



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

**ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN TEMPORAL DE LA OFERTA HÍDRICA EN
LAS CUENCAS DE PUNTA ARENAS Y VERTIENTES DEL ATLÁNTICO
BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO (2021-2050)**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

PATRICIA VALENTINA MEJÍAS ROJAS

PROFESOR GUÍA:
FELIPE ORELLANA MARTÍNEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA
SERGIO DUARTE MORALES

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
Hídrica Consultores Ltda.

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
POR: PATRICIA VALENTINA MEJÍAS ROJAS
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: FELIPE ORELLANA MARTINEZ

ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN TEMPORAL DE LA OFERTA HÍDRICA EN LAS CUENCAS DE PUNTA ARENAS Y VERTIENTES DEL ATLÁNTICO BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO (2021-2050)

La influencia del cambio climático en el ciclo hidrológico es un tema ampliamente estudiado en la actualidad, puesto que los impactos en la variación de temperatura, precipitaciones y otras variables hidrometeorológicas juegan un papel protagónico en la disponibilidad del recurso hídrico. En este contexto, el presente trabajo de título tiene como objetivo analizar la variación temporal de la oferta y cobertura de demanda de las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico bajo distintos escenarios y modelos de cambio climático en el periodo 2021-2050. La metodología empleada se basó en la utilización de un modelo hidrológico superficial integrado a un modelo subterráneo en la ventana 1991-2020, al cual se le incorporó la información de forzantes meteorológicas a partir de dos Modelos de Circulación General (MCG), en los escenarios de emisiones RCP 8,5 y RCP 6,0. Como resultados de este trabajo se obtienen proyecciones de precipitación y temperatura del proyecto CMIP5, forzantes que fueron escaladas estadísticamente mediante el método MBCn, además de la simulación de la escorrentía y cobertura de demanda en la zona de estudio para los cuatro casos de proyección.

A partir de las proyecciones realizadas, la precipitación se estima podría aumentar entre un 2,5 y un 8,5 %, y por su parte, las temperaturas medias podrían aumentar entre un 1,2 a 1,6 °C en la zona. En cuanto a la disponibilidad hídrica, se identificó un posible incremento en la escorrentía para los cuatro casos de simulación futura evaluados, en los que se logra un aumento de entre el 0,7 % y el 7,8 % promedio anual, respecto de los 146 mm anuales alcanzados para el periodo histórico, manteniendo en todos los casos evaluados la tendencia futura de alza en los meses de agosto a octubre, seguida del alza en los meses de abril y mayo, donde además, existe la tendencia a un aumento en los montos de caudales de eventos extremos y una disminución en los caudales de mayor probabilidad de excedencia. Respecto a la cobertura de demanda, se proyecta una demanda insatisfecha de entre 23,7 a 27,4 $hm^3/año$ promedio, en la que los meses de noviembre y diciembre presentarían baja cobertura principalmente debido a la alta demanda considerada y la baja escorrentía estimada en esos meses del año; siendo los sectores de Río Tres Brazos y Río Pescado los que se espera presenten las mayores dificultades para satisfacer el consumo proyectado.

En conclusión, en las cuencas de estudio se esperan aumentos considerables de precipitación, temperatura; y con ello incrementos en la escorrentía simulada; sin embargo, sería insuficiente para satisfacer el escenario de demanda considerado independiente de cualquiera de los cuatro casos futuros evaluados.

Agradecimientos

En el fin de esta etapa, me gustaría agradecer a mi hija Isabella, por su amor incondicional, y cada risa, abrazo y caricia que me entrega día a día. También agradecer mis padres, que me han dado su apoyo en todos mis momentos importantes. A mi hermana, que siempre me desea lo mejor.

A tod@s quienes me han escuchado y acompañado en mis buenos y malos momentos. Pero por sobre todo quienes me han sacado una sonrisa y dejado el corazón llenito estos últimos meses: mi equipo cowork Greenland, Constanza y Franco; el mejor compañero de series y películas en pandemia Fabián Ortiz; el integrante del dúo dinámico Ignacio (Ozunacho); mis queridísimos amigos Enzo y Felipe (Gato); y a los K, que saben que adoro con todo mi corazón.

Agradecer también a Hídrica Consultores por darme la oportunidad de realizar de manera conjunta el trabajo y el desenlace de mi trabajo de título, particularmente a quienes me guiaron: Felipe y Sergio, pero también a cada integrante de la empresa con quien tuve oportunidad de compartir. También quiero agradecer a cada uno de los docentes que me formaron en mi etapa universitaria, en especial al profesor Miguel Lagos, por todo lo que he aprendido de él en el área hidrológica y su apoyo y consejos en el desarrollo de este trabajo.

Finalmente quiero agradecer a Alonso, por creer en mí, y entregarme siempre todo su amor y apoyo.

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. Resultados esperados	3
2. Recopilación de antecedentes	4
2.1. Modelos de Circulación General (MCG)	4
2.1.1. Descripción MCG	5
2.1.2. Métodos de escalamiento	6
2.2. Modelación hidrológica	7
2.2.1. Modelo hidrológico WEAP	8
2.2.2. Acople modelo subterráneo MODFLOW	9
2.3. Forzantes meteorológicas	9
2.3.1. Reanálisis atmosférico ERA5	9
2.3.2. Producto grillado CR2MET	10
3. Antecedentes	11
3.1. Descripción de la zona de estudio	11
3.1.1. Ubicación	11
3.1.2. Demografía	13
3.1.3. Estaciones de registro	13
3.1.4. Demandas	18
3.2. Modelo hidrológico WEAP de PEGH Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (DGA, 2021)	21
3.2.1. Demandas	22
3.2.2. Métricas de evaluación del modelo	24
4. Metodología	28
4.1. Forzantes meteorológicas	29
4.1.1. Análisis gráfico	29
4.1.2. Análisis estadístico	29
4.2. Escalamiento estadístico	31
4.2.1. Escalamiento espacial	32
4.2.2. Escalamiento temporal	32
4.3. Simulación de procesos hidrológicos	33

5. Resultados	37
5.1. Análisis de forzantes	37
5.1.1. Precipitación	37
5.1.2. Temperatura	41
5.2. Modelo CSIRO RCP 8,5	44
5.3. Periodo histórico	47
5.4. Periodo futuro	51
5.4.1. Forzantes y escorrentía	52
5.4.2. Cobertura de demanda	57
6. Conclusiones	64
Bibliografía	68
Anexos	72
A. Proyecto CMIP5	72
B. Elementos WEAP	76
C. Métricas de evaluación del modelo hidrológico	80
D. Análisis de precipitación	88
E. Análisis de temperatura	103
F. Resultados Modelo WEAP-MODFLOW	107

