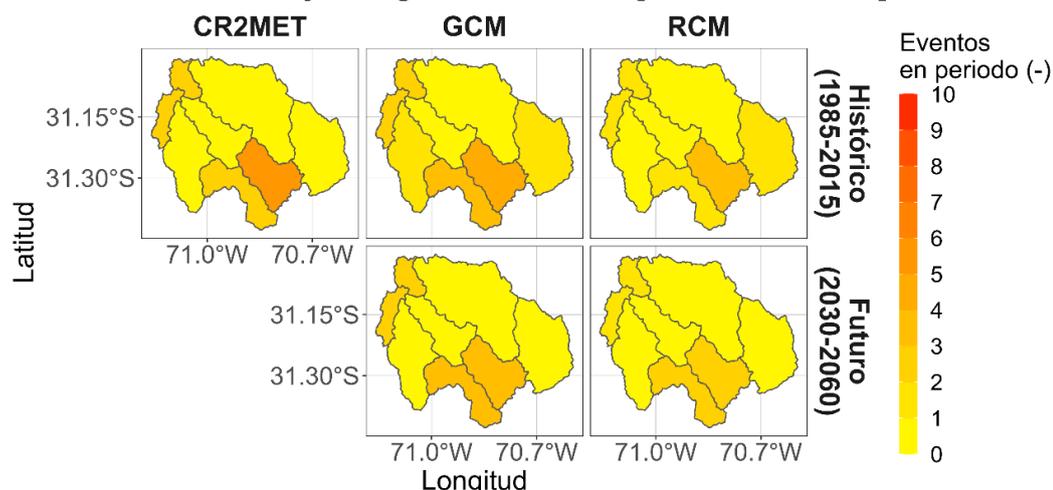


Figura 5-19: Número de eventos de sequía meteorológica con duración mayor o igual a 12 meses. Resultados se ven por URH para el índice SBFI – 12 meses. Colores cercanos a amarillo indican frecuencias bajas, mientras que colores cercanos a rojo hacen alusión a frecuencias elevadas.

A modo de contar con una idea de la evolución temporal de eventos de sequía y cómo esta se traduce en términos de sequía agrícola, resulta interesante comparar las diferencias obtenidas utilizando el índice SSI, el cual se obtiene a partir de humedad de suelo, y el índice SBFI, que se calcula utilizando el flujo base presente en la cuenca. En este sentido, los mapas de calor para cada índice (Figura 5-20 y Figura 5-21) muestran que, en términos generales, el SBFI representa sequías menos intensas, pero de mayor duración. A modo de ejemplo, se observa que entre 2035-2040, el SSI presenta un período con ocurrencia de sequías severas a escala de cuenca, sin embargo, es posible detectar algunos años con tendencia a la normalidad. Para el mismo período, los resultados en cuanto a sequía severa del SBFI demuestran ser más persistentes, sin detectar años con tendencia a la normalidad. En este sentido, la mayor perdurabilidad en cuanto a los resultados de sequía del SBFI, dan cuenta de cómo los distintos procesos hidrológicos influyen en la memoria hidrológica de una cuenca, la cual pareciera ser capaz de conservar ciertos comportamientos por largos períodos de tiempo (Alvarez-Garretón et al., 2021b). Dicho esto, los resultados en cuanto a frecuencia según intensidad de sequía agrícola se resumen en Tabla 5-8 y Tabla 5-9, donde se aprecia, tanto para SSI como para SBFI, una tendencia al aumento en sequías agrícolas moderadas, severas y extremas.

Tabla 5-8: Ocurrencia por período de eventos de sequía agrícola según su magnitud a escala de cuenca para el índice SSI.

SSI	Período 1985-2015			Período 2030-2060	
	Frecuencia CR2MET	Frecuencia GCM	Frecuencia RCM	Frecuencia GCM	Frecuencia RCM
Normal	134	205	163	124	145
Moderado	23	36	48	60	53
Severa	21	11	8	16	14
Extrema	15	1	5	4	12
Excepcional	17	0	0	9	0

Tabla 5-9: Ocurrencia por período de eventos de sequía agrícola según su magnitud a escala de cuenca para el índice SBFI.

SBFI	Período 1985-2015			Período 2030-2060	
	Frecuencia CR2MET	Frecuencia GCM	Frecuencia RCM	Frecuencia GCM	Frecuencia RCM
Normal	135	164	191	96	97
Moderado	50	64	31	83	99
Severa	17	0	0	22	26
Extrema	1	0	0	4	9
Excepcional	0	0	0	0	0

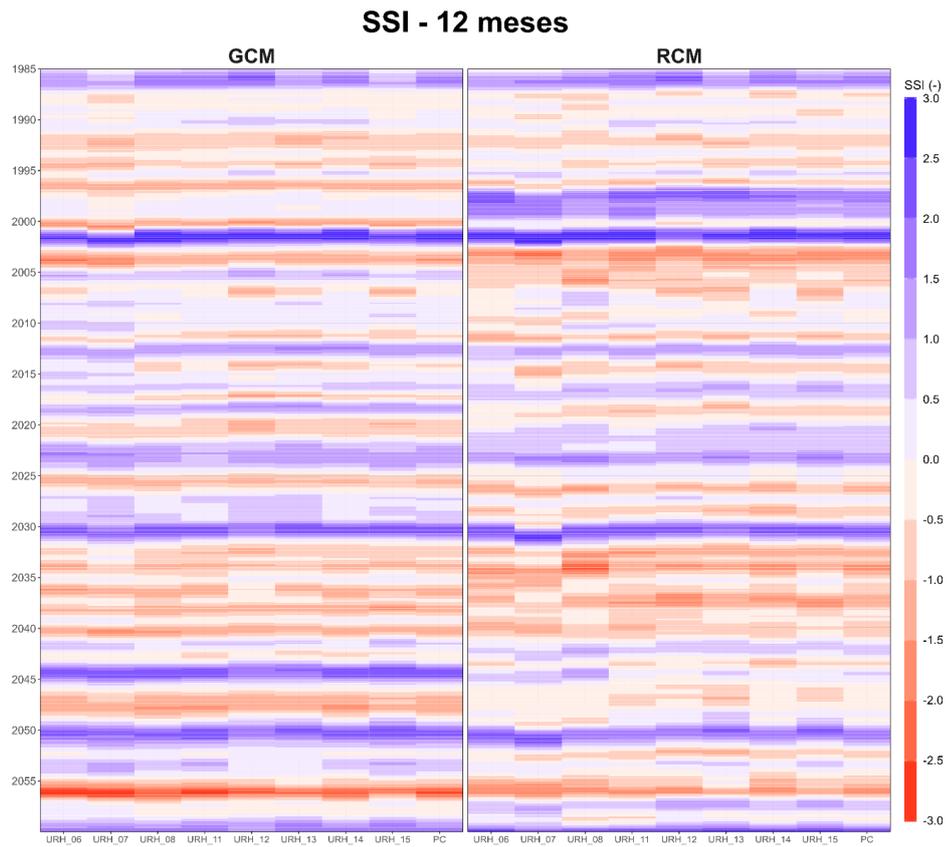


Figura 5-20: Mapa de calor de la serie completa por URH para el índice SSI-12 meses. Valores cercanos a -3 (en rojo) indican un estado de sequía excepcional, mientras que valores cercanos a 3 (en azul) señalan períodos húmedos. La columna PC representa los resultados a promedio de cuenca.

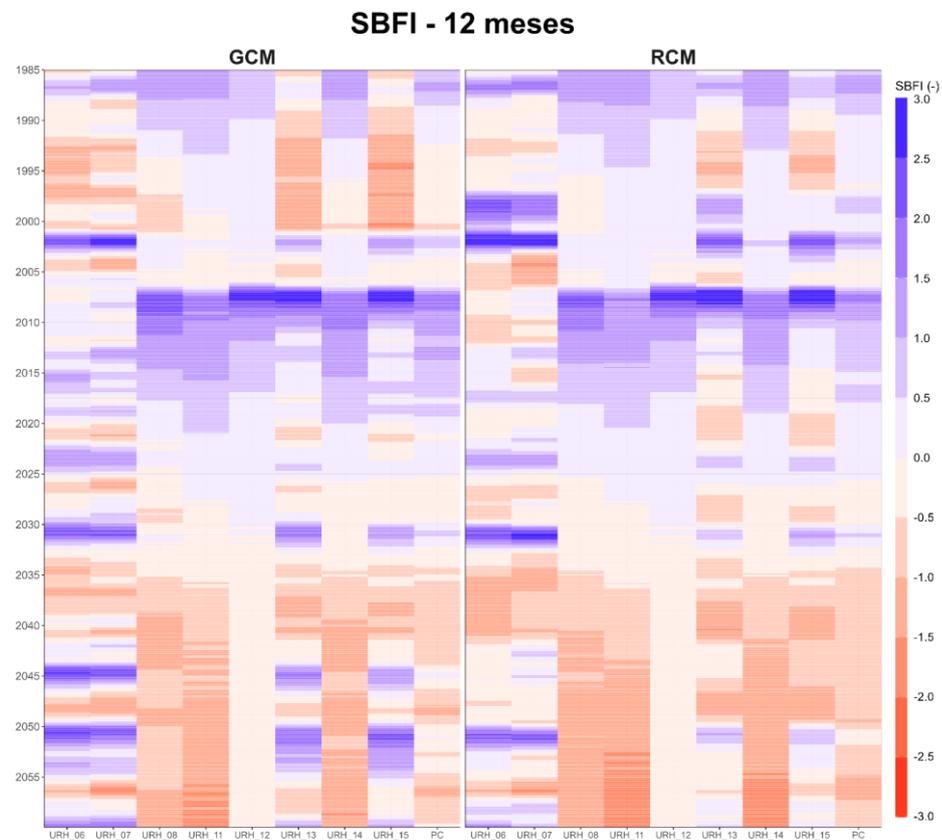


Figura 5-21: Mapa de calor de la serie completa por URH para el índice SBFI-12 meses. Valores cercanos a -3 (en rojo) indican un estado de sequía excepcional, mientras que valores cercanos a 3 (en azul) señalan períodos húmedos. La columna PC representa los resultados a promedio de cuenca.

Al evaluar las proyecciones de ocurrencia de sequías meteorológicas e hidrológicas, se puede ver en la Tabla 5-10, Tabla 5-11 y Tabla 5-12 que en general, se registra una aparición para el SPI en la ocurrencia de sequías meteorológicas extremas (de 0 a 5 con GCM; de 0 a 4 con RCM) y excepcionales (de 0 a 7 con GCM), mientras que para el SPEI existe una aparición de sequías meteorológicas severas para el GCM, y un aumento de éstas para el RCM (de 0 a 42 con GCM; de 7 a 39 con RCM). Sumado a esto, el SPEI muestra una aparición de sequías meteorológicas extremas (de 0 a 44 con GCM; de 0 a 30 con RCM) y excepcionales (de 0 a 19 con GCM; de 0 a 25 con RCM). Por otra parte, se observa que tanto GCM como RCM registran una proyección con tendencia al aumento de sequías hidrológicas moderadas, y una aparición de sequías hidrológicas severas (de 0 a 7 con GCM; de 0 a 8 con RCM). De esta forma, las proyecciones de cambio en cuanto a sequías meteorológicas hacia el período 2030-2060, indican un aumento en la frecuencia de sequías meteorológicas moderadas y severas; y, a la vez, una aparición en la frecuencia de sequías meteorológicas extremas y excepcionales. Del mismo modo, se proyecta hacia el período 2030-2060 que para sequías hidrológicas existe un aumento en la ocurrencia de sequías de tipo moderada, junto a una aparición de sequías hidrológicas severas a nivel de cuenca embalse Cogotí.

Tabla 5-10: Ocurrencia por período de eventos de sequía agrícola según su magnitud a escala de cuenca para el índice SPI.

SPI	Período 1985-2015			Período 2030-2060	
	Frecuencia CR2MET	Frecuencia GCM	Frecuencia RCM	Frecuencia GCM	Frecuencia RCM
Normal	148	184	143	119	151
Moderado	44	34	58	61	57
Severa	23	15	14	11	15
Extrema	9	0	0	5	4
Excepcional	3	0	0	7	0

Tabla 5-11: Ocurrencia por período de eventos de sequía agrícola según su magnitud a escala de cuenca para el índice SPEI.

SPEI	Período 1985-2015			Período 2030-2060	
	Frecuencia CR2MET	Frecuencia GCM	Frecuencia RCM	Frecuencia GCM	Frecuencia RCM
Normal	141	179	150	76	67
Moderado	43	17	11	78	75
Severa	23	0	7	42	39
Extrema	20	0	0	44	30
Excepcional	7	0	0	19	25

Tabla 5-12: Ocurrencia por período de eventos de sequía agrícola según su magnitud a escala de cuenca para el índice SRI.

SRI	Período 1985-2015			Período 2030-2060	
	Frecuencia CR2MET	Frecuencia GCM	Frecuencia RCM	Frecuencia GCM	Frecuencia RCM
Normal	157	198	194	119	155
Moderado	45	44	37	69	84
Severa	17	0	0	7	8
Extrema	0	0	0	0	0
Excepcional	0	0	0	0	0

6 DISCUSIÓN

Este estudio se basa en considerar resultados derivados del estudio de “Plan de Gestión Hídrica en la cuenca de Limarí” (DGA, 2020c), de donde se obtuvo una sección asociada a la cuenca del embalse Cogotí, de lo cual resulta para el período histórico 1985-2015, que para la cuenca del río Cogotí (subcuenca de la cuenca embalse Cogotí), existe un buen desempeño en términos de la modelación hidrológica ($KGE = 0,83$), no obstante, para la cuenca compuesta por los ríos Pama y Combarbalá, no se obtienen resultados satisfactorios en cuanto a la modelación, obteniendo incluso sesgos significativos ($KGE = 0,49$) vinculados a la estacionalidad de la cuenca, lo cual podría ser un problema en la obtención de resultados que sean representativos para tal cuenca. Pese a esto, si bien el presente estudio abarca la cuenca completa del embalse Cogotí para efectos de ver patrones espaciales del sistema y cómo podría verse ésta afectada bajo un escenario de clima cambiante, no se debe perder de vista que el objeto principal de estudio corresponde a la cuenca del río Cogotí.

Dicho lo anterior, a partir de los resultados obtenidos del escalamiento estadístico de temperatura media y precipitación para el modelo climático regional RegCM4, y su modelo climático global MPI-ESM-MR, se desprende que, en términos de climatología promedio en el período histórico, tanto para la estimación de precipitación como de temperatura media, ambos modelos en su versión corregida son comparables, puesto que los resultados de valor agregado en estos casos reportan valores en torno a cero (0,04 para temperatura media y -0,06 para precipitación a escala de cuenca). Sumado a esto, se obtuvo que, para ambos modelos en sus versiones crudas, el RCM agrega valor para la estimación de temperaturas medias en parte de la zona alta (0,2 y 0,38), media (0,09) y baja (0,14) de la cuenca del embalse Cogotí, no así para la estimación de precipitación, donde se obtuvo que el RCM no agrega valor (-0,1) a escala de cuenca.

Si bien lo anterior pareciera discrepar de lo reportado en la literatura, donde se menciona que los RCM mejorarían la representación de temperatura y precipitación en términos de, por ejemplo, su variabilidad espacial y temporal (Bozkurt et al., 2019), se debe considerar que el análisis de valor agregado sólo da cuenta de un patrón promedio en el periodo histórico. En este sentido, el índice no permite evaluar otras propiedades estadísticas que se ven suavizadas al considerar el promedio anual y/o mensual en el periodo (e.g., variabilidad interanual, variabilidad mensual, valores asociados a diferentes probabilidades de excedencia, etc.). Asimismo, el índice no permite dar cuenta de, por ejemplo, la coherencia espacial entre el producto de referencia (i.e., CR2MET) y el GCM/RCM en el periodo histórico concurrente. En resumen, para evaluar el valor agregado asociado al RCM respecto al GCM se requiere incorporar índices adicionales que permitan cuantificar la capacidad de estos productos para capturar en términos estadísticos (i.e., no sincrónicos) los patrones de variabilidad espaciotemporal individual y conjunta de variables meteorológicas de interés. A modo de ejemplo, al contrastar la frecuencia de sequía meteorológica caracterizada mediante el SPI para el periodo histórico 1985-2015 según la estadística asociada a CR2MET y el GCM/RCM (ver Tabla 5-2 y Tabla 5-3), y su análogo respecto al número de eventos de sequía con duración mayor o igual a 12 meses (ver Tabla 5-5 y Tabla 5-6), se desprende que el RCM captura de mejor forma el patrón definido por CR2MET en comparación al GCM, el cual reporta un mayor número de eventos de sequía. En este sentido, el resultado apunta a una ventaja del RCM por sobre el GCM (o valor agregado) considerando la habilidad que muestra al momento de preservar la frecuencia de sequías meteorológicas caracterizadas a partir de precipitación. Así, resulta clave proponer métricas e índices que permitan evaluar de manera íntegra el aporte de una base de información climática respecto a otra, puesto que un buen desempeño en términos de patrones estacionales promedio posterior a la corrección de sesgo, donde por construcción se converge a lo anterior, no asegura una correcta representación de la variabilidad espaciotemporal de la variable en cuestión.

Las proyecciones de cambio climático derivadas del uso del GCM y RCM escalados estadísticamente, muestran que, en términos generales, hacia el período 2030-2060 se proyecta una

disminución asociada a la precipitación anual promedio, la cual se acentúa en el RCM. Esto coincide con las tendencias y proyecciones climáticas futuras reportadas para Chile, las cuales se respaldan, por ejemplo, por estudios que indican un fuerte calentamiento y cambios espacialmente heterogéneos en la variabilidad de las precipitaciones hacia el futuro, traduciéndose para la zona del norte chico de Chile, en una disminución de un 2% en precipitaciones medias anuales hacia fines de siglo (Bambach et al., 2022) y, en particular, para la zona de estudio, la cual durante la última década se ha visto afectada por un intenso y persistente déficit de precipitaciones, y donde estudios enmarcados dentro de la metodología empleada por el Balance Hídrico Nacional, proyectan una disminución de 12 mm en precipitación media anual para el período futuro (DGA, 2018, 2020c). Otro aspecto a destacar de los resultados es el patrón reportado por el RCM, el cual tiende a “localizar” las proyecciones de cambio climático en comparación al GCM, el cual muestra un cambio más homogéneo. Lo anterior tomando en cuenta que, para el RCM se detecta una disminución más severa en precipitaciones en la zona baja de la cuenca cercana al 20%, mientras que en zonas altas se detecta un incremento en un 3%. Asimismo, para el caso de la temperatura se presenta un patrón espacial similar con rangos de aumento entre 0,5°C y 1,9°C. Dicho aumento de temperatura coincide con la tendencia global hacia el calentamiento del planeta y, particularmente, con las proyecciones de cambios de temperatura proyectadas para las macrozonas norte-centro de Chile (DGA, 2018). Para el caso del GCM, la variación de precipitación futura por URH se proyecta entre -2,5 y 5%, mientras que el rango de aumento en temperatura media anual va entre 1,1°C y 1,8°C, lo cual da cuenta de la menor dispersión en la señal de cambio en contraste al RCM. Este efecto “localizado” asociado al RCM puede ser atribuido a la mayor resolución que este presenta en contraste al GCM, lo cual posibilita que se capturen señales de cambio condicionadas por la compleja topografía de la zona de estudio, las cuales no logran ser capturadas por el GCM.

En cuanto a proyecciones de cambio hidrológico, los resultados muestran que hacia el período 2030-2060, existe un aumento en la magnitud de caudales bajos (e.g., probabilidad de excedencia mayor al 85%) en las cuencas de Cogotí entrada embalse y Cogotí en Fragueta, lo cual no ocurre para las cuencas de Combarbalá en Ramadillas y Pama en Valle Hermoso. Por otra parte, las CVE proyectadas por cuenca indican que, para Cogotí entrada embalse existe un cambio en el régimen hidrológico de la cuenca, donde el máximo caudal medio mensual ocurre entre los meses de abril y julio, alcanzando un valor máximo de 5 m³/s, a diferencia del período de referencia, donde el máximo caudal medio mensual alcanza un valor de 4 m³/s en el mes de noviembre (i.e., se pasa de un régimen nival a uno pluvial). Del mismo modo, para Cogotí en Fragueta se desplaza la estacionalidad e incrementa el caudal medio mensual máximo en 0,5 m³/s. En cuanto a Combarbalá en Ramadillas y Pama en Valle Hermoso, se puede ver un cambio más notorio en la estacionalidad proyectada por el GCM, lo cual se puede atribuir al aumento de temperatura que el GCM reporta en las URHs asociadas a dichas cuencas, el cual es mayor en términos de magnitud a lo reportado por el RCM. En consecuencia, el cambio en el régimen hidrológico asociado a las cuencas mencionadas anteriormente, individualizadas considerando que son cuencas controladas y, por tanto, es posible evaluar cuánto difieren las simulaciones respecto a las observaciones, se puede atribuir de manera íntegra al aumento de temperatura que se proyecta para el periodo futuro 2030-2060, el cual, como se muestra en la Figura 5-10 se acentúa en el periodo abril-septiembre. Este aumento que coincide con la temporada de acumulación nival traería como consecuencia un potencial cambio en la fase de la precipitación, favoreciendo la ocurrencia de precipitación líquida, y, por tanto, mermando la acumulación de nieve en la cuenca. Estos resultados de cambios en el régimen hidrológico en cuencas influenciadas por la nieve y la disminución del almacenamiento nival van en línea con lo reportado en la literatura para la macrozona norte-centro de Chile (e.g., Bambach et al., 2022; Vicuña et al., 2011, 2021), donde a causa del aumento de temperatura, que en términos de señal de cambio en general muestran un alto acuerdo entre los diferentes estudios, la precipitación sólida se vería relegada a las altas cumbres y se favorecería la generación de escorrentía de origen pluvial.

Considerando los resultados en cuanto a proyecciones climáticas e hidrológicas expuestas en los puntos anteriores, el impacto generado en la cuenca del embalse Cogotí puede analizarse según los resultados en cuanto a satisfacción de demanda hídrica en la cuenca de estudio. En este

sentido, se obtuvo mediante el modelo WEAP que, en algunos nodos de demanda (AP_COM01, AP_PAM02 y ET_AC_COM01) existe un aumento en la satisfacción de la demanda hídrica hacia el período 2030-2060. Lo anterior podría deberse a las proyecciones de cambios en la estacionalidad de las cuencas que componen al sistema, junto al aumento en caudales bajos hacia el período 2030-2060 y el aumento porcentual de precipitación en el trimestre enero-febrero-marzo (donde en el periodo histórico se reportaban las bajas en cobertura de demanda) proyectado para algunas URHs. Dado lo anterior, se presentan condiciones favorables para ejercer extracciones del recurso hídrico en tales nodos, contribuyendo así en un aumento en la satisfacción de la demanda en contraste con la referencia histórica.

Finalmente, los resultados para el cálculo de índices de sequía muestran que, se identifican períodos de sequía meteorológica moderada y extrema entre el período 1995-2000, junto a sequías hidrológicas moderadas y severas, lo cual de acuerdo a la literatura, coincide con los registros históricos de uno de los eventos más importantes de sequía para el territorio de Chile entre Copiapó y Puerto Montt, por su intensidad, severidad y duración, que corresponde a la sequía de 1998, incluyendo los años 1994, 1995 y 1996, con la interrupción de un año lluvioso en 1997 (Fernández & Gironás, 2021). Por otra parte, se verificó que, el coeficiente de determinación entre SPI y SSI corresponde a 0,74, por lo que la variabilidad del SPI permite explicar un 74% de la variabilidad del SSI. La misma comparación con el índice SRI, muestra que este porcentaje desciende a 48%. A raíz de este resultado, se evidencia que el impacto de una sequía meteorológica se ve modulado por los procesos e interacciones que ocurren a escala de cuenca. Respecto a proyecciones en la frecuencia de sequías, se pudo ver que hacia el período 2030-2060, se evidencia un aumento tanto para el SPI como para el SPEI en sequías meteorológicas moderadas y severas. En el caso de sequías agrícolas, los índices SSI y SBFI muestran que, a pesar de que existe una tendencia al aumento en la frecuencia de sequías agrícolas moderadas, severas y extremas, éstas son menos duraderas (menores a 12 meses). Finalmente, el índice SRI proyecta que hacia el período 2030-2060, existiría un aumento en la frecuencia de sequías hidrológicas moderadas, las cuales serían más duraderas entre el período 2035-2040 a escala de cuenca (ANEXO D, Figura D.7). Siguiendo esta idea, en términos generales, se observa que todos los índices de sequía concuerdan en la ocurrencia de un período húmedo para el año 2030 a nivel promedio de cuenca (Figura 5-20, Figura 5-21; ANEXO D, Figuras D.5, D.6, D.7), para posterior a ello, proyectar un período de sequía entre el período 2033-2040. Lo anterior concuerda con las proyecciones en cuanto a sequías hidrológicas publicadas por el Atlas de Riesgo Climático (ARCLIM), donde se registra que bajo un escenario RCP 8.5, existe un fuerte aumento en la afectación de la comuna de Combarbalá hacia el período 2025-2060 teniendo como referencia el período 1979-2014.

Las proyecciones de sequía obtenidas, bajo el marco actual de déficit hídrico caracterizado por un período de escasas lluvias en la zona de estudio (DGA, 2020c), sumado a la extensión de superficies plantadas, que se puede ver en el aumento de exportaciones asociadas a la actividad agrícola registradas por el Servicio Nacional de Aduanas (Castillo & Ríos, 2016), se traducen en una problemática que se puede extrapolar al ámbito social y económico, puesto que en la actualidad, la creciente demanda del recurso hídrico destinado a riego, conlleva a un escenario de tensión entre el desarrollo económico y la disponibilidad del recurso hídrico, la cual actualmente, podría estar alcanzando su máxima capacidad de uso (DGA, 2021a). Esto obliga al sector rural-agrícola a buscar respuestas ante la creciente demanda alimenticia de la población. En este sentido, considerando que existe una cierta correlación entre índices climáticos vinculados al ENOS y la magnitud de sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas en la cuenca de estudio (ANEXO E), y bajo la premisa de un contexto de clima cambiante (Walter E & Rafael, 2010), las proyecciones de sequía obtenidas podrían traducirse en que se acentúe un escenario en donde la intensificación o expansión de la actividad agrícola resulte insostenible, por lo que podría ser relevante buscar medidas que aumenten la seguridad de riego en superficies destinadas al cultivo en la actualidad, más allá de que exista un aumento en superficies regadas, dando preferencia al abastecimiento de pequeños agricultores presentes en la cuenca de estudio (Castillo & Ríos, 2016).

7 CONCLUSIONES

El presente estudio tuvo por objetivo evaluar los potenciales impactos del cambio climático en la temperatura, precipitación y recursos hídricos superficiales de la Cuenca del embalse Cogotí, así como las implicancias de dichos cambios en la sequía agrícola de la zona. Para esto, se utilizó como insumo las variables de precipitación y temperatura media del modelo climático regional RegCM4 y su respectivo modelo climático global MPI-ESM-MR, los cuales, al ser sometidos a un proceso de escalamiento estadístico y corrección de sesgo, permitieron analizar los impactos del cambio climático en cuanto a sequías utilizando un escenario RCP 8.5 para la cuenca del embalse Cogotí mediante modelación hidrológica en WEAP. Los principales resultados en contexto de cambio climático se pueden resumir a continuación:

1. Los resultados del índice de valor agregado al utilizar el modelo climático regional RegCM4 en contraste a su modelo global MPI-ESM-MR para la configuración de la modelación hidrológica, muestran que, en términos de climatología promedio en el período histórico, tanto para la estimación de precipitación como de temperatura media, ambos modelos en su versión corregida son comparables. Siguiendo esta idea, en términos de modelación hidrológica, se obtuvo que el desempeño tanto del GCM como del RCM en las estaciones fluviométricas del río Cogotí para el período 1985-2015, corresponde a un buen ajuste, donde el valor agregado al utilizar el RCM en términos del coeficiente de correlación de Pearson corresponde a un 92% para Cogotí entrada embalse y a un 98% para Cogotí en Fragueta, mientras que el valor agregado asociado al sesgo es de 43,56% y 48% para cada estación respectivamente. No obstante, mediante el mismo análisis, los resultados para las estaciones Combarbalá en Ramadillas y Pama en Valle Hermoso, demuestran un desempeño deficiente para el período histórico (Tabla 5-1). De esta forma, utilizar distintos modelos climáticos para forzar un modelo hidrológico, permiten estudiar diferentes proyecciones climáticas, donde tener en cuenta los resultados del valor agregado al utilizar un RCM en comparación a su GCM, podrían modificar el paradigma en cuanto al estudio de proyecciones de cambios hidrológicos o de sequías meteorológicas realizadas hasta ahora en la cuenca del embalse Cogotí.
2. Los resultados obtenidos del modelo WEAP en cuanto a satisfacción de demanda hídrica en la cuenca del embalse Cogotí considerando un escenario RCP 8.5 para los modelos RegCM4 y MPI-ESM-MR, muestran que, existen nodos de demanda (AP_COM01, AP_PAM02 y ET_AC_COM01) donde se evidencia un aumento en la satisfacción de demanda hídrica hacia el período 2030-2060. Lo anterior debido a proyecciones de cambios en la estacionalidad de las cuencas que componen al sistema, junto al aumento en caudales bajos hacia el período 2030-2060 y el aumento porcentual de precipitación en el trimestre enero-febrero-marzo (donde se reportaban bajas en cobertura de demanda en el período histórico) proyectado para algunas URHs. Dado lo anterior, se presentan condiciones favorables para ejercer extracciones del recurso hídrico en tales nodos, contribuyendo así en un aumento en la satisfacción de la demanda en contraste con la referencia histórica. Por otra parte, las proyecciones de cambio climático muestran que hacia 2030-2060, el RCM reporta una disminución en precipitaciones medias anuales del 7,5% a escala de cuenca, mientras que, para temperatura media, la proyección de cambio anual promedio corresponde a un aumento cercano a 1,5°C para el GCM, y a un aumento promedio de 1,2°C para el RCM. En cuanto a proyecciones de cambio hidrológico, existirían cambios en la estacionalidad de las cuencas que componen al sistema. En este sentido, para Cogotí entrada embalse, el nuevo máximo caudal medio mensual ocurre entre los meses de abril y julio, alcanzando un valor máximo de 5 m³/s, a diferencia del período de referencia, donde el máximo caudal medio mensual ocurre en el mes de noviembre, siendo éste de 4 m³/s. De forma análoga, para Cogotí en Fragueta se desplaza la estacionalidad e incrementa el caudal medio mensual máximo en 0,5 m³/s. Sumado a esto, la proyección hidrológica contempla un aumento de los caudales bajos (e.g., excedencia mayor al 85%).