Índice de Tablas

3.1.	Superficie de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico respecto a las comunas dentro del territorio chileno (Adaptado de DGA, 2021, basado en información IDE, 2019).	13
3.2.	Población residente de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (Adaptado de DGA, 2021, basado en información INE, 2017).	13
3.3.	Estaciones de precipitación presentes en las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico.	14
3.3.	Estaciones de precipitación presentes en las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico.	15
3.4.	Estaciones de temperatura presentes en las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico.	16
3.5.	Estaciones fluviométricas presentes en las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico.	17
3.6.	Nodos de demanda según uso.	22
3.7.	Estadígrafos y caudales de calibración del modelo superficial. Fuente: DGA (2021).	26
4.1.	Resumen de variables a evaluar en el diagnóstico.	29
4.2.	Descripción de los Modelos de Circulación General seleccionados.	32
4.3.	Extensión de la zona de estudio adoptada. Sistema de referencia WGS84 H19.	32
5.1.	Caracterización escenarios de proyección implementados en WEAP bajo distintos métodos de escalamiento.	45
5.2.	Precipitación, temperatura y escorrentía simulada promedio según escenario de proyección (2021-2050).	53
5.3.	Variación de precipitación, temperatura y escorrentía simulada promedio según escenario de proyección (2021-2050) respecto del promedio histórico (1991-2020).	53
5.4.	Demanda insatisfecha anual promedio en el periodo futuro (2021-2050).	63
A.1.	Descripción MCG pertenecientes al proyecto CMIP5 (Adaptado de Barria et al., 2017).	72
A.1.	Descripción MCG pertenecientes al proyecto CMIP5.	73
A.1.	Descripción MCG pertenecientes al proyecto CMIP5.	74
A.1.	Descripción MCG pertenecientes al proyecto CMIP5.	75
A.1.	Descripción MCG pertenecientes al proyecto CMIP5.	76
B.1.	Descripción Elementos Catchment.	76
B.1.	Descripción Elementos Catchment.	77
B.1.	Descripción Elementos Catchment.	78
B.2.	Descripción Elementos river.	78
B.2.	Descripción Elementos river.	79
C.1.	Estaciones fluviométricas utilizadas como elemento de calibración.	80

D.1.	Resumen indicadores obtenidos producto grillado CR2MET (v2.0). Precipitación acumulada mensual.	88
D.1.	Resumen indicadores obtenidos producto grillado CR2MET (v2.0). Precipitación acumulada mensual.	89
E.1.	Resumen indicadores obtenidos producto grillado CR2MET (v2.0). Temperatura media mensual.	103
F.1.	Precipitación anual promedio histórico (1991-2020) y futuro (2021-2050) para los diferentes escenarios de proyección.	107
F.1.	Precipitación anual promedio histórico (1991-2020) y futuro (2021-2050) para los diferentes escenarios de proyección.	108
F.2.	Escorrentía anual promedio histórico (1991-2020) y futuro (2021-2050) para los diferentes escenarios de proyección.	108
F.2.	Escorrentía anual promedio histórico (1991-2020) y futuro (2021-2050) para los diferentes escenarios de proyección.	109

Índice de Figuras

3.1.	Distribución e hidrografía Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico. Fuente: DGA (2021).	12
3.2.	Distribución del tipo de uso de las demandas consuntivas al año 2020 en la cuenca de Punta Arenas. Fuente: DGA (2021).	20
3.3.	Distribución del tipo de uso de las demandas consuntivas al año 2020 en la cuenca de Vertientes del Atlántico. Fuente: DGA (2021).	20
3.4.	Unidades hidrológicas en la cuenca de Punta Arenas. Fuente: DGA (2021). . .	21
3.5.	Unidades hidrológicas en la cuenca de Vertientes del Atlántico. Fuente: DGA (2021).	22
3.6.	Demanda total anual considerada en el periodo de análisis (1991-2050) para las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico).	23
3.7.	Comparación demanda mensual promedio entre periodo histórico y periodo futuro.	24
3.8.	Estaciones fluviométricas de calibración en la cuenca de Punta Arenas. Fuente: DGA (2021).	25
3.9.	Estaciones fluviométricas de calibración en la cuenca de Vertientes del Atlántico. DGA (2021).	25
3.10.	Gráfico y métricas de evaluación estación de calibración Penitente en Morro Chico. Fuente: DGA (2021).	27
4.1.	Diagrama de flujo de metodología	28
4.2.	Esquema gráfico modelo WEAP. AUTOR: Ayala (2011), modificado a partir de Guía de Uso WEAP.	34
5.1.	Índices r^2 , KGE y NSE del análisis de series simuladas de precipitación respecto a observaciones DGA (Tabla 3.3).	38
5.2.	Índice PBIAS del análisis de series simuladas de precipitación respecto a observaciones DGA (Tabla 3.3).	38
5.3.	Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Punta Arenas.	40
5.4.	Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Villa Tehuelche.	41
5.5.	Índices r^2 , KGE y NSE del análisis de series simuladas de temperatura respecto a observaciones DGA (Tabla 3.4).	42
5.6.	Índice PBIAS del análisis de series simuladas de temperatura respecto a observaciones DGA (Tabla 3.4).	42
5.7.	Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Punta Arenas.	43
5.8.	Proyección mensual y anual de precipitación de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (abr 2020 - mar 2050).	45

5.9.	Proyección mensual y anual de temperatura de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (abr 2020 - mar 2050).	46
5.10.	Proyección estacional de precipitación y temperatura de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (abr 2020 - mar 2050).	47
5.11.	Serie anual de precipitación, escorrentía y temperatura de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (abr 1990 - mar 2020).	48
5.12.	Estacionalidad de precipitación, escorrentía y temperatura de las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (abr 1990 - mar 2020).	49
5.13.	Cobertura porcentual de demanda a nivel mensual de las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (abr 1990 - mar 2020).	50
5.14.	Cobertura porcentual de demanda promedio mensual de las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (abr 1990 - mar 2020).	50
5.15.	Ciclo anual de precipitación de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico. Líneas grises corresponden a proyecciones individualizadas de cada conjunto de proyección.	51
5.16.	Ciclo anual de temperatura media de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico. Líneas grises corresponden a proyecciones individualizadas de cada conjunto de proyección.	52
5.17.	Serie anual de precipitación, escorrentía y temperatura de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (abr 2020 - mar 2050).	53
5.18.	Estacionalidad de precipitación, escorrentía y temperatura de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (abr 2020 - mar 2050).	55
5.19.	Curva de duración de caudales medios para las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico.	56
5.20.	Cobertura porcentual de demanda a nivel mensual bajo MCG CSIRO (abr 2020 - mar 2050).	58
5.21.	Cobertura porcentual de demanda a nivel mensual bajo MCG CCSM4 (abr 2020 - mar 2050).	59
5.22.	Cobertura porcentual de demanda mensual promedio bajo MCG CSIRO (abr 2020 - mar 2050).	60
5.23.	Cobertura porcentual de demanda mensual promedio bajo MCG CCSM4 (abr 2020 - mar 2050).	61
5.24.	Comparación demanda mensual insatisfecha promedio entre periodo histórico y periodo futuro bajo los distintos casos de proyección.	62
C.1.	Gráfico y métricas de evaluación estación de calibración Río Rubens en Ruta N9. Fuente: DGA (2021).	81
C.2.	Gráfico y métricas de evaluación estación de calibración Penitente en Morro Chico. Fuente: DGA (2021).	82
C.3.	Gráfico y métricas de evaluación estación de calibración Río Ci-Aike antes Frontera. Fuente: DGA (2021).	83
C.4.	Gráfico y métricas de evaluación estación de calibración Río Las Minas en BT. Sendos. Fuente: DGA (2021).	84
C.5.	Gráfico y métricas de evaluación estación de calibración Río Tres Brazos antes BT. Sendos. Fuente: DGA (2021).	85
C.6.	Gráfico y métricas de evaluación estación de calibración Río San Juan en Desembocadura. Fuente: DGA (2021).	86