3. Las proyecciones hacia el período 2030-2060 de sequía meteorológica, hidrológica y agrícola obtenidas del SPI, SPEI, SRI, SSI y SBFÍ para la zona de estudio, muestran un aumento en frecuencia de sequías meteorológicas moderadas (79,4% para GCM) y severas (7,1% para RCM), sumado a un aumento en sequías agrícolas moderadas (66,7% para GCM y 10,42% para RCM), severas (45,5% para GCM y 75% para RCM) y extremas (300% para GCM y 140% para RCM) con duración menor a 12 meses. Por otra parte, para el caso de sequías hidrológicas, las proyecciones indican un aumento en ocurrencia de tipo moderadas (56,8% para GCM y 127% para RCM), siendo éstas más duraderas entre el período 2035-2040 a escala de cuenca. A nivel promedio de cuenca, todos los índices indican un período húmedo al año 2030, el cual a partir del período 2033-2040, se transforma en eventos de sequía.

Para terminar, es necesario enfatizar en los alcances del presente estudio, el cual, si bien se enfoca en el análisis de los potenciales impactos del cambio climático en la temperatura media, precipitación y recursos hídricos superficiales de la cuenca del embalse Cogotí, la modelación hidrológica no resulta satisfactoria en todo el dominio. Así, en términos de confiabilidad, existe una limitante que obliga al estudio a dar mayor credibilidad a los resultados para la cuenca del río Cogotí, pues allí se logra representar de manera adecuada ($KGE=0,83$; $NSE=0,90$) los patrones estacionales de variabilidad y los montos mensuales en el periodo 1985-2005.

Por otra parte, a pesar de que el presente estudio logra dar un acercamiento en cuanto a proyecciones de sequía meteorológicas, hidrológicas y agrícolas, se debe tener en consideración que está sujeto al desempeño del modelo hidrológico WEAP obtenido del estudio de “Plan de Gestión Hídrica en la cuenca de Limarí” (DGA, 2020c), por lo que las proyecciones de sequía hidrológica y agrícola obtenidas van a depender directamente de la calibración ejecutada en tal plan. Pese a esta limitación, mediante el presente trabajo de investigación fue posible estudiar los impactos de cambio climático en proyecciones de sequía meteorológica, hidrológica y agrícola donde, a su vez se consideró el valor agregado de utilizar el modelo climático regional RegCM4 por sobre su modelo climático global de referencia (i.e., MPI-ESM-MR) para el río Cogotí. En consecuencia, los resultados presentados aportan hacia el desarrollo de nuevas metodologías y estrategias de evaluación que permitan estudiar sequías en un contexto histórico y futuro, entender cómo estas se pueden propagar hacia el ciclo del agua terrestre, y apoyar en base a antecedentes robustos propuestas de medidas adaptativas y resilientes ante eventos hidrometeorológicos extremos como lo son, en este caso, las sequías.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Aguayo, M., Stehr, A., & Link, O. (2016). *Respuesta hidrológica de una cuenca de meso escala frente a futuros escenarios de expansión forestal*.
- Aldunce, P., Araya, D., Sapiain, R., Ramos, I., Lillo, G., Urquiza, A., & Garreaud, R. (2017). Local Perception of Drought Impacts in a Changing Climate: The Mega-Drought in Central Chile. *Sustainability*, 9(11), 2053. <https://doi.org/10.3390/su9112053>
- Alvarez-Garreton, C., Boisier, J. P., Garreaud, R., Seibert, J., & Vis, M. (2021a). Progressive water deficits during multiyear droughts in basins with long hydrological memory in Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(1), 429–446. <https://doi.org/10.5194/hess-25-429-2021>
- Alvarez-Garreton, C., Boisier, J. P., Garreaud, R., Seibert, J., & Vis, M. (2021b). Progressive water deficits during multiyear droughts in basins with long hydrological memory in Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(1), 429–446. <https://doi.org/10.5194/hess-25-429-2021>
- Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., & Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817–5846. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>
- Apurv, T., & Cai, X. (2020). Drought Propagation in Contiguous U.S. Watersheds: A Process-Based Understanding of the Role of Climate and Watershed Properties. *Water Resources Research*, 56(9). <https://doi.org/10.1029/2020WR027755>
- Araneda-Cabrera, R. J., Bermúdez, M., Puertas, J., & Penas, V. (2022). Comparación de índices de sequía univariados y multivariados basados en datos satelitales para la monitorización de sequías hidrológicas en el ARA Sur, Mozambique. *Ingeniería Del Agua*, 26(3), 217–229. <https://doi.org/10.4995/ia.2022.18037>
- Bambach, N. E., Rhoades, A. M., Hatchett, B. J., Jones, A. D., Ullrich, P. A., & Zarzycki, C. M. (2022). Projecting climate change in South America using variable-resolution Community Earth System Model: An application to Chile. *International Journal of Climatology*, 42(4), 2514–2542. <https://doi.org/10.1002/joc.7379>
- BCN. (2017). *Cambio climático y efectos actuales y potenciales sobre los recursos hídricos en Chile. Departamento de estudios, extensión y publicaciones. Asesoría técnica parlamentaria. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN)*.
- Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., & Beguería, M. S. (2017). *Package 'spei'. Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index, CRAN [Package]*.
- Blauhut, V., Stoelzle, M., Ahopelto, L., Brunner, M. I., Teutschbein, C., Wendt, D. E., Akstinas, V., Bakke, S. J., Barker, L. J., Bartošová, L., Briede, A., Cammalleri, C., Kalin, K. C., de Stefano, L., Fendeková, M., Finger, D. C., Huysmans, M., Ivanov, M., Jaagus, J., ... Živković, N. (2022). Lessons from the 2018–2019 European droughts: a collective need for unifying drought risk management. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(6), 2201–2217. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2201-2022>
- 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. <https://doi.org/10.1002/2015GL067265>
- Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R., & Gallardo, L. (2019). Dynamical downscaling over the complex terrain of southwest South America: present climate conditions and added value analysis. *Climate Dynamics*, 53(11), 6745–6767. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04959-y>

- 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(1–2), 31–49. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>
- Castillo, P. O., & Ríos, J. T. (2016). *Diagnóstico del recurso hídrico en contexto de sequía y dependencia agrícola. Cuenca del Limarí, Coquimbo. Período 2000-2011. Universidad del Bío-Bío.*
- Danús Del Pedregal, S. (2018). *Comportamiento del modelo WEAP en la cuenca alta del Río Cachapoal, Chile, usando forzantes meteorológicas distribuidas.*
- DGA. (2018). *Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional a las macrozonas Norte y Centro, SIT N° 435. In Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Elaborado por UNTEC en UTP con la P.U. Católica de Chile.*
- DGA. (2020a). *Diagnóstico del Estado Hidrogeológico de la Cuenca del Limarí.*
- DGA. (2020b). *Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca de Limarí. ANEXO H - MODELOS. S.I.T N°463, realizado por : UTP HIDRICA - ERIDANUS.*
- DGA. (2020c). *Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca de Limarí. S.I.T N° 463. Ministerio de Obras Públicas.*
- DGA. (2021a). *Información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas.*
- DGA. (2021b). *Nuevas normales climáticas 1991-2020. SDT N° 440. Santiago, junio de 2021. Minuta elaborada por la División de Hidrología, Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas (MOP), Chile.*
- Dionizis, D., Ojeda, P., Quezada, S., Lagos, M., & Montserrat, S. (2021). Implicancias de la elección del método de escalamiento estadístico de modelos de circulación general en proyecciones de cambio hidrológico. *XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID).*
- Farahmand, A., & AghaKouchak, A. (2015). A generalized framework for deriving nonparametric standardized drought indicators. *Advances in Water Resources*, 76, 140–145. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.11.012>
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), RG2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Fernández, B., & Gironás, J. (2021). *World Water Resources Water Resources of Chile.* <http://www.springer.com/series/15410>
- Fowler, H. J., Blenkinsop, S., & Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27(12), 1547–1578. <https://doi.org/10.1002/joc.1556>
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6307–6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- 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. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Hamman, J. J., Nijssen, B., Bohn, T. J., Gergel, D. R., & Mao, Y. (2018). The Variable Infiltration Capacity model version 5 (VIC-5): infrastructure improvements for new applications and reproducibility. *Geoscientific Model Development*, 11(8), 3481–3496. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-3481-2018>

- Hao, Z., & Aghakouchak, A. (2013). Advances in Water Resources Multivariate Standardized Drought Index : A parametric multi-index model. *Advances in Water Resources*, 57, 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.03.009>
- 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. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3953-2017>
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.* <http://www.ipcc.ch>.
- IPCC. (2018). *Resumen para responsables de políticas. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza.* www.ipcc.ch
- IPCC. (2021). *Comunicado de prensa del IPCC.*
- Kelly, L., Kalin, R. M., Bertram, D., Kanjaye, M., Nkhata, M., & Sibande, H. (2019). Quantification of Temporal Variations in Base Flow Index Using Sporadic River Data: Application to the Bua Catchment, Malawi. *Water*, 11(5), 901. <https://doi.org/10.3390/w11050901>
- Mckee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eighth Conference on Applied Climatology*, 17–22.
- MMA. (2013). *Marco estratégico para la Adaptación de la infraestructura al Cambio Climático.*
- Montecinos, A., & Aceituno, P. (2003). *Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies.*
- Pomeroy, J. W., Gray, D. M., Brown, T., Hedstrom, N. R., Quinton, W. L., Granger, R. J., & Carey, S. K. (2007). The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence. *Hydrological Processes*, 21(19), 2650–2667. <https://doi.org/10.1002/hyp.6787>
- Rojas, M. (2012). *Consultoría para la elaboración de un estudio sobre estado del arte de modelos para la investigación del calentamiento global.*
- Saft, M., Peel, M. C., Western, A. W., & Zhang, L. (2016). Predicting shifts in rainfall-runoff partitioning during multiyear drought: Roles of dry period and catchment characteristics. *Water Resources Research*, 52(12), 9290–9305. <https://doi.org/10.1002/2016WR019525>
- Sam, T. T., Khoi, D. N., Thao, N. T. T., Nhi, P. T. T., Quan, N. T., Hoan, N. X., & Nguyen, V. T. (2019). Impact of climate change on meteorological, hydrological and agricultural droughts in the Lower Mekong River Basin: a case study of the Srepok Basin, Vietnam. *Water and Environment Journal*, 33(4), 547–559. <https://doi.org/10.1111/wej.12424>
- SEI, PACC, & PROMAS. (2009). *Centro de Cambio Global- Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009. Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP. Desarrollada con contribuciones del PACC (Proyecto de Adaptación al Cambio Climático a través de una efectiva gobernabilidad del agua en Ecuador), Ministerio del Ambiente de Ecuador, y PROMAS (Programa para el Manejo del Agua y del Suelo) de la Universidad de Cuenca, Ecuador.*
- Valiente, Ó. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional. Universidad de Barcelona. In *Investigaciones Geográficas*, n° (Vol. 26).

- van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *WIREs Water*, 2(4), 359–392. <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>
- Vicuña, S., Garreaud, R. D., & McPhee, J. (2011). Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change*, 105(3–4), 469–488. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9888-4>
- Vicuña, S., Vargas, X., Boisier, J. P., Mendoza, P. A., Gómez, T., Vásquez, N., & Cepeda, J. (2021). *Impacts of Climate Change on Water Resources in Chile* (pp. 347–363). https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3_19
- Villanueva Nilo, L., Ormazábal Maturana, B., & Bustamante Cuevas, O. (2020). *HABLEMOS DE SEQUÍA OUTLOOK ESTACIONAL INVIERNO 2020*.
- Walter E, B., & Rafael, T. (2010). *El Riego en un clima cambiante*.
- Yang, Y., McVicar, T. R., Donohue, R. J., Zhang, Y., Roderick, M. L., Chiew, F. H. S., Zhang, L., & Zhang, J. (2017a). Lags in hydrologic recovery following an extreme drought: Assessing the roles of climate and catchment characteristics. *Water Resources Research*, 53(6), 4821–4837. <https://doi.org/10.1002/2017WR020683>
- Yang, Y., McVicar, T. R., Donohue, R. J., Zhang, Y., Roderick, M. L., Chiew, F. H. S., Zhang, L., & Zhang, J. (2017b). Lags in hydrologic recovery following an extreme drought: Assessing the roles of climate and catchment characteristics. *Water Resources Research*, 53(6), 4821–4837. <https://doi.org/10.1002/2017WR020683>
- Yilmaz, K. K., Gupta, H. v., & Wagener, T. (2008). A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model. *Water Resources Research*, 44(9). <https://doi.org/10.1029/2007WR006716>
- Zhang, X., Hao, Z., Singh, V. P., Zhang, Y., Feng, S., Xu, Y., & Hao, F. (2022). Drought propagation under global warming: Characteristics, approaches, processes, and controlling factors. *Science of The Total Environment*, 838, 156021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156021>
- Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., Hernández, H. J., Galleguillos, M., Estades, C., Biging, G. S., Radke, J. D., & Gong, P. (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment*, 183, 170–185. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.016>

ANEXOS

ANEXO A: SET DE PARÁMETROS Y DESEMPEÑO DEL MODELO HIDROLÓGICO

El presente anexo tiene por objetivo individualizar los valores asociados a los parámetros del modelo WEAP-Cogotí (i.e., modelo WEAP-Limarí ajustado a la extensión de la cuenca de interés) y, asimismo, ilustrar el desempeño del modelo en contraste a los registros fluviométricos disponibles. De esta forma, la Tabla A.1 resume para cada URH los parámetros empleados para configurar la modelación hidrológica, mientras que la Figura A.1 y A.3 dan cuenta del desempeño del modelo en las cuencas Río Cogotí entrada embalse y Combarbalá en Ramadillas respectivamente. De manera complementaria, la Tabla A.2 y A.3 resumen algunas estadísticas a nivel mensual, estacional y anual derivadas de los datos observados y simulados para las cuencas individualizadas anteriormente.

Tabla A.1: Set de parámetros utilizados en el modelo WEAP calibrado.

Parámetro/URH	AN-06	AN-07	AN-08	CL-11	CL-12	CL-13	CL-14	CL-15
Area (km ²)	157,10	181,77	284,32	225,77	160,58	63,82	469,36	58,48
Kc (-)	-	-	1,5	2	1	1	2,25	1
Soil Water Capacity (mm)	90	300	1000	1000	5	1	1000	1
Deep Water Capacity (mm)	200	200	1000	1500	5	1	1000	1
Runoff Resistance Factor (-)	2	1,5	10	10	20	5	5	10
Root Zone Conductivity (mm/día)	90	300	20	15	5	1	20	1
Deep Conductivity (mm/día)	50	200	20	20	5	1	20	1
Preferred Flow Direction (%)	0,25	0,5	0,15	0,5	1	0,99	0,15	0,99
Freezing Point (°C)	4,5	6	-5	5	5	8,25	-5	7,5
Melting Point (°C)	14,7	10	5	10	12	11	5	13
Initial z1 (%)	15	15	20	5	5	5	10	5
Initial z2 (%)	15	15	20	5	5	5	10	5

Los resultados derivados de la modelación hidrológica dan cuenta de una correcta representación estacional de los caudales medios mensuales en el periodo 1985-2005. No obstante, existen una sobreestimación de los valores asociados a Cogotí en entrada embalse, mientras que en Combarbalá en Ramadilla se da el caso contrario (i.e., simulación subestima). Ahora bien, se debe considerar que en el presente estudio no se modificaron los parámetros de modelación ni se realizó un control de calidad respecto a las observaciones asociadas a los controles fluviométricos, por lo que atribuir potenciales razones a las causas de las diferencias entre la observación y la modelación quedan fuera del alcance del estudio.

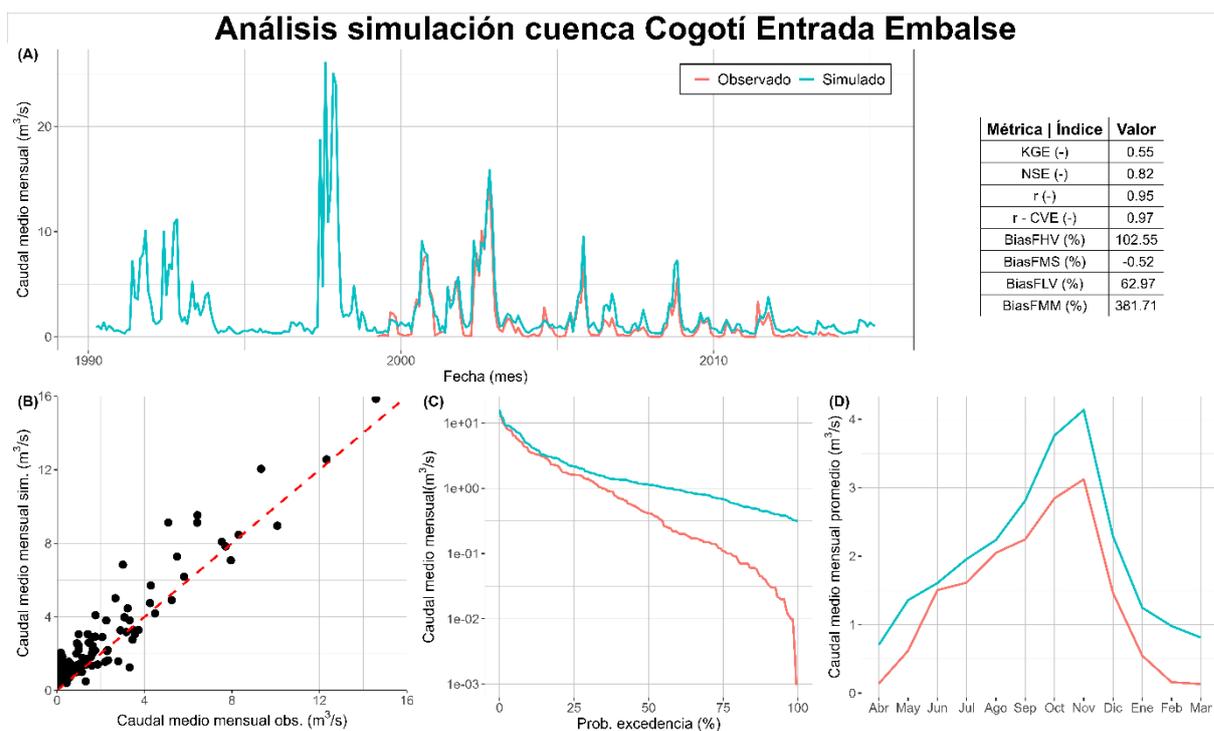


Figura A.1: Resumen del desempeño de la modelación hidrológica asociada a la cuenca Cogotí entrada embalse.

Tabla A.2: Cuadro resumen de métricas estadísticas calculadas para precipitación media CR2MET v1.4.2 y precipitación media en estación Cogotí entrada embalse disponible en el Explorador Climático (<https://explorador.cr2.cl/>). El análisis se obtiene a nivel mensual, estacional, anual y para la serie completa

Periodo	r	RMSE	PromObs	PromSim	StdObs	StdSim
Abr	1.00	1.68	5.94	6.43	18.95	20.55
May	1.00	2.65	20.59	21.56	26.56	27.64
Jun	1.00	4.49	45.95	43.48	63.36	59.81
Jul	1.00	1.79	50.78	50.28	78.33	77.24
Ago	0.99	6.50	31.12	30.38	42.48	38.49
Sep	1.00	0.80	7.94	7.86	16.71	16.05
Oct	0.84	6.80	3.79	4.71	11.13	12.64
Nov	0.97	0.32	0.31	0.25	1.20	1.07
Dic	0.19	0.26	0.06	0.00	0.27	0.02
Ene	1.00	0.51	0.22	0.14	1.38	0.87
Feb	1.00	0.49	0.08	0.00	0.49	0.00
Mar	0.97	1.53	1.96	1.95	5.52	6.06
Abr-Sep	1.00	9.60	165.44	163.23	123.94	120.12
Oct-Mar	0.99	2.01	6.50	6.07	11.85	11.91
Anual	1.00	9.95	172.10	169.44	127.65	123.40
Serie completa	1.00	3.23	13.99	13.87	37.50	36.51

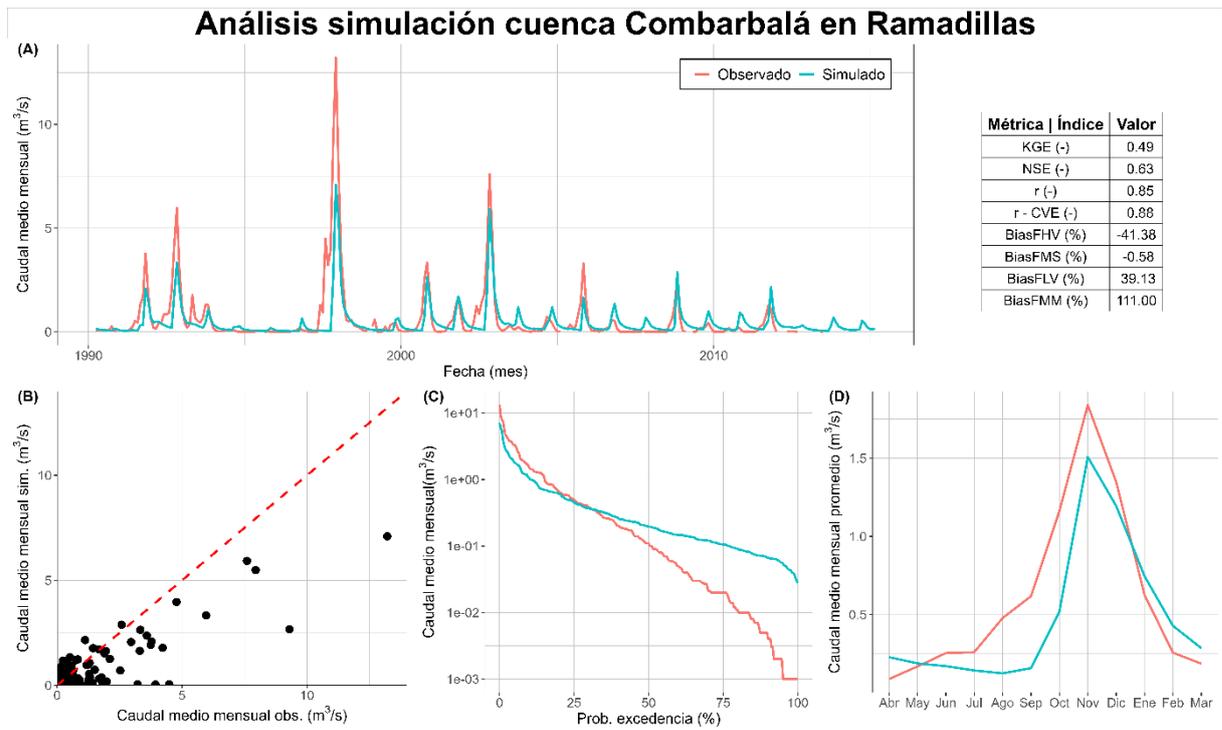


Figura A.2: Resumen del desempeño de la modelación hidrológica asociada a la cuenca Combarbalá en Ramadillas.

Tabla A.3: Cuadro resumen de métricas estadísticas calculadas para precipitación media CR2MET v1.4.2 y precipitación media en estación Combarbalá en Ramadillas, disponible en el Explorador Climático (<https://explorador.cr2.cl/>). El análisis se obtiene a nivel mensual, estacional, anual y para la serie completa.

Periodo	r	RMSE	PromObs	PromSim	StdObs	StdSim
Abr	1.00	1.14	8.10	7.75	24.10	23.21
May	0.99	4.66	25.87	24.25	32.29	30.57
Jun	1.00	9.33	50.45	47.66	70.34	64.19
Jul	1.00	6.29	56.92	53.66	83.65	78.62
Ago	0.99	11.48	40.10	34.87	49.94	42.06
Sep	1.00	2.75	10.00	9.00	19.22	16.74
Oct	0.81	7.47	4.13	5.04	11.28	12.58
Nov	0.90	1.58	0.74	0.39	3.05	1.93
Dic	0.29	0.40	0.09	0.01	0.40	0.03
Ene	1.00	0.63	0.26	0.16	1.62	0.99
Feb	1.00	0.32	0.05	0.00	0.32	0.00
Mar	1.00	1.72	3.34	2.81	10.49	8.92
Abr-Sep	1.00	23.79	192.86	175.80	145.41	131.87
Oct-Mar	0.99	2.69	8.76	7.39	14.53	13.12
Anual	1.00	25.41	201.62	183.19	149.34	135.33
Serie completa	1.00	5.40	16.60	15.18	41.93	38.29

ANEXO B: VALOR AGREGADO DEL USO DE RCM/GCM A ESCALA MENSUAL

En el presente anexo se resumen los **resultados de valor agregado en términos climatológicos de usar un RCM por sobre un GCM a nivel mensual, estacional y anual promedio en el periodo 1979-2005**. Lo anterior, considerando tanto el caso de los modelos crudos como corregidos para el estudio de precipitación y temperatura media en la cuenca asociada al embalse Cogotí. La Figura B.1 y B.2 reportan los resultados asociados al análisis de valor agregado RCM/GCM para precipitación cruda y corregida respectivamente, mientras que la Figura B.3 y B.4 dan cuenta del mismo análisis aplicado a temperatura media. Allí, valores cercanos a 1 dan cuenta de un beneficio de usar RCM, valores cercanos a -1 dan cuenta de valor agregado en el uso de GCM, y valores cercanos a cero no predominancia.

Valor agregado del uso de RCM/GCM (Crudo) para estimar Precipitación promedio periodo 1979-2005

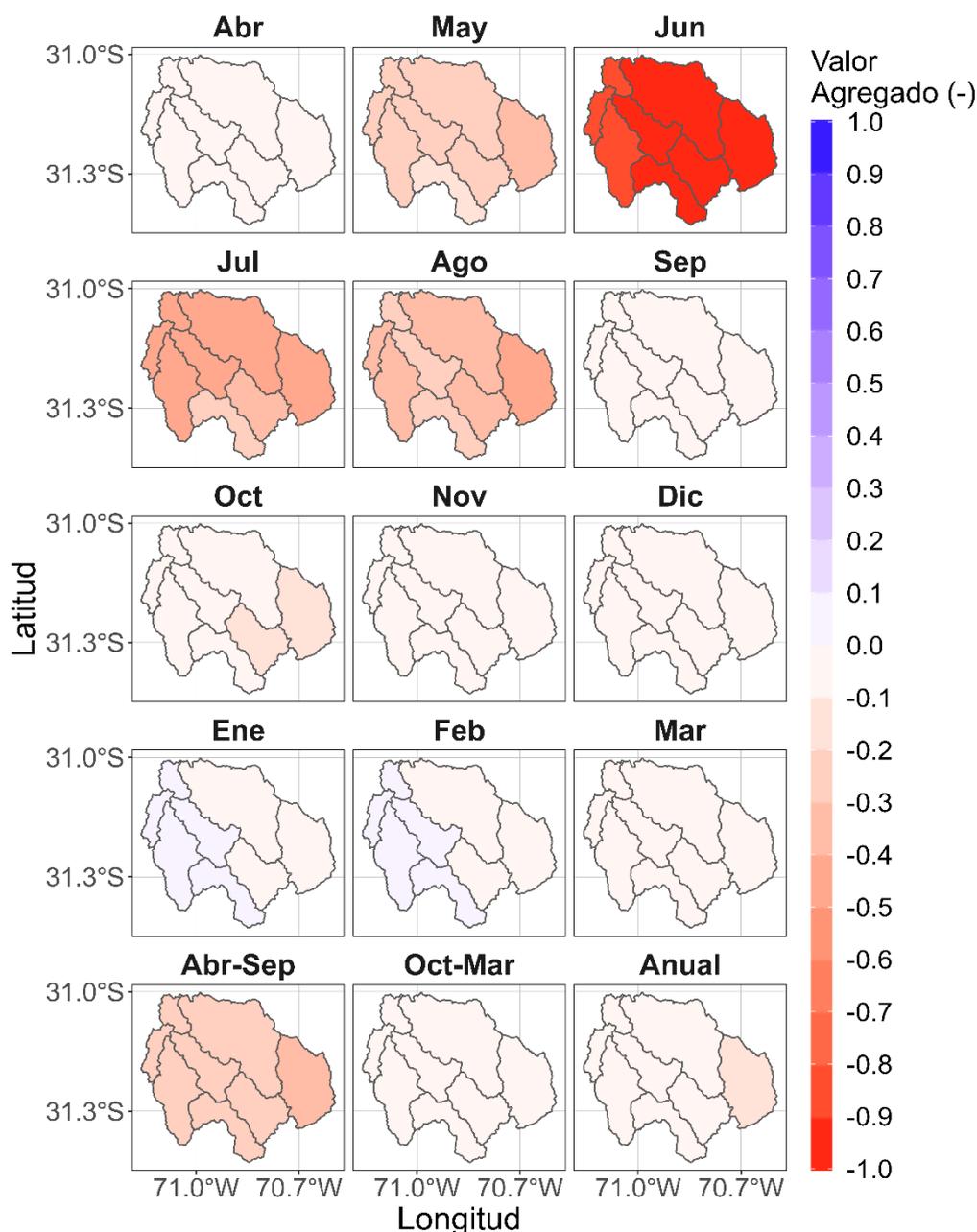


Figura B.1: Valor agregado del uso del RCM versus GCM crudos para la estimación de precipitación y precipitación media mensual promedio en el período 1979-2005. Valores entre 0 y 1 indican que RCM aporta valor. Valores entre 0 y -1 indican que RCM no aporta valor.

Valor agregado del uso de RCM/GCM (Corregido) para estimar Precipitación promedio periodo 1979-2005

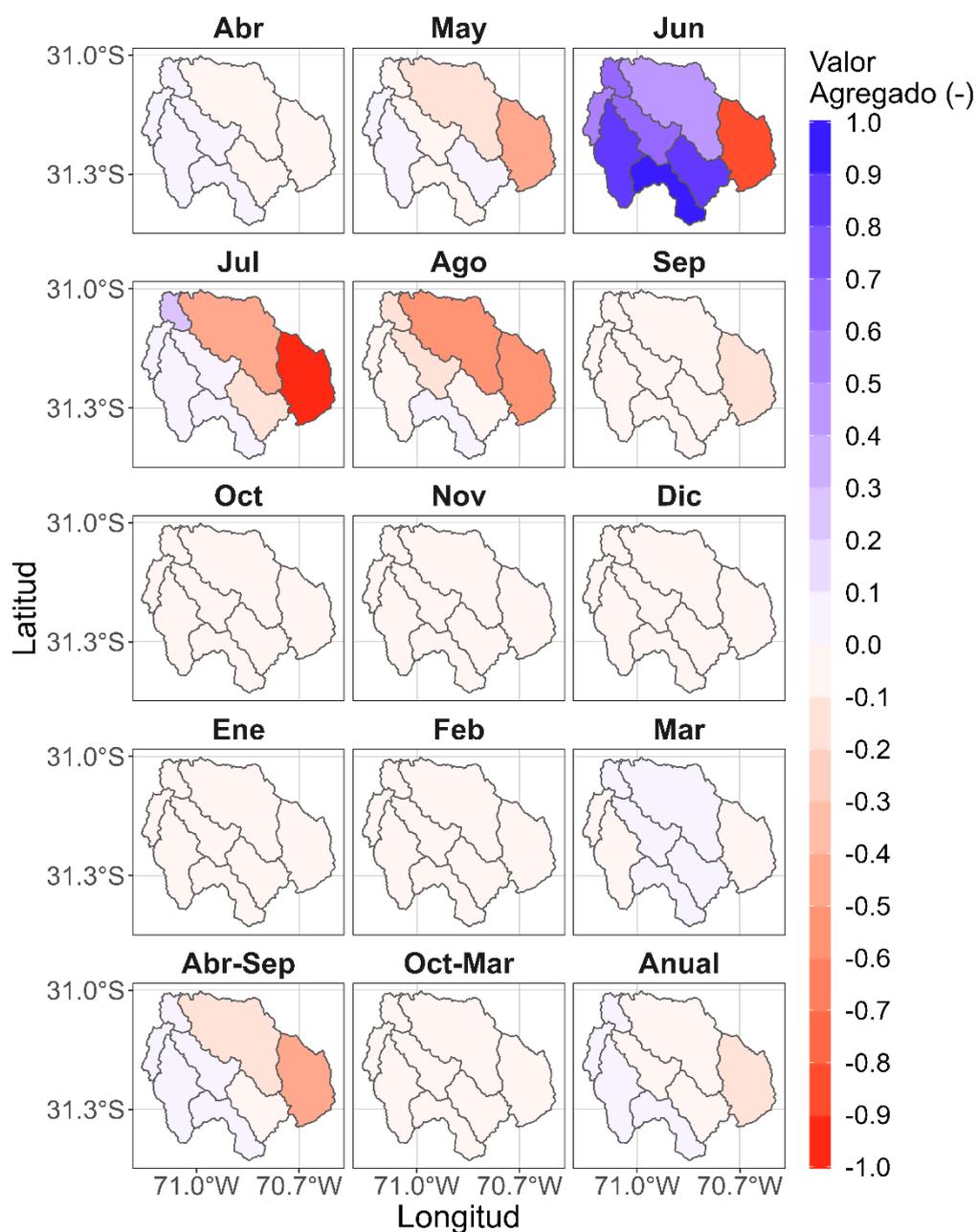


Figura B.2: Valor agregado del uso del RCM versus GCM corregidos para la estimación de precipitación y precipitación media mensual promedio en el período 1979-2005. Valores entre 0 y 1 indican que RCM aporta valor. Valores entre 0 y -1 indican que RCM no aporta valor.