C.7.	Gráfico y métricas de evaluación estación de calibración Río La Caleta en Seno Otway. Fuente: DGA (2021).	87
C.8.	Gráfico y métricas de evaluación estación de calibración Río Grande en Seno Otway. Fuente: DGA (2021).	88
D.1.	Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Bitsch Alto.	90
D.2.	Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Canal de Traslase Estero Llau-Llau y Cerro Mirador.	91
D.3.	Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Canal de Traslase Estero Lago Parrillar y Laguna Lynch.	92
D.4.	Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Las Minas y Leñadura Alta.	93
D.5.	Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Magdalena Giglio 2 y Monte Aymond.	94
D.6.	Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Canal de Ohiggins Villa y Penitente Alto.	95
D.7.	Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Punta Arenas y Río Las Minas en BT.	96
D.8.	Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Río Penitente en Morro Chico y Río Perez.	97
D.9.	Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Río Perez en Desembocadura y Río Rubens en Ruta N9.	98
D.10.	Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Río San Juan en Desembocadura y Río Verde.	99
D.11.	Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Rubens en Ruta N9 y San Gregorio.	100
D.12.	Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación San Juan y Teniente Merino.	101
D.13.	Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Villa Tehuelche.	102
E.1.	Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Monte Aymond.	103
E.2.	Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Ohiggins Villa y Punta Arenas.	104
E.3.	Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Río Perez y Río Perez en Desembocadura.	105
E.4.	Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Villa Tehuelche.	106

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

En la actualidad ha cobrado especial relevancia el complejo escenario global de la disponibilidad de agua, producto del agotamiento, contaminación y sobreexplotación del recurso asociado al desarrollo económico, el crecimiento de la población, e influencia del cambio climático, provocando una limitación en la disponibilidad de las aguas. Según proyecciones de Schlosser et al. (2014), para 2050 se proyecta que hasta un 52% la población mundial (5,0 billones de 9,7 billones de habitantes al 2050), podrían vivir bajo algún nivel de estrés hídrico.

Chile no es la excepción al contexto mencionado. Estudios denotan que producto del cambio climático, se presentaría a futuro una descenso en las precipitaciones a nivel centro-sur del país y un leve aumento de éstas en las zonas extremo norte-sur, y por otro lado, un cambio en las temperaturas que podrían significar un incremento de más de $+2$ °C en la temperatura media (Vicuña et al., 2021; Araya-Osses et al., 2020), lo que proyecta cambios en la acumulación de nieve, evapotranspiración y escorrentía, afectando la disponibilidad de agua (Vicuña et al., 2021).

Por otro lado, comparando lo estudiado por el Balance Hídrico Nacional (DGA, 1987) que comprende el periodo 1950-1980, respecto de su actualización (DGA, 2017) que comprende el periodo 1985-2015 se puede identificar el cambio de las condiciones hidrometeorológicas en distintas zonas del país. En el sector de las Macrozonas Norte y Centro se distinguen menores precipitaciones en toda la zona, y mayoritariamente un aumento en las temperaturas (aunque igualmente zonas frías en el sector desértico) respecto de lo estudiado anteriormente (DGA, 2018). En las Macrozonas Sur y Austral (parte Norte), (DGA, 2019a) se observa que existe un calentamiento principalmente en zonas cordilleranas junto a zonas con descensos en la temperatura media anual; y por su parte, la precipitación anual presentaría una disminución importante, que alcanza en promedio 866 mm menos respecto a lo estudiado en DGA (1987). Por su parte, el informe asociado a la parte Sur de la Macrozona Austral (DGA, 2019b) identifica un calentamiento promedio cercano de $0,4$ °C, con zonas de incremento y descenso; y en cuanto a la variación de precipitación anual, se observa una disminución de ésta, con leves aumentos en la parte extremo sur.

A partir de una encuesta aplicada por el Laboratorio Cambio Climático y Constituyente (2021) sobre las percepciones de la ciudadanía sobre cambio climático, un 86,6% respondió

estar “bastante preocupado(a)” o “muy preocupado(a)” por el cambio climático. A su vez, han percibido cambios en el sector, puesto que los(as) entrevistados(as) respondieron que en los últimos cinco años han notado cambios en las lluvias (25,4 %). Con ello, se hace énfasis en la variabilidad climática que se presenta en la zona Austral y la importancia de un análisis del cambio climático sobre el ciclo hidrológico a futuro, considerando que no se encuentran estudios de este tipo en las cuencas dentro de la región de Magallanes y la Antártica chilena, según los antecedentes revisados a la fecha.

Por otro lado, la Dirección General de Aguas (DGA) ha desarrollado múltiples estudios en diversas cuencas del país; como por ejemplo en las cuencas de Huasco (DGA, 2020a), Aconcagua (DGA, 2020b) y Maule (DGA, 2020c); consistentes en Planes Estratégicos de Gestión Hídrica (PEGH), con el objetivo de conocer la oferta y demanda histórica, actual y potencial de agua y establecer el balance hídrico y sus proyecciones a 30 años. Estos proyectos consideran diagnosticar la calidad de las aguas subterráneas y superficiales y un diagnóstico general respecto a la información, infraestructura e instituciones involucradas en la gestión del recurso hídrico, y una cartera de acciones que permitan suplir la demanda de agua y lograr adaptación al cambio climático. Particularmente, el presente estudio se desarrolló dentro del marco del PEGH de las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (DGA, 2021); el cual fue elaborado por la UTP:Hídrica-Eridanus; y espera contribuir al análisis de la disponibilidad del recurso hídrico bajo diferentes escenarios de cambio climático.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo es analizar la variación temporal de la disponibilidad hídrica en la cuenca de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico a través de la utilización de la herramienta WEAP, en el periodo 2021-2050, empleando las proyecciones de dos modelos de circulación general (MCG) en los escenarios RCP 6,0 y RCP 8,5.