**Valor agregado del uso de RCM/GCM (Crudo) para
estimar Temperatura media promedio periodo 1979-2005**

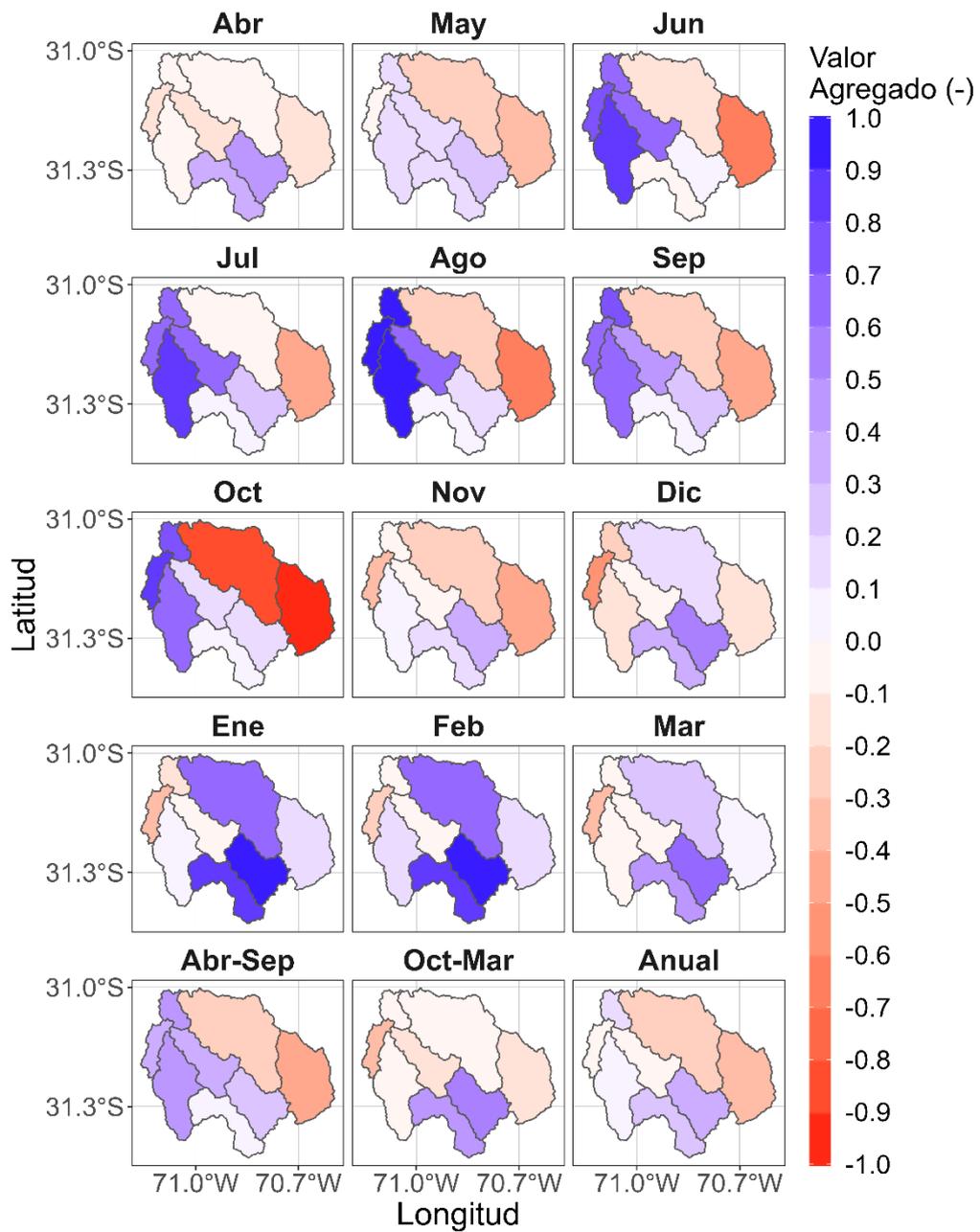


Figura B.3: Valor agregado del uso del RCM versus GCM crudos para la estimación de precipitación y temperatura media mensual promedio en el período 1979-2005. Valores entre 0 y 1 indican que RCM aporta valor. Valores entre 0 y -1 indican que RCM no aporta valor.

**Valor agregado del uso de RCM/GCM (Corregido) para
estimar Temperatura media promedio periodo 1979-2005**

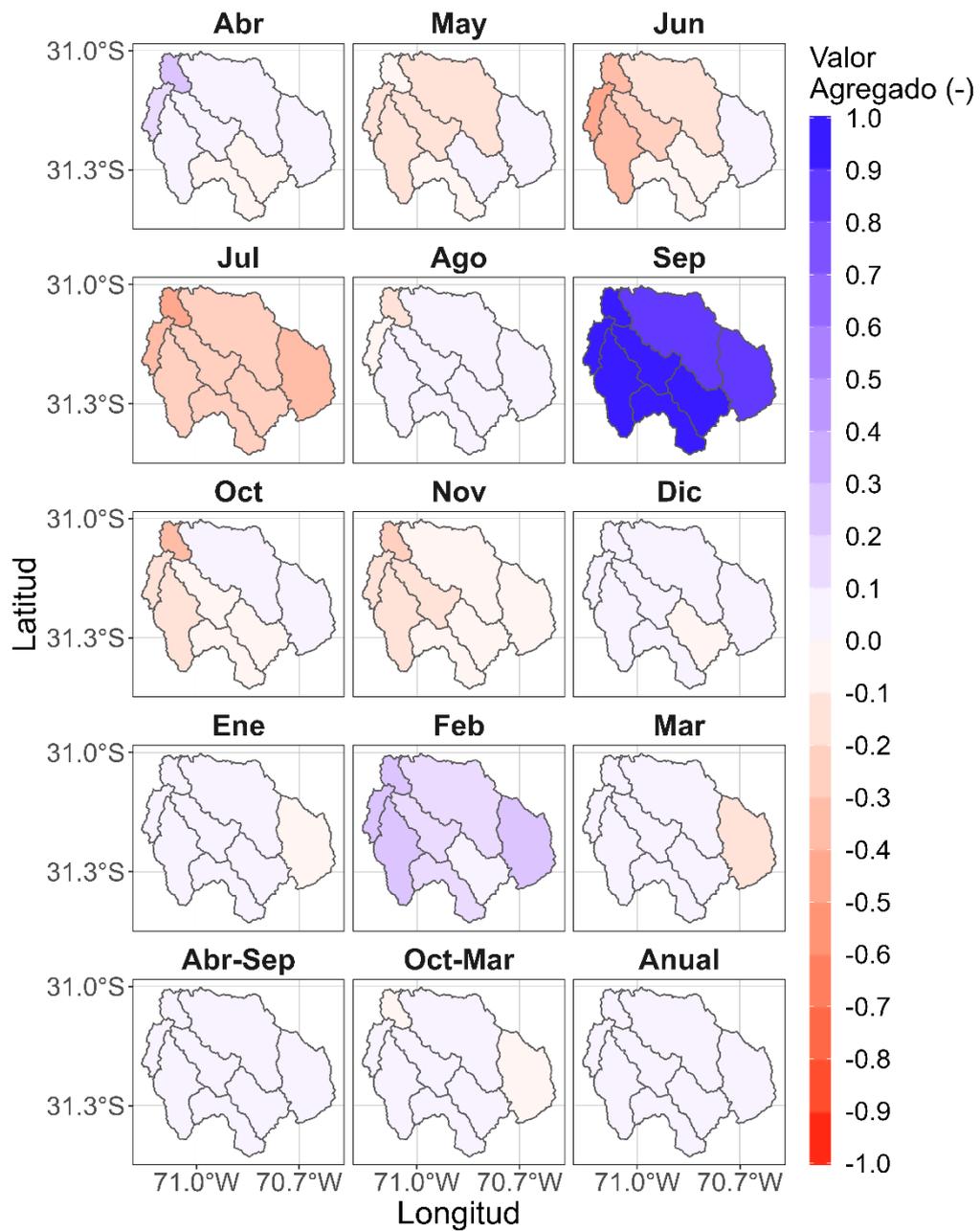


Figura B.4: Valor agregado del uso del RCM versus GCM corregidos para la estimación de precipitación y temperatura media mensual promedio en el período 1979-2005. Valores entre 0 y 1 indican que RCM aporta valor. Valores entre 0 y -1 indican que RCM no aporta valor.

ANEXO C: PROYECCIONES DE CAMBIO HIDROLÓGICO Y SATISFACCIÓN DE DEMANDA HÍDRICA A ESCALA MENSUAL

El presente anexo tiene por objetivo mostrar los resultados asociados a las proyecciones de cambio hidrológico para el periodo 2030-2060 respecto a 1985-2005 a una escala anual, estaciona y anual por URH y a escala de cuenca. Lo anterior, a modo de complementar el análisis trimestral y anual presentado en el cuerpo del informe. Así, la Figura C.1 muestra las proyecciones de cambio hidrológico mencionadas anteriormente. Allí se observa un aumento en las tasas de evapotranspiración real (ETR) entre mayo y agosto, lo cual va en línea con el cambio estacional que se proyecta en el régimen hidrológico de la cuenca de estudio, razón por la que aumenta la disponibilidad de agua en meses donde antes no estaba disponible y, sumando al aumento de temperatura, favorece el aumento de ETR.

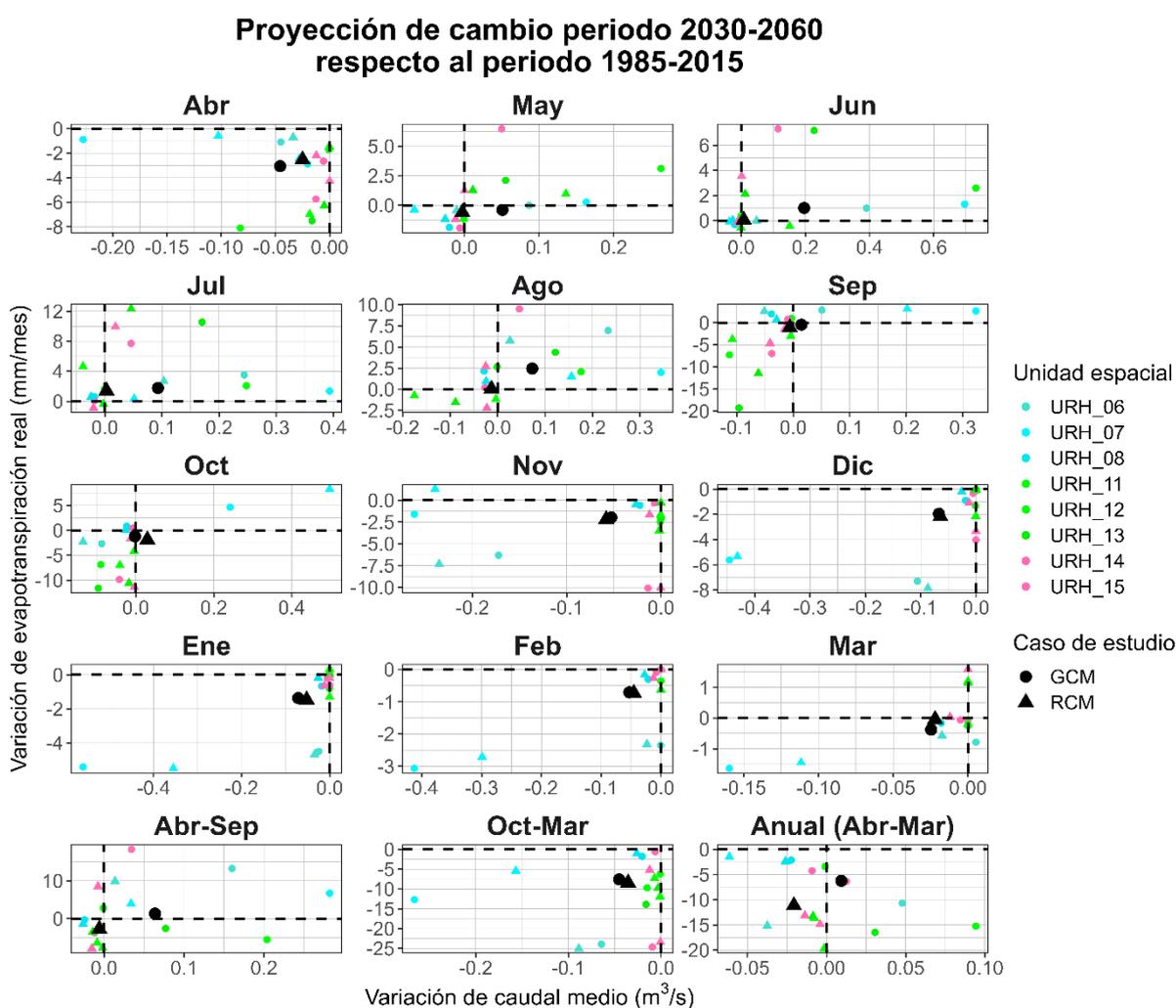


Figura C.1: Proyección de cambio hacia 2030-2060 en caudal medio (m^3/s) y evapotranspiración real (mm/mes) a nivel mensual, temporada primavera-verano, otoño-invierno y anual.

En forma complementaria a lo reportado en el cuerpo del presente trabajo, las Figuras C.2 a C.5 reportan las curvas de probabilidad acumulada para satisfacción de demanda a nivel mensual para cada nodo de demanda ubicado en el sistema asociado a la cuenca del embalse Cogotí. Allí se observa que, en general, aumenta la satisfacción de la demanda en todos los casos, lo cual, para los meses de abril-septiembre se explica por el cambio estacional de la escorrentía, mientras que para los meses de octubre-marzo se puede atribuir al aumento en la magnitud de los caudales bajos y el aumento en el monto asociado a las precipitaciones que se proyecta para dichos meses en el periodo futuro 2030-2060. Cabe mencionar que la demanda definida para el periodo histórico se considera constante para el periodo futuro.

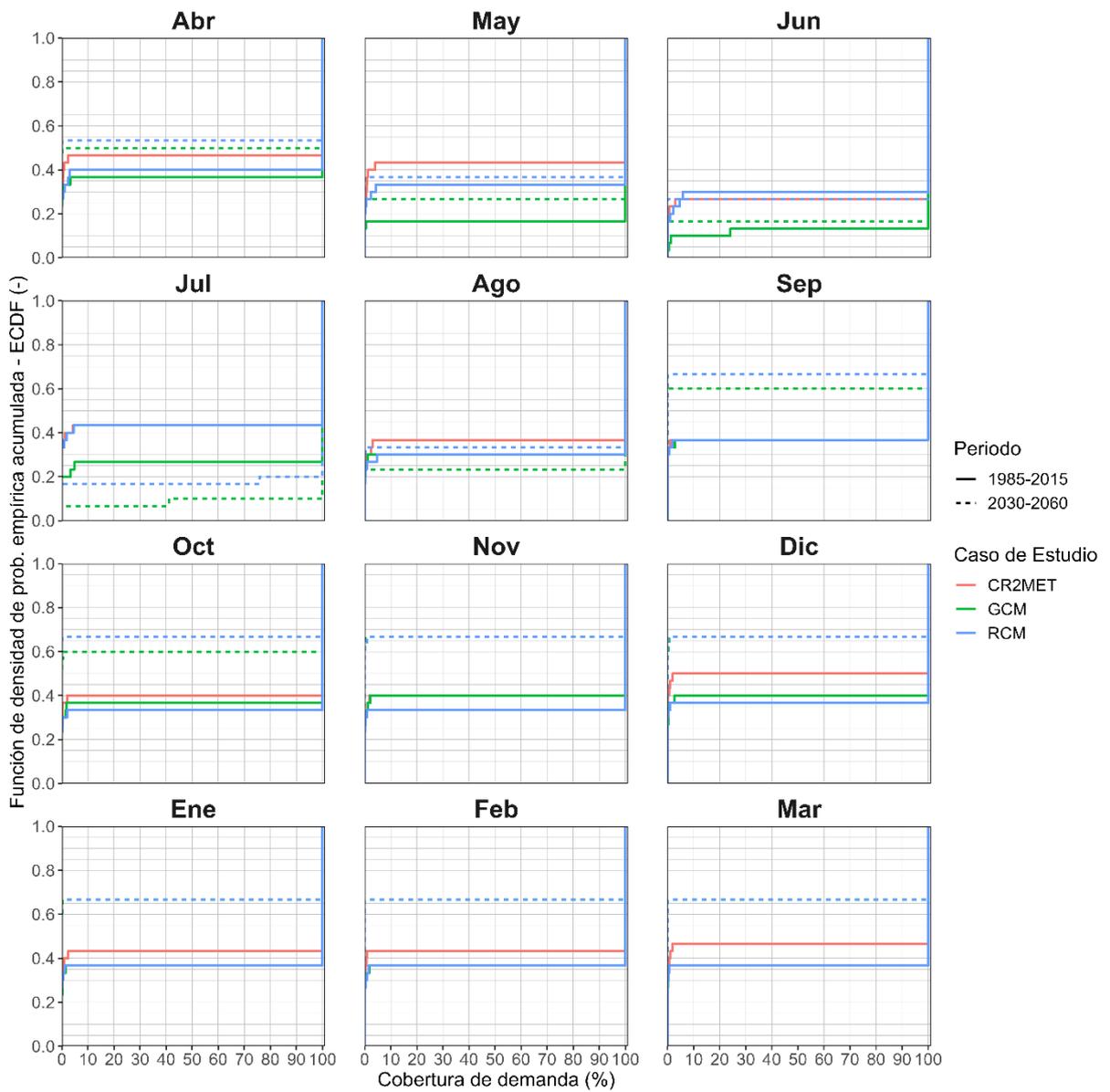


Figura C.2: Curva de probabilidad acumulada para satisfacción de demanda a nivel mensual para el nodo de demanda AP_PAM01.

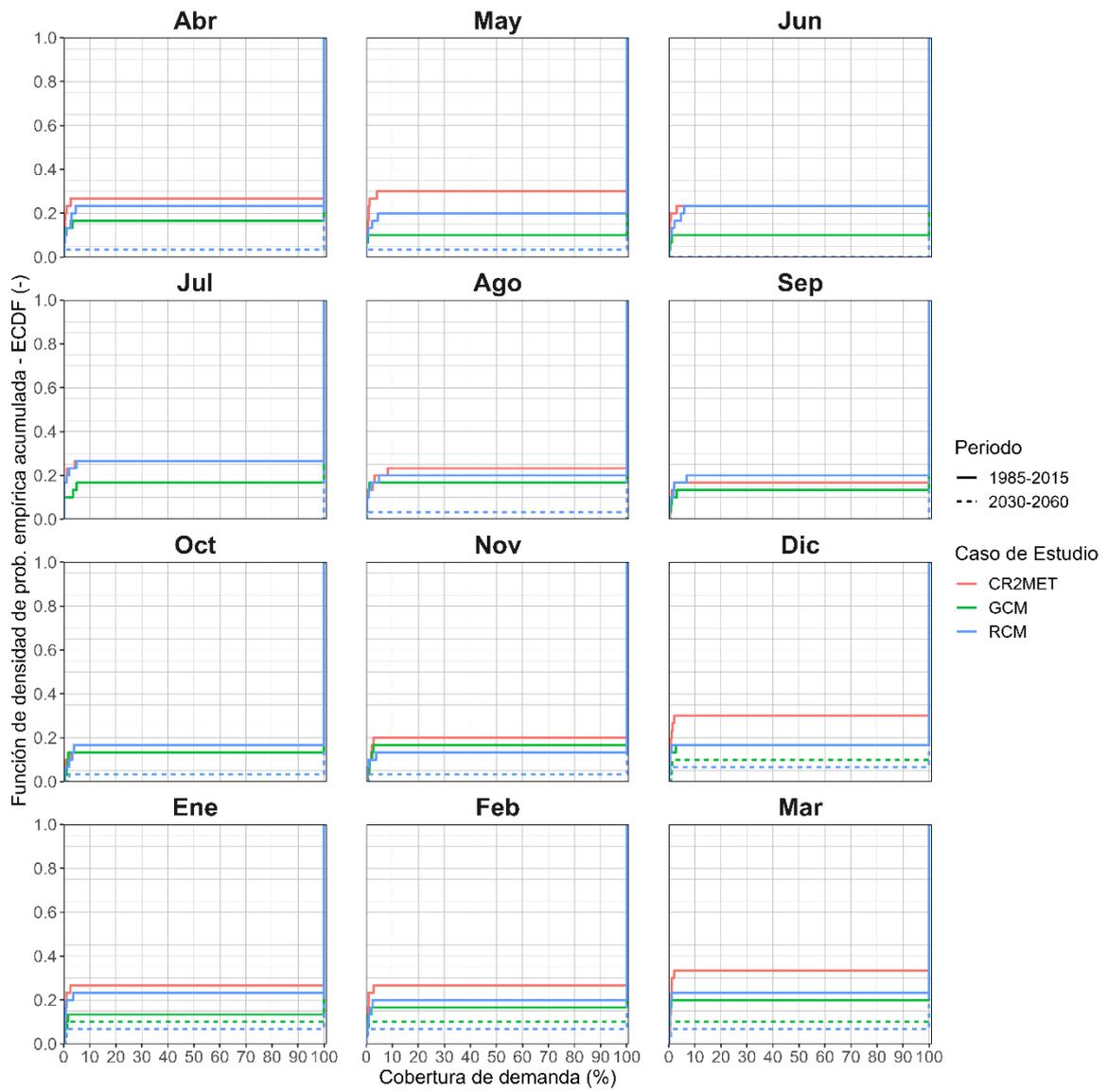


Figura C.3: Curva de probabilidad acumulada para satisfacción de demanda a nivel mensual para el nodo de demanda AP_PAM02.

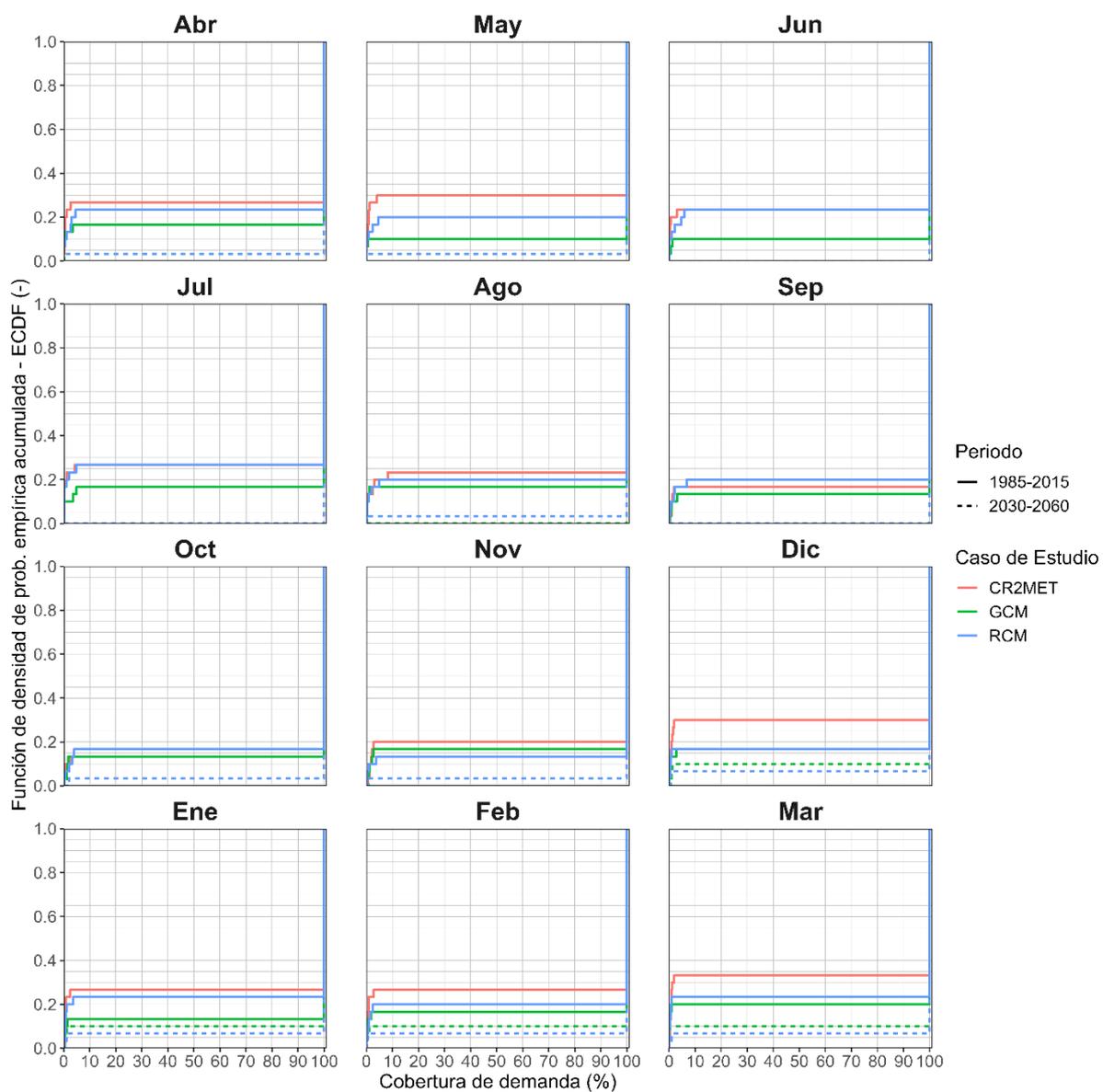


Figura C.4: Curva de probabilidad acumulada para satisfacción de demanda a nivel mensual para el nodo de demanda AP_COM01.

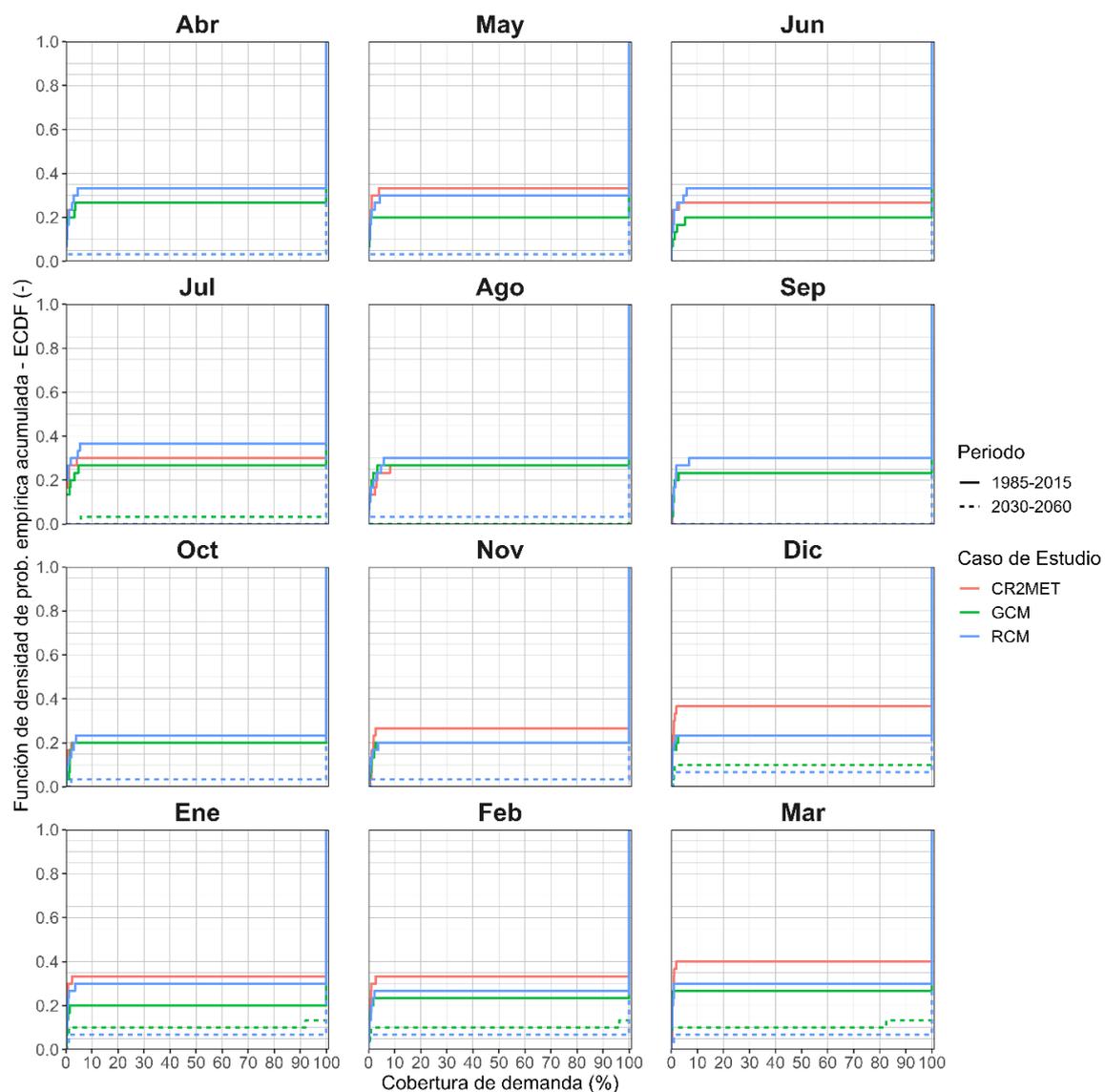


Figura C.5: Curva de probabilidad acumulada para satisfacción de demanda a nivel mensual para el nodo de demanda ET_AC_COM01.