1.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Evaluación de las series de precipitación y temperatura desde producto grillado CR2MET utilizando observaciones en superficie para evaluar la representatividad de ambas variables.
- Determinación de las proyecciones de precipitación y temperatura utilizando los dos modelos MCG, en escenarios RCP 8,5 y RCP 6,0, considerando el periodo 2021-2050.
- Cálculo y estudio de la disponibilidad hídrica y cobertura de la demanda en las cuencas de estudio para la situación actual y futura (2021-2050) a partir del modelo hidrológico WEAP.

1.3. Resultados esperados

Como resultados de este estudio se obtienen forzantes meteorológicas (precipitación y temperatura) escaladas de los modelos MCG CSIRO y CCSM4 en escenarios RCP 6,0 y 8,5; las cuales fueron aplicadas en el modelo hidrológico WEAP de las cuencas de estudio. El modelo hidrológico genera los balances de agua, que dan paso a la caracterización de la disponibilidad del recurso hídrico a través del cálculo de esorrentía y cobertura de demanda, consiguiendo una estimación de la disponibilidad del recurso hídrico en las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico para el periodo futuro (2021-2050), para diferentes escenarios de cambio climático, respecto del periodo histórico (1991-2020).

Capítulo 2

Recopilación de antecedentes

El presente estudio se desarrolla dentro del marco del PEGH de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico, en el cual se busca conocer la situación de oferta y demanda, actual y proyectada, del recurso hídrico en el país. Para ello, se utilizan modelos hidrológicos que permitan cuantificar el recurso y representar el ciclo hidrológico en la(s) zona(s) de interés, empleando para ello como base información registrada en las estaciones meteorológicas, pluviométricas y fluviométricas. Para la situación a futuro, a partir de simulaciones de Modelos de Circulación General (MCG) que se publican en el marco del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP, por sus siglas en inglés), es posible la utilización de proyecciones de variables (por ejemplo, temperatura y precipitación) que permiten la simulación hidrológica.

2.1. Modelos de Circulación General (MCG)

Desde 1988, el panel internacional de expertos sobre cambio climático IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) ha preparado informes de evaluación sobre el conocimiento científico, técnico y socioeconómico sobre el cambio climático, sus impactos y riesgos futuros, y opciones para reducir la velocidad a la que se está produciendo. De forma regular, se han lanzado proyectos CMIP en los que se generan simulaciones a partir de escenarios de cambio climático que contribuyen cada reporte publicado por IPCC.

Los MCG entregan series climáticas a partir de la simulación de las interacciones de la atmósfera terrestre, océanos, relieve terrestre y hielo, según la conceptualización de cada proceso, por lo anterior, es que los MCG suelen ser utilizados como forzantes en modelos de diversa índole para obtener simulaciones según distintos escenarios de cambio climático. Por otro lado, la resolución horizontal de los MCGs suelen ser de bastante gruesa resolución (del orden de 100 km x 100 km), lo que dificulta la modelación en detalle para efectos orográficos de la zona y efectos del microclima (Cannon et al., 2015). Para proyectar de forma precisa la información disponible a escala global sobre una escala regional se precisan de métodos de escalamiento, que permiten corregir y/o minimizar los sesgos en los MCG.

Por otro lado, es importante reconocer las distintas fuentes de incertidumbre al cuantificar impactos de cambio climático, entre las que se incluyen la elección del modelo MCG y su representación del sistema climático y procesos atmosféricos (Vano et al., 2015), la elección de la metodología de escalamiento (por ejemplo, Mizukami et al., 2016), y la elección de la

estructura de modelo hidrológico (por ejemplo, Najafi et al., 2011; Surfleet et al., 2012), que pueden afectar de distinta forma los resultados.

2.1.1. Descripción MCG

Como se mencionó anteriormente, los modelos climáticos se utilizan para el estudio de la dinámica del sistema meteorológico y climático a futuro, a través de la simulación de las interacciones de la atmósfera terrestre, los océanos, el relieve terrestre y el hielo. Cada modelo presenta distintos planteamientos sobre los cuales trabaja entre las cuales se encuentran la conceptualización del ozono estratosférico y la resolución representada, impactando en la respuesta de las proyecciones climáticas.

CMIP5

El penúltimo informe IPCC (2012), se realizó en el marco de la quinta fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP5) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, el cual utiliza escenarios climáticos de trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés) para generar proyecciones de los cambios en el sistema climático a partir de Modelos de Circulación General (MCG) desarrollados por distintos institutos climatológicos (Tabla A.1).

Los escenarios climáticos RCP se basan en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos sencillos, modelos de la química atmosférica y modelos del ciclo global del carbono. Se definen cuatro escenarios RCP caracterizados por el cálculo aproximado que hacen del forzamiento radiativo total en el año 2100 en relación con 1750, teniendo escenarios que proyectan un incremento de 2,6, 4,5, 6,0 y 8,5 [W m^{-2}]. Entre los escenarios disponibles en proyecto CMIP5, uno corresponde a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP 2,6), dos escenarios de estabilización (RCP 4,5 y RCP 6,0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP 8,5).

Los MCG acoplan la interacción océano-atmósfera que influye sobre la climatología del planeta. El CMIP5 busca en primer lugar evaluar las relaciones entre los distintos modelos de clima global en función de cómo asimilan los ciclos del carbono, y cómo esto afecta los resultados que proyectan en distintos escenarios (IPCC, 2012). En segundo lugar, evalúa la capacidad de los modelos en predecir el clima a distintas escalas espacio-temporales. Finalmente, busca determinar qué modelos forzados de forma similar (aumento de concentraciones de gases de efecto invernadero) producen rangos dispares en los resultados que luego proyecta.

Los MCG presentes en el proyecto CMIP5 son más de 20, y se pueden caracterizar por la resolución y por su forma de describir el ozono estratosférico (Tabla A.1). Para la última característica, Barria et al. (2017) clasifican los modelos como CHEM y NOCHEM, donde los modelos tipo CHEM tienen un modelo climático químico acoplado con un ozono interactivo que varía según los diferentes escenarios RCP del MCG, y por su parte, los modelos NOCHEM poseen un modelo climático químico acoplado con un ozono único para todos los RCP. La caracterización del ozono en las proyecciones climáticas del Hemisferio Sur son de relevancia, ya que los modelos con ozono interactivo (CHEM) presentarían mayores desviaciones de la observaciones respecto de modelos NOCHEM (Barria et al., 2017).