ANEXO D: PROYECCIONES DE SEQUÍA Y PARÁMETROS PARA SU CARACTERIZACIÓN

Para la caracterización de sequías, se presenta la definición reportada en la literatura de distintos parámetros que permiten entender su comportamiento:

Tabla D.1: Parámetros de caracterización de sequías.

Parámetro	Definición
Magnitud	Déficit medio de precipitación o caudal durante el evento seco.
Duración	Tiempo (N° total de días, meses o años consecutivos) durante el cual la precipitación o caudal total registrados son inferiores a la precipitación o caudal medio de ese mismo período.
Frecuencia	Número de casos que se producen durante un determinado período.
Velocidad de implantación	Tiempo transcurrido entre el inicio de déficit de precipitación o caudal, y el momento en que tal déficit alcanza su valor máximo.
Espaciamiento temporal	Tiempo transcurrido entre diversos períodos secos. Éste proporciona una medida de la regularidad o aleatoriedad del fenómeno.
Extensión	Superficie total en la cual se registra déficit hídrico.
Dispersión espacial	Medida del grado de difusión o concentración de la anomalía de caudal o de precipitaciones.

De manera complementaria a lo reportado en el cuerpo del presente informe, las Figuras D.1 a D.4 muestran una estimación de la frecuencia de sequías para el periodo histórico y futuro, así como la cantidad de eventos que acumulan una condición persistente de sequía por un tiempo igual o superior a los 12 meses. Dichas figuras permiten analizar, además de la magnitud de los cambios, el patrón espacial que exhiben los índices de sequía evaluados. Allí se observa, por ejemplo, que para el futuro, la sequía hidrológica (Figura D.1) tendría una mayor frecuencia en la parte alta de la cuenca, lo cual se podría atribuir a la disminución en la acumulación nival originada por los aumentos de temperatura y, por tanto, un menor volumen de deshielo disponible para mantener los caudales mínimos durante el verano. Por otra parte, la Figura D.5 a D.7 permiten visualizar en términos de “serie de tiempo” (filas) la magnitud asociada a los índices SPI, SPEI y SRI a nivel de URH y cuenca (columnas).

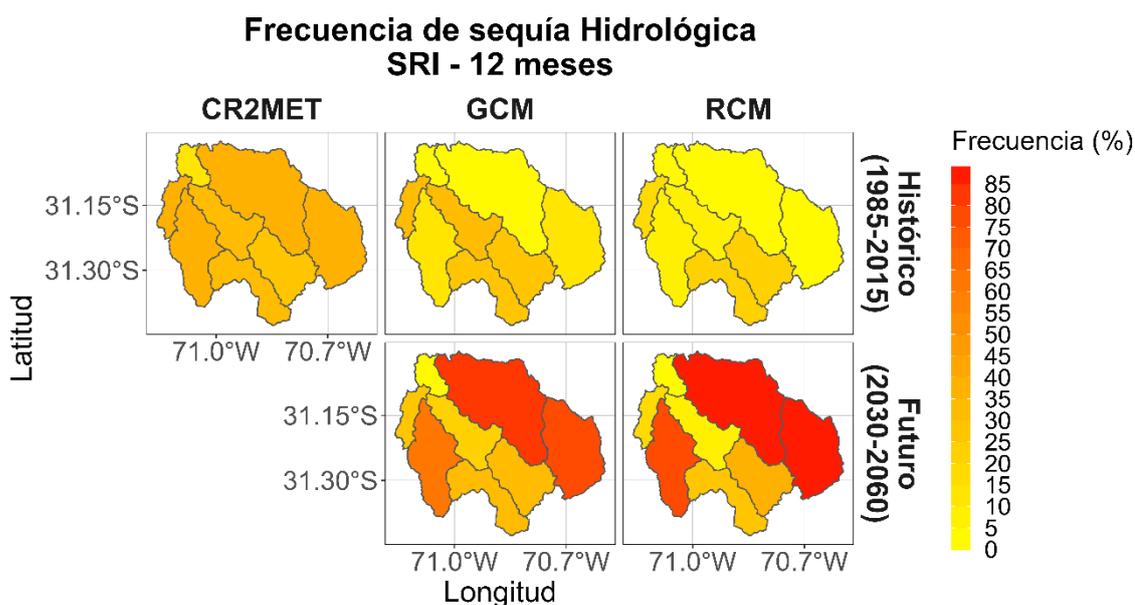


Figura D.1: Frecuencia de sequía meteorológica por URH para el índice SRI – 12 meses. Colores cercanos a amarillo indican frecuencias bajas, mientras que colores cercanos a rojo hacen alusión a frecuencias elevadas.

**Número de eventos de sequía Hidrológica
con duración mayor o igual a 12 meses [SRI - 12 meses]**

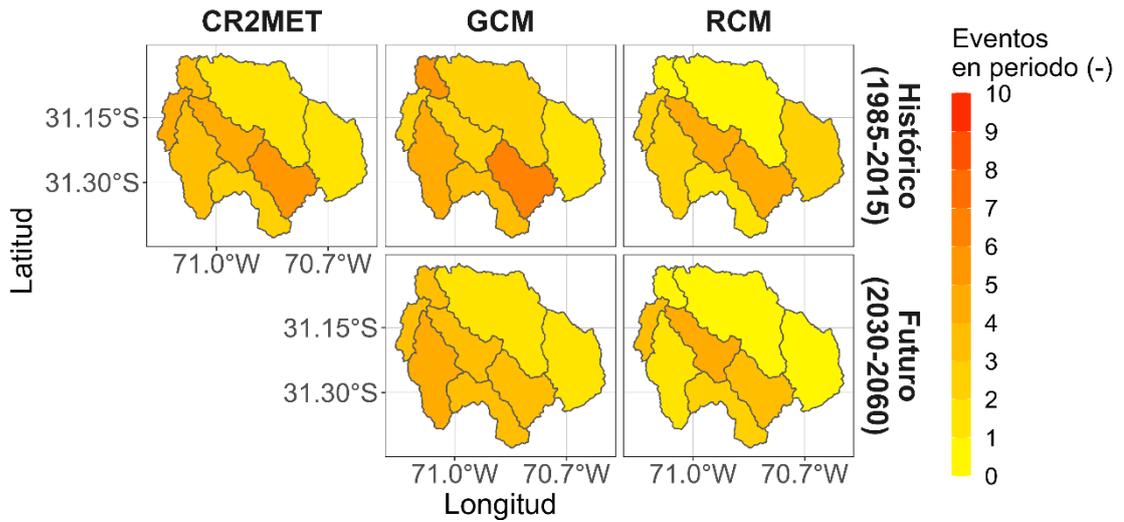


Figura D.2: Número de eventos de sequía meteorológica con duración mayor o igual a 12 meses. Resultados se ven por URH para el índice SRI – 12 meses. Colores cercanos a amarillo indican frecuencias bajas, mientras que colores cercanos a rojo hacen alusión a frecuencias elevadas.

**Frecuencia de sequía Agrícola
SSI - 12 meses**

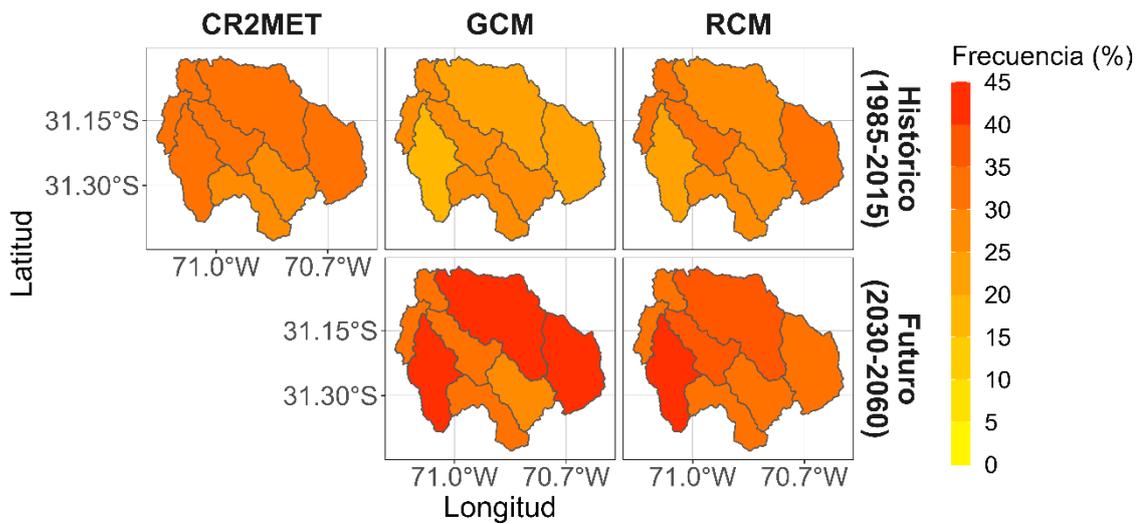


Figura D.3: Frecuencia de sequía meteorológica por URH para el índice SSI – 12 meses. Colores cercanos a amarillo indican frecuencias bajas, mientras que colores cercanos a rojo hacen alusión a frecuencias elevadas.

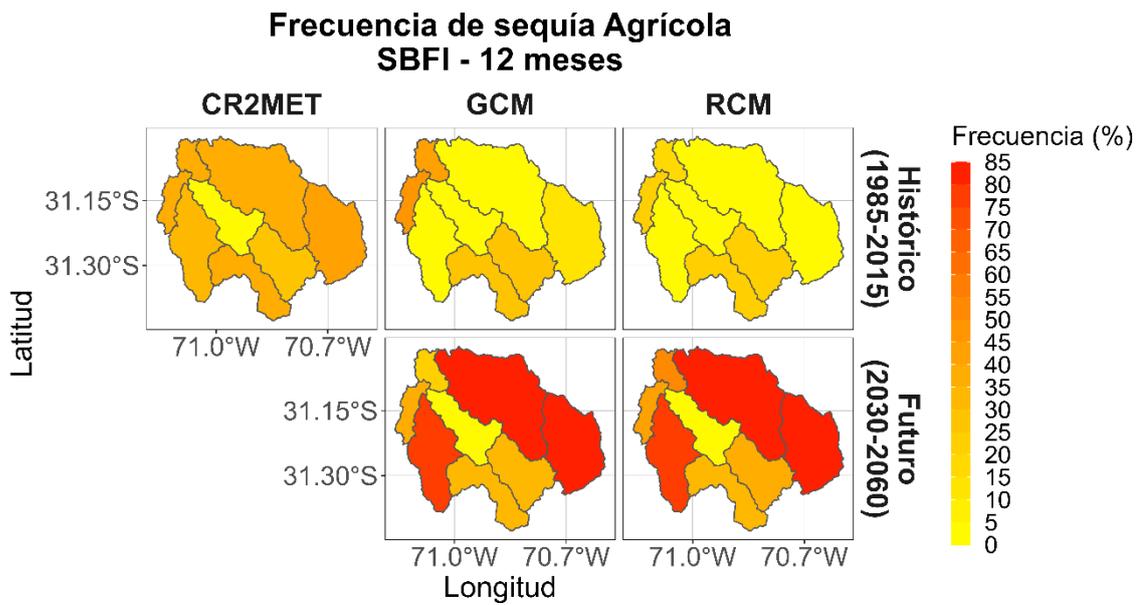


Figura D.4: Frecuencia de sequía meteorológica por URH para el índice SBFI – 12 meses. Colores cercanos a amarillo indican frecuencias bajas, mientras que colores cercanos a rojo hacen alusión a frecuencias elevadas.

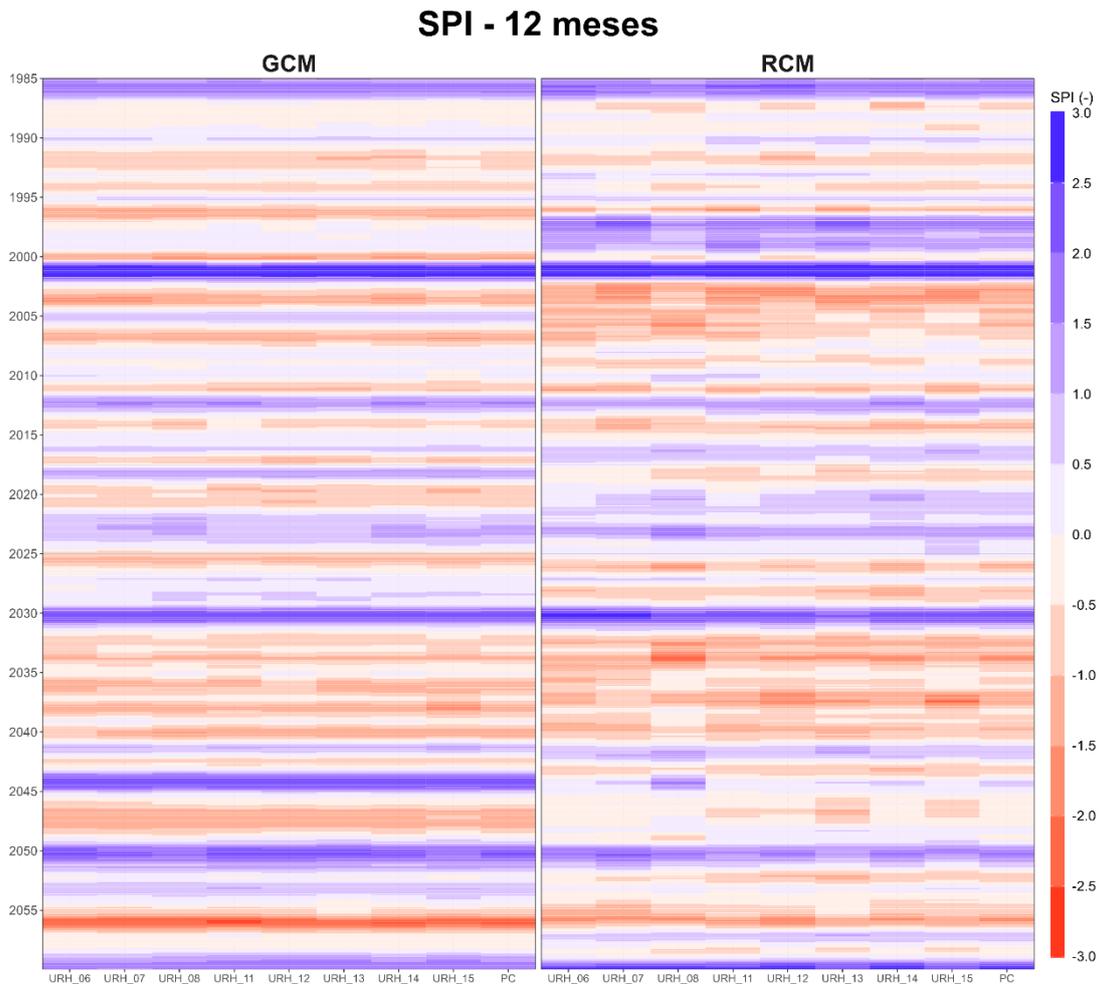


Figura D.5: Mapa de calor de la serie completa por URH para el índice SPI-12 meses. Valores cercanos a -3 (en rojo) indican un estado de sequía excepcional, mientras que valores cercanos a 3 (en azul) señalan períodos húmedos. La columna PC representa los resultados a promedio de cuenca.