CMIP5 en Chile

Como se ha mencionado a lo largo del capítulo, la resolución de los MCG no suele ser adecuada para la evaluación de sistemas hidrológicos a una escala regional y/o local, por lo que suelen utilizarse técnicas de reducción de escala (downscaling) con el fin de obtener información que represente de una manera más adecuada el clima de una determinada región. Por otro lado, la elección del modelo es de importancia, ya que los modelos pueden presentar distinta sensibilidad a cambios en las concentraciones de GEI (variable forzante), como también pueden presentar diferencias en la climatología simulada según la composición y características del modelo.

La representación de los distintos modelos MCG (CMIP5) a las condiciones climáticas en Chile se estudian en la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017). El análisis realizado se rige por tres criterios: la correlación de las simulaciones de precipitación históricas con las forzantes climáticas de El Niño - Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés) y de Modo Anular del Sur (SAM por sus siglas en inglés); la sensibilidad climática; y cambios simulados de temperatura y precipitación.

El primer criterio, corresponde al análisis de la correlación de las simulaciones históricas de diferentes modelos MCG (CMIP5) con respecto a las oscilaciones ENSO y SAM, que se encuentran relacionadas con los patrones de precipitación en la zona centro-sur y zona austral del país, respectivamente (DGA, 2017). En cuanto a la sensibilidad climática, ésta indica el nivel de cambio en la temperatura de equilibrio de un sistema en respuesta al forzamiento radiativo, permitiendo identificar qué tan sensibles son los MCG a cambios en las concentraciones de CO₂. Finalmente, se analizan los deltas promedios de las variables de precipitación y temperatura media para los escenarios RCP 8,5, obteniendo los cambios (severos o leves) de los modelos.

A partir de los criterios precedentes y la opinión de expertos, en DGA (2017) se seleccionaron cuatro modelos asociados a cambio climático adecuados a Chile, según la siguiente clasificación:

- Sensibilidad baja extrema: CSIRO-Mk3-6-0
- Sensibilidad baja moderada: CCSM4
- Sensibilidad alta moderada: MIROC-ESM
- Sensibilidad alta extrema: IPSL-CM5A

2.1.2. Métodos de escalamiento

Los métodos de escalamiento (downscaling) aparecen con el objetivo de poder proyectar de forma precisa la información disponible a escala global sobre una escala regional (Storch et al., 1993). Estos métodos se dividen en dos grupos: dinámicos y estadísticos (Kidson y Thompson, 1998).

El escalamiento dinámico se basa en el empleo de modelos de circulación regional, MCR (RCM, por sus siglas en inglés Regional Climate Model), que permiten adaptar los MCG a las condiciones climáticas locales, ya que poseen grillas de mejor resolución y toman en cuenta información a nivel local que, por su gran alcance, no consideran originalmente los MCG; sin embargo, entre sus desventajas se encuentra que este tipo de escalamiento requiere un uso computacional intensivo. Por ejemplo, a nivel nacional, el modelo climático regional RegCM4 (Giorgi et al., 2012) se ha utilizado como base de simulaciones climáticas por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (2018) en colaboración con el Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento (NLHPC) de la Universidad de Chile.

Por otro lado, en cuanto al escalamiento estadístico, este considera los datos simulados de un MCG, estableciendo una relación en base a los datos observados históricos de la región. A su vez, es importante mencionar que, tanto los modelos dinámicos como estadísticos pueden presentar sesgos producto de limitaciones en su diseño y parametrización deficiente y en ambos casos se requiere de información local de las variables de entrada.

Algunas metodologías frecuentemente utilizadas de escalamiento estadístico son los algoritmos de mapeo de cuantiles, sin embargo, éstos muestran modificaciones en las magnitudes de las tendencias proyectadas en los cuantiles medios de precipitación (Cannon et al., 2015). En particular, la metodología Quantile Delta Mapping (QDM) es menos propensa a modificar las tendencias extremas respecto de otros algoritmos de mapeo de cuantiles, siendo ésta utilizada en la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017).

Sin embargo, a nivel nacional, la metodología QDM ha mostrado importantes sesgos al reproducir los montos de precipitación sólida en los MCGs históricos (Dionizis et al., 2021). Lo anterior es relevante en cuencas con contribución nival, y a su vez, incide directamente en la modelación hidrológica, ya que los escalamientos deben ser capaces de rescatar la covariabilidad que existe entre precipitación y temperatura para modelar apropiadamente los procesos de acumulación y derretimiento de nieve. Para lo anterior, los métodos multivariados (Cannon, 2016; Cannon, 2018), denominados en adelante como MBC (por sus siglas en inglés Multivariate Bias Correction), podrían mejorar considerablemente la representación de las precipitaciones líquidas y sólidas, aunque sin ser capaz de corregir la alteración estacional en los caudales históricos (Dionizis et al., 2021).

Los métodos MBC corresponden a: MBC Pearson correlation (MBCp), MBC rank correlation (MBCr) y MBC N-dimensional PDF transform (MBCn). Estos fueron propuestos y mejorados en (Cannon, 2016; Cannon, 2018) respectivamente. La diferencia entre los tres métodos incorporados en MBC se encuentra en la técnica utilizada para transformar las matrices, donde MBCn utiliza una transformación n-dimensional de las funciones de densidad de probabilidad de las variables (Pitié et al., 2007), sin quedar limitado a correlaciones tales como Pearson o Spearman, utilizadas en las otras versiones de multivariados (Cannon, 2018).

2.2. Modelación hidrológica

La modelación hidrológica es una herramienta aplicada en la gestión sostenible de cuencas, debido a que permite la representación de forma simplificada del ciclo del agua y la interac-

ción de los actores presentes en ella. En general, ésta involucra por un lado la identificación de subcuencas o unidades de respuesta hidrológica (a través de los sistemas de información geográfica); y por otro lado, los procesos físicos involucrados en el ciclo hidrológico (por ejemplo precipitación, evapotranspiración, escorrentía e infiltración). Un modelo hidrológico es, entonces, una representación simplificada de un sistema real; la cual puede estar bajo una conceptualización de base física (donde se representa cada uno de los componentes del ciclo hidrológico) y/o matemática (donde el sistema es representado por una expresión analítica); donde éstos se utilizan para simular la respuesta a procesos hidrológicos a partir de cambios en las condiciones del entorno, como puede ser una variación de la precipitación, temperatura, vegetación, u otros factores. La aplicación de las simulaciones entregadas varía según los objetivos, por ejemplo, pueden ser utilizadas para el diseño e implementación de obras hidráulicas, la evaluación de escenarios de disponibilidad, entre otros.

Ejemplos de modelos hidrológicos existentes para la simulación de recursos hídricos son SWAT (Soil and Water Assessment Tool), MODFLOW, HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System), WEAP (Water Evaluation and Planning), PRMS (Precipitation Runoff Modeling System), MAGIC (Modelación Analítica Genérica Integrada de Cuencas). Particularmente en Chile, la DGA ha dirigido estudios en cuencas nacionales que utilizan el modelo de simulación MAGIC (por ejemplo, río Maipo (DGA, 2008a) o Maule (DGA, 2008b)), y otros, modelos integrados superficial-subterráneos WEAP-MODFLOW (por ejemplo, Huasco (DGA, 2020a), Aconcagua (DGA, 2020b) y Maule (DGA, 2020c)).

2.2.1. Modelo hidrológico WEAP

El modelo WEAP (David Yates et al., 2005), desarrollada por el Stockholm Environment Institute U.S. Center, es una herramienta computacional que provee un enfoque integral para la planificación de los recursos hídricos. Este modelo permite calcular demanda, oferta, escorrentía, infiltración, flujos y almacenamiento del agua, entre otras variables de interés.

El modelo WEAP utiliza una interfaz gráfica basada en SIG que permite al usuario generar un diagrama esquemático utilizando el mouse para “arrastrar y soltar” los elementos (líneas y nodos) que se requiera construir, mover o modificar el sistema simulado. Los nodos representan componentes concretos, que pueden ser físicos como plantas de tratamiento, acuíferos, o sitios especiales a lo largo del río, como sitios de demandas del sector. Los nodos van unidos por líneas que representan ríos, canales o cualquier otro tipo de conducción de agua.

Entre los múltiples elementos que se pueden agregar al diagrama esquemático se encuentran: Ríos (*River*), Derivación (*Diversión*), Embalses (*Reservoir*), Agua subterránea (*Groundwater*), Sitios de demanda (*Demand Site*), Unidad hidrológica (*Catchment*), Escorrentía/Infiltración (*Runoff/Infiltration*), Conducción (*Transmission Link*), Flujo de retorno (*Return Flows*), Requerimiento de Caudal (*Flow Requirement*), Medidor de Caudal (*Stream-flow Gauge*).

Al modelo, se le ingresa información -a una escala temporal previamente definida- de tipo meteorológica, pluviométrica y fluviométrica (temperatura, precipitación, caudal), como también otros parámetros como por ejemplo, características del suelo (resistencia, conduc-

tividad zona radicular), temperaturas de congelamiento y derretimiento, entre otros; según sea considerado representativo a nivel de cuenca, cauce, u otra unidad espacial según estime pertinente el modelador.

El modelo WEAP, permite la integración con otros programas y modelos, como por ejemplo Python, Excel, QUAL2K y MODFLOW. Lo anterior, resulta beneficioso para casos donde los métodos disponibles de WEAP no representen con la complejidad deseada determinadas interacciones, o cuando existe información suficiente para desarrollar otro tipo de modelos, como, por ejemplo, otros más complejos de agua subterránea. Puntualmente, el modelo WEAP representa el agua subterránea como un nodo, representado como un gran “cubo” sin parámetros que caractericen los flujos internos.

2.2.2. Acople modelo subterráneo MODFLOW

MODFLOW (Harbaugh, 2005) es un modelo tridimensional de aguas subterráneas, basado en diferencias o volúmenes finitos, creado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). El modelo MODFLOW representa interacciones subterráneas de una forma más compleja que el modelo previamente mencionado; con lo que a fin de poder reproducir de mejor forma el agua subterránea y sus interacciones (recarga e infiltración), este modelo es integrado al modelo WEAP para mejorar las estrategias de gestión a escala de subcuenca (Sanzana et al., 2020).

A grandes rasgos, MODFLOW representa la interacción subterránea utilizando una red multicapas de celdas independientes, que a su vez tienen sus propios parámetros y ecuaciones, que permiten estimar la variación espaciotemporal del nivel freático en un acuífero, incorporando extracciones puntuales, drenes y la interacción río-acuífero. De esta forma, la integración del modelo superficial WEAP con el modelo subterráneo MODFLOW hace posible estudiar cómo los cambios en los niveles locales del acuífero afectan el sistema general.

2.3. Forzantes meteorológicas

El estudio que se tiene como referencia en la zona de interés es la Actualización del Balance Hídrico Nacional en la macrozona austral (DGA, 2019) el cual utiliza como base los productos de información mencionados a continuación.

2.3.1. Reanálisis atmosférico ERA5

El producto ERA 5 (Hersbach et al. 2020), desarrollado por ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, por sus siglas en inglés), es la versión actualizada del producto de reanálisis atmosférico ERA-Interim (Berrisford et al., 2011). Estos productos buscan replicar el clima histórico a través del planteamiento de modelos del sistema climático calibrados a escala global, asimilando observaciones disponibles de superficie, altura y satélites, generando campos meteorológicos consistentes con estas observaciones.

Los datos están contenidos en una grilla de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (latitud-longitud) en el caso del modelo atmosférico y una resolución de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ (latitud-longitud) en el caso del modelo

océanico. Sin embargo, a pesar de que los modelos mencionados describen los procesos físicos claves de la atmósfera, la resolución espacial de estos productos no permite representar adecuadamente fenómenos meteorológicos que ocurren a escalas menores. El producto se encuentra disponible en resolución temporal horaria y mensual, y abarca el periodo de 1979 al presente (con un desfase de tres meses).

2.3.2. Producto grillado CR2MET

El producto CR2MET (Boisiert et al., 2018), desarrollado por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (<https://www.cr2.cl/downloads/cr2met/>), consiste en una grilla rectangular de $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ (latitud – longitud), expandida en el territorio de Chile continental que contiene información meteorológica diaria (precipitación, temperatura media y temperaturas extremas) distribuida desde el año 1979.

La última actualización del producto CR2MET (v2.0), que utiliza como base variables del reanálisis atmosférico ERA 5, se encuentra en resolución temporal diaria, desde el año 1979 hasta 2020. El producto de precipitación se basa en una regionalización estadística de la información del reanálisis atmosférico, considerando la topografía y observaciones locales de precipitación. Por su lado, los productos de temperaturas se basan igualmente de variables de reanálisis atmosférico y de la información local (topografía y observaciones de temperatura), y se complementa con datos de temperatura superficial estimada mediante imágenes satelitales MODIS.

Capítulo 3

Antecedentes

En el presente capítulo se describen las principales características de la zona de las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico. Además, se exponen las características principales del modelo hidrológico WEAP utilizado como base en el presente estudio para la determinación de la disponibilidad hídrica de las cuencas de interés; modelo que fue previamente implementado en la zona en el proyecto PEGH de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (DGA, 2021).

3.1. Descripción de la zona de estudio

A continuación, se presenta la descripción de la zona de las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico en términos geográficos y demográficos, junto a la red hidrométrica y actividades económicas presentes en la zona de estudio.

3.1.1. Ubicación

Las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico están ubicadas en la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena. Estas se extienden aproximadamente entre los 52° 00' y 53° 56' de Latitud Sur y los 68° 24' y 72° 30' de Longitud Oeste. La disposición geográfica de las cuencas se presenta en la Figura 3.1.

En cuanto a la cuenca de Punta Arenas, esta corresponde a la cuenca Costeras entre Laguna Blanca, Seno Otway, Canal Jerónimo y Estrecho de Magallanes (Código BNA N°125), y presenta un área de aproximada de 12.481 km^2 (IDE,2021). Al Norte de ésta se encuentra la cuenca Vertientes del Atlántico (Código BNA N°126), hacia el Sur el Estrecho de Magallanes, hacia el Este la cuenca Costeras e Islas entre río Hollemler, Golfo Alte. Laguna Blanca (Código BNA N°124), y hacia el Oeste se encuentra el océano Atlántico (al extremo norte del estrecho de Magallanes).

La cuenca de Vertientes del Atlántico (Código BNA N°126) presenta un área de 6.731 km^2 en el territorio nacional (IDE, 2021). Al Norte de ésta se encuentra Argentina, hacia al Sur la cuenca de Punta Arenas (Código BNA N°126), hacia el Este se encuentra la cuenca Costeras entre Laguna Blanca, Seno Otway, Canal Jerónimo y Estrecho de Magallanes (Código BNA N°125), y hacia el Oeste se encuentra la cuenca Costeras e Islas entre río Hollemler, Golfo Alte. Laguna Blanca (Código BNA N°124), Además, es una cuenca exorreica trasandina, es decir, vierte sus aguas hacia el océano Atlántico.

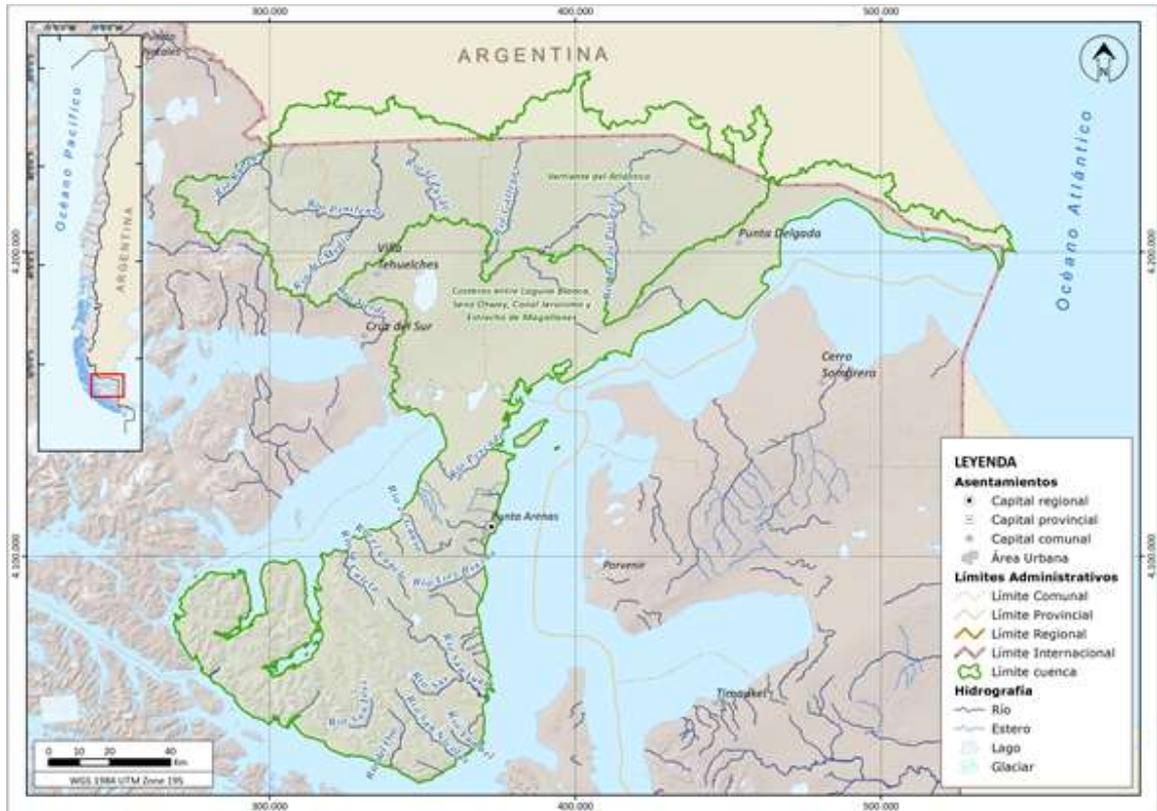


Figura 3.1: Distribución e hidrografía Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico. Fuente: DGA (2021).

Por otro lado, las cuencas de Punta Arenas y Vertientes de Atlántico abarcan parcialmente las provincias de Magallanes y Última Esperanza, donde su división político-administrativa es la expuesta en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Superficie de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico respecto a las comunas dentro del territorio chileno (Adaptado de DGA, 2021, basado en información IDE, 2019).

Provincia	Comuna	Superficie total comuna [km^2]	Superficie de las cuencas [%]	Superficie de las cuencas [km^2]
Magallanes	San Gregorio	6707	98	6587
Magallanes	Laguna Blanca	3567	96	3429
Magallanes	Punta Arenas	17772	40	7020
Magallanes	Rio Verde	9153	4	328
Última Esperanza	Natales	49085	3	1259

3.1.2. Demografía

La población que habita en las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico, según el Censo de Población y Vivienda (INE, 2017), alcanza los 129.977 habitantes. La distribución de la población según territorio y clasificación urbana y rural se detalla en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Población residente de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (Adaptado de DGA, 2021, basado en información INE, 2017).

Provincia	Comuna	Población [n° habitantes]		
		Urbana	Rural	Total
Magallanes	San Gregorio	0	799	799
Magallanes	Laguna Blanca	0	274	274
Magallanes	Punta Arenas	123.403	5.443	128.846
Magallanes	Rio Verde	0	0	0
Última Esperanza	Natales	0	58	58
Total		123.403	6.574	129.977

3.1.3. Estaciones de registro

En la zona de estudio se cuenta con estaciones meteorológicas (precipitación y temperatura) y fluviométricas pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA), las que permiten caracterizar la situación climática del sector y cantidad de agua que suelen llevar los ríos y/o esteros de la zona.

Meteorológicas

A continuación se mencionan las estaciones meteorológicas DGA de precipitación y temperatura ubicadas en la zona de estudio, y que presentan estadística mensual entre el periodo del año 1979 hasta la actualidad.

Las estaciones asociadas a precipitación se presentan en la Tabla 3.3. El porcentaje mostrado en los Registros es respecto a disponibilidad de registros de precipitación mensual dentro del periodo enero de 1979 a marzo 2021.

Tabla 3.3: Estaciones de precipitación presentes en las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico.

Estación	Norte [m]	Este [m]	Fecha Inicio	Fecha Final	Registros	Precipitación media anual 1991-2020 [mm/año]
Bitsch Alto	4117241	367823	jun-06	oct-20	24 %	519
Canal de Traslase Estero Llau-Llau	4112123	370393	ene-05	oct-20	37 %	619
Cerro Mirador	4109610	365951	jun-09	sept-17	19 %	796
Lago Parrillar	4080609	350315	ene-90	oct-20	69 %	778
Laguna Lynch	4106644	366252	ene-85	oct-20	78 %	448
Las Minas	4109810	367306	oct-95	ago-20	53 %	741
Leñadura Alta	4099877	358484	jun-09	oct-20	17 %	651
Magdalena Giglio 2	4110086	362466	dic-12	oct-20	17 %	686
Monte Aymond	4224868	447507	oct-95	oct-20	53 %	263
Ohiggins Villa	4203458	453096	sept-93	mar-99	12 %	155
Penitente Alto	4212189	316845	ene-10	oct-20	24 %	656
Punta Arenas	4111604	373715	ene-85	mar-20	83 %	535
Río Las Minas en BT. Sendos	4110136	367016	ene-00	oct-20	46 %	796

Tabla 3.3: Estaciones de precipitación presentes en las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico.

Estación	Norte [m]	Este [m]	Fecha Inicio	Fecha Final	Registros	Precipitación media anual 1991-2020 [mm/año]
Río Penitente en Morro Chico	4231243	334761	ene-07	oct-20	32 %	325
Río Perez	4173700	299282	dic-89	jun-06	57 %	550
Río Perez en Desembocadura	4173392	297964	abr-10	oct-20	23 %	516
Río Rubens en Ruta N 9	4231169	298031	mar-06	ago-20	34 %	361
Río San Juan en Desembocadura	4055951	368284	feb-07	ago-20	28 %	451
Río Verde	4163823	333357	feb-93	oct-20	64 %	326
Rubens en Ruta N. 9	4230430	298220	ene-90	ago-20	37 %	485
San Gregorio	4175463	427467	nov-91	oct-20	66 %	270
San Juan	4054632	371231	ene-90	oct-20	66 %	668
Teniente Merino	4234736	380988	ene-85	oct-20	82 %	233
Villa Tehuelche	4188615	335730	ene-85	oct-20	82 %	326

La estación con mayor cantidad de registros dentro del periodo de análisis es la estación de precipitación de Punta Arenas, que alcanza un 83 % de datos; seguida de las estaciones de Teniente Merino y Villa Tehuelche, que presentan un 82 % de observaciones. Además, estaciones con un gran porcentaje de cobertura dentro del periodo de análisis son Laguna Lynch, Lago Parrillar, San Juan, San Gregorio y Río Verde.

En cuanto a las estaciones de precipitación con baja disponibilidad de datos se encuentran Ohiggins Villa, Leñadura Alta, Magdalena Giglio 2, Cerro Mirador, Río Perez en Desembocadura, Bitsch Alto, Penitente Alto y Río San Juan en Desembocadura que presentan menos de un 30 % de disponibilidad de datos mensuales dentro del periodo de análisis.

Las estaciones asociadas a temperatura en la Tabla 3.4. El porcentaje mostrado en los Registros es respecto a disponibilidad de registros de temperatura mensual dentro del periodo enero de 1979 a marzo 2021.

Tabla 3.4: Estaciones de temperatura presentes en las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico

Estación	Norte [m]	Este [m]	Fecha Inicio	Fecha Final	Registros	Temperatura media anual 1991-2020 [°C]
Monte Aymond	4224868	447507	sept-98	sept-13	35 %	6,0
Ohiggins Villa	4203458	453096	jul-95	sept-98	6 %	6,2
Penitente Alto	4212189	316845	may-10	may-10	0 %	-
Punta Arenas	4111604	373715	abr-85	jun-18	78 %	6,8
Río Perez	4173700	299282	abr-91	abr-02	25 %	6,2
Río Perez en Desembocadura	4173392	297964	may-10	ene-11	2 %	5,6
Villa Tehuelche	4188615	335730	dic-91	sept-13	52 %	5,8

La estación con mayor cantidad de registros dentro del periodo de análisis es la estación de temperatura de Punta Arenas, que alcanza un 78 % de datos; seguida de la estación Villa Tehuelche, que presenta un 52 % de observaciones. Por otro lado, las estaciones con porcentajes extremadamente bajos de disponibilidad de datos son Penitente Alto, Río Perez en Desembocadura y Ohiggins Villa, las cuales presentan una cobertura menor al 10 % de datos mensuales del periodo de análisis, donde la estación de Penitente Alto presenta sólo un mes con información.

Fluviométricas

A continuación se mencionan las estaciones fluviométricas DGA ubicadas en la zona de estudio, y que presentan estadística mensual entre el periodo del año 1979 hasta la actualidad. Las estaciones asociadas a control fluviométrico se presentan en la Tabla 3.5. El porcentaje mostrado en Registros es respecto a disponibilidad de registros mensuales dentro periodo enero de 1979 a marzo 2021.

Tabla 3.5: Estaciones fluviométricas presentes en las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico

Estación	Norte [m]	Este [m]	Fecha Inicio	Fecha Final	Registros	Caudal medio anual 1991-2020 [m^3/s]
Río Rubens en Ruta N 9	4231169	298031	nov-81	sept-21	91 %	12,3
Río Penitente en Morro Chico	4231243	334761	jun-80	sept-21	94 %	14,9
Río Ci-Aike antes Frontera	4232192	422553	ene-09	jul-21	37 %	0,3
Río Perez en Desembocadura	4173392	297964	may-91	sept-21	68 %	8,3
Río Grande en Seno Otway	4112926	345919	ene-09	sept-21	33 %	5,4
Canal de Traslase Estero Llau-Llau	4112123	370393	ene-09	sept-21	51 %	0,2
Río Las Minas en BT. Sendos	4110136	367016	jun-82	sept-21	89 %	0,9
Río Leñadura antes BT. Sendos	4100774	368308	abr-82	dic-91	12 %	0,6
Río Tres Brazos antes BT. Sendos	4094495	367794	jun-82	sept-21	90 %	2,1
Río San Juan en Desembocadura	4055951	368284	nov-80	sept