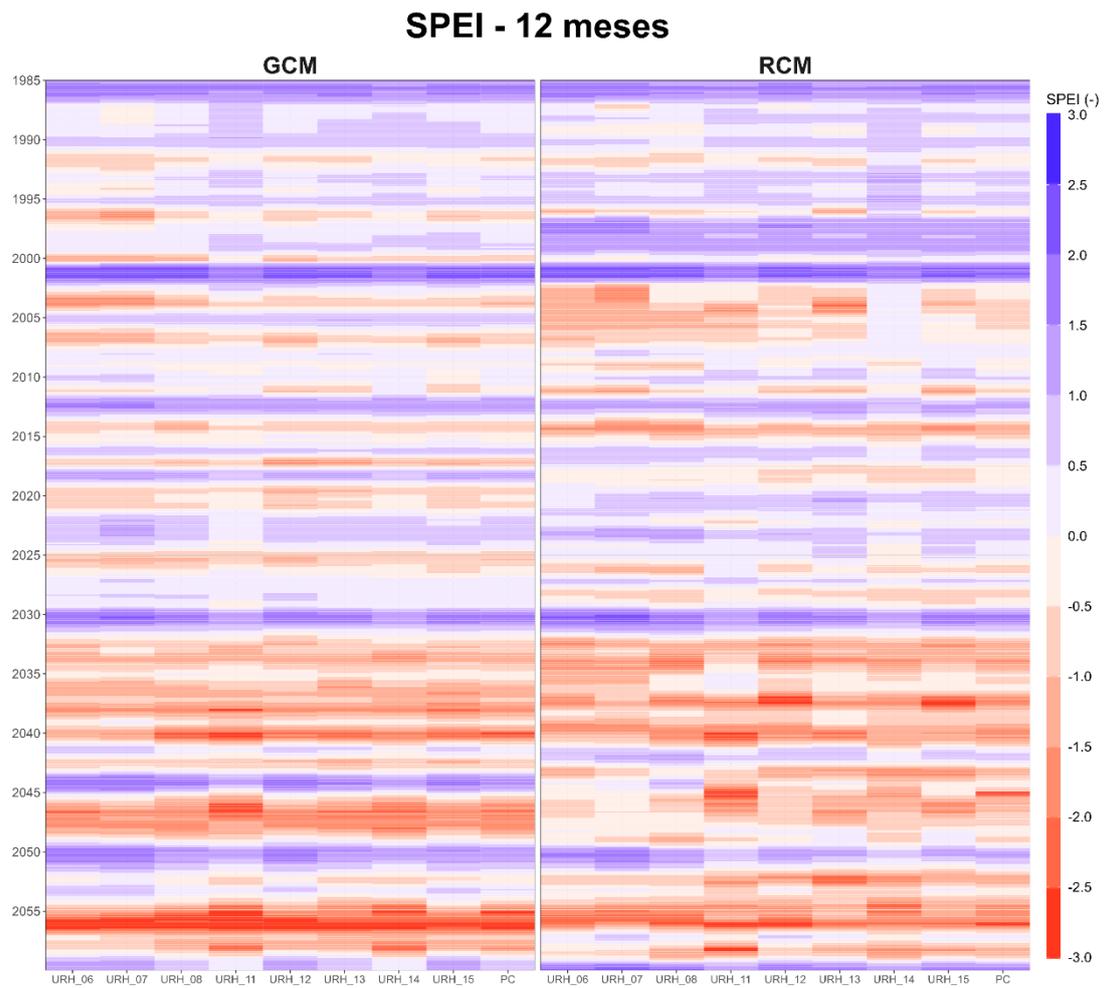


Figura D.6: Mapa de calor de la serie completa por URH para el índice SPEI-12 meses. Valores cercanos a -3 (en rojo) indican un estado de sequía excepcional, mientras que valores cercanos a 3 (en azul) señalan períodos húmedos. La columna PC representa los resultados a promedio de cuenca.

SRI - 12 meses

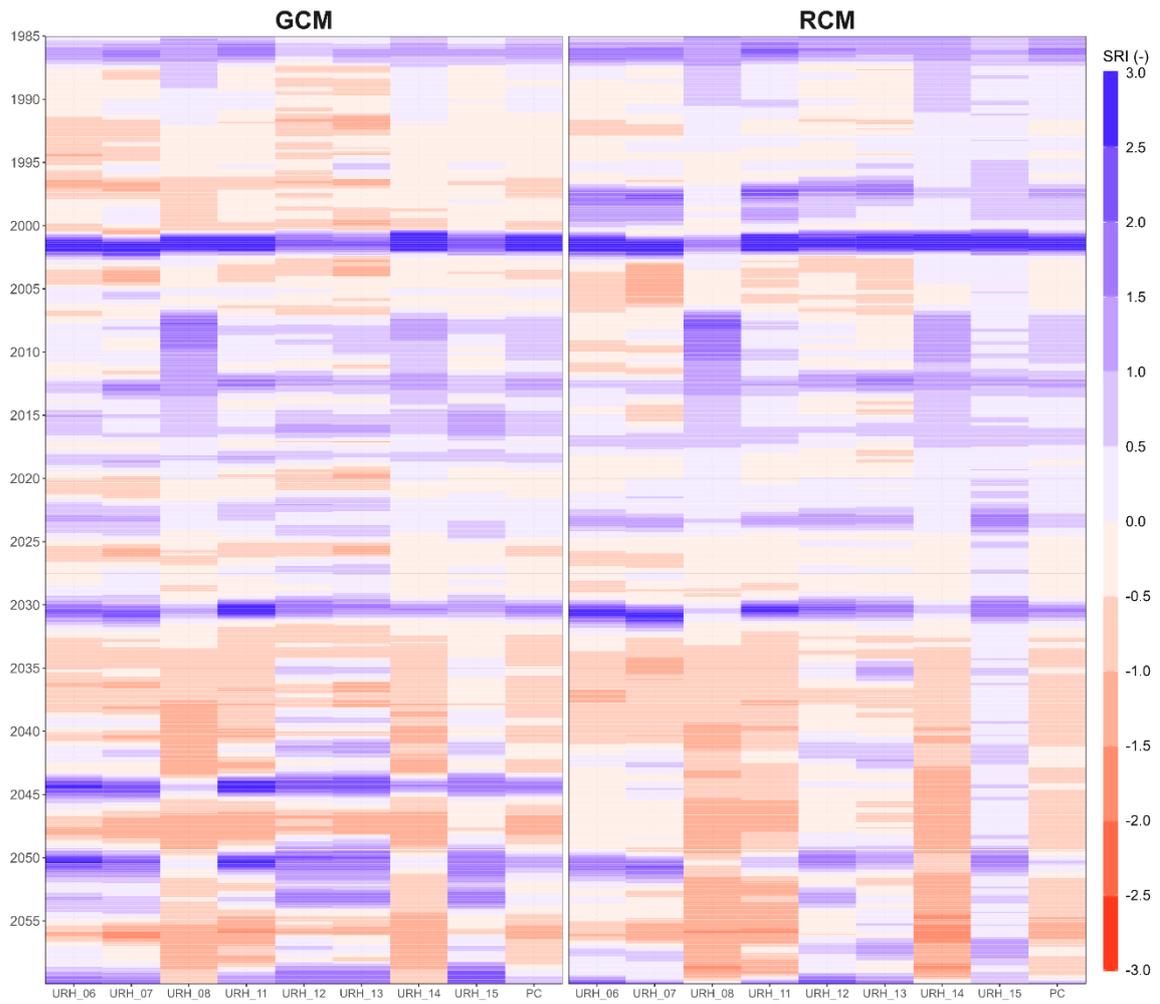


Figura D.7: Mapa de calor de la serie completa por URH para el índice SRI-12 meses. Valores cercanos a -3 (en rojo) indican un estado de sequía excepcional, mientras que valores cercanos a 3 (en azul) señalan períodos húmedos. La columna PC representa los resultados a promedio de cuenca.

ANEXO E: CORRELACIÓN ENTRE ÍNDICES DE SEQUÍA METEOROLÓGICA, HIDROLÓGICA Y AGRÍCOLA CON ÍNDICES CLIMÁTICOS

Con el objetivo de estudiar la correlación existente entre los índices de sequía meteorológica, hidrológica y agrícola estimados para la cuenca de estudio y algunos modos de variabilidad climática global que modulan el clima en Chile como, por ejemplo, El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) (DGA, 2017), se utilizan índices estandarizados y variables mensuales obtenidas de la base de datos del Laboratorio de Ciencias Físicas del NOAA (<https://psl.noaa.gov/data/correlation/>). En particular, se utilizan los índices que se describen a continuación:

- **SOI - *Southern Oscillation Index***: Índice estandarizado que mide la diferencia de presión a nivel del mar entre Tahití y Darwin para caracterizar el fenómeno de El Niño/La Niña y su magnitud.
- **Niño 3.4 – *East Central Tropical Pacific SST***: Temperatura superficial del mar promedio registrada en el cuadrante oceánico definido por las coordenadas 5°N-5°S y 170°O-120°O.
- **MEI – *Multivariate ENSO Index***: Índice estandarizado multivariado que da cuenta del fenómeno ENSO, combinando múltiples componentes meteorológicas y oceanográficas en su estimación.
- **PDO – *Pacific Decadal Oscillation***: Índice del patrón de variabilidad climática del Pacífico relacionado con El Niño de larga duración. Se deriva de las componentes principales de la anomalía de temperatura superficial del mar en el Océano Pacífico Norte.

A modo de facilitar el estudio de las correlaciones, se realiza el análisis de los índices descritos anteriormente agrupados según las siguientes escalas temporales antecedentes al periodo de estudio las que, a su vez, son características en Chile central:

- **Año hidrológico**: corresponde al periodo comprendido entre abril de un cierto año y marzo del año siguiente (i.e., abril a marzo).
- **Temporada otoño**: corresponde al periodo comprendido entre abril y junio (i.e., primer trimestre del año hidrológico).
- **Temporada invierno**: corresponde al periodo comprendido entre julio y septiembre (i.e., segundo trimestre del año hidrológico). Periodo donde, en general, se concentran las precipitaciones en Chile central.
- **Temporada primavera**: corresponde al periodo comprendido entre octubre y diciembre (i.e., tercer trimestre del año hidrológico).
- **Temporada verano**: corresponde al periodo comprendido entre enero y marzo (i.e., cuarto trimestre del año hidrológico).
- **Temporada otoño-invierno**: corresponde al periodo comprendido entre abril y septiembre (i.e., primer semestre del año hidrológico). Periodo donde, en general, se concentran las precipitaciones en la zona central de Chile.
- **Temporada primavera-verano**: corresponde al periodo comprendido entre octubre y marzo (i.e., segundo semestre del año hidrológico). Periodo donde, en general, ocurre el derretimiento del manto nival y deshielo glaciar.

A partir de los índices asociados al ENOS definidos para realizar la correlación respecto a los índices de sequía estimados a escala de cuenca en el periodo 1985-2015 (i.e., periodo histórico de referencia en la modelación hidrológica), en la Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5 se presentan los resultados asociados a sequía meteorológica, agrícola e hidrológica. Cabe mencionar que la significancia estadística de las correlaciones, definida al 5%, se representa mediante el símbolo “*” acompañando la magnitud de la correlación reportada.

Tabla E.1: Correlación entre índices climáticos e índice SPI – 12 meses.

Índice	Año Hidrológico	Abr-Jun	Jul-Sep	Oct-Dic	Ene-Mar	Abr-Sep	Oct-Mar
SOI	-0,33	-0,46*	-0,25	-0,16	-0,32	-0,37	-0,26
Niño 3.4	0,42*	0,34	0,48*	0,36*	0,35	0,47*	0,36*
MEI	0,46*	0,39*	0,46*	0,38*	0,39*	0,48*	0,39*
PDO	-0,25	-0,23	0,03	-0,16	-0,38	-0,13	-0,32

Tabla E.2: Correlación entre índices climáticos e índice SPEI – 12 meses.

Índice	Año Hidrológico	Abr-Jun	Jul-Sep	Oct-Dic	Ene-Mar	Abr-Sep	Oct-Mar
SOI	-0,12	-0,25	-0,05	0,03	-0,18	-0,15	-0,09
Niño 3.4	0,21	0,17	0,26	0,15	0,19	0,24	0,17
MEI	0,24	0,24	0,24	0,18	0,21	0,27	0,20
PDO	-0,18	-0,22	0,04	-0,02	-0,35	-0,11	-0,20

Tabla E.3: Correlación entre índices climáticos e índice SSI – 12 meses.

Índice	Año Hidrológico	Abr-Jun	Jul-Sep	Oct-Dic	Ene-Mar	Abr-Sep	Oct-Mar
SOI	-0,13	-0,32	-0,05	-0,01	-0,14	-0,18	-0,08
Niño 3.4	0,25	0,27	0,30	0,22	0,17	0,32	0,20
MEI	0,29	0,36*	0,29	0,21	0,19	0,36*	0,20
PDO	-0,12	-0,18	0,12	-0,08	-0,23	-0,04	-0,18

Tabla E.4: Correlación entre índices climáticos e índice SBFI – 12 meses.

Índice	Año Hidrológico	Abr-Jun	Jul-Sep	Oct-Dic	Ene-Mar	Abr-Sep	Oct-Mar
SOI	0,02	-0,23	0,10	0,07	0,06	-0,05	0,06
Niño 3.4	-0,14	-0,04	-0,12	-0,15	-0,15	-0,09	-0,15
MEI	0,00	0,26	-0,06	-0,05	-0,08	0,09	-0,07
PDO	0,14	-0,12	0,42*	0,12	-0,09	0,18	0,04

Tabla E.5: Correlación entre índices climáticos e índice SRI – 12 meses.

Índice	Año Hidrológico	Abr-Jun	Jul-Sep	Oct-Dic	Ene-Mar	Abr-Sep	Oct-Mar
SOI	-0,10	-0,39	0,00	0,03	-0,06	-0,19	-0,02
Niño 3.4	0,07	0,14	0,13	0,04	0,00	0,15	0,02
MEI	0,21	0,41*	0,18	0,12	0,08	0,32	0,10
PDO	0,02	-0,16	0,29	0,01	-0,13	0,08	-0,06

Los resultados muestran que, si bien las correlaciones son débiles ($r \leq 0,5$), la mayor parte de los índices de sequía se correlaciona con los índices climáticos estimados para el periodo pluvial (i.e., entre abril y septiembre). La correlación de mayor magnitud se reporta para el SPI, el cual para el periodo julio-septiembre reporta un coeficiente de correlación de Pearson igual a 0,48 al compararse con la temperatura superficial del mar (SST) en el cuadrante del Niño 3.4. Lo anterior resulta coherente con lo reportado en la literatura donde se vincula la ocurrencia de años Niño (i.e., con SST por sobre el promedio) a una mayor disponibilización de agua en la atmósfera que, potencialmente, podría ser transportada al continente y traducirse en mayores precipitaciones en Chile continental. Respecto al resto de los índices de sequía se desprende lo siguiente:

- Para el SPEI la mayoría de las correlaciones son marginales y, asimismo, no resultan ser estadísticamente significativas al 5% de significancia estadística.
- Tanto el SSI como el SRI muestran una correlación cercana a 0,4 y estadísticamente significativa respecto al índice climático MEI promedio entre abril-junio. En términos

prácticos, esto sugiere que la fase fría del ENSO (i.e., periodo Niña) en el periodo abril-junio podría acentuar la ocurrencia de sequía agrícolas y meteorológicas.

- En relación al SBFI, se tiene una correlación positiva con la PDO promedio para los meses de julio-septiembre, lo cual da cuenta de la respuesta a largo plazo que tiene el flujo base ante cambios en la precipitación y, por tanto, las tasas de infiltración a escala de cuenca durante años secos/húmedos.

En síntesis, los resultados reportados dan cuenta de una cierta correlación entre índices climáticos vinculados al ENOS y la magnitud de sequías de tipo meteorológica, agrícola e hidrológica en la cuenca de estudio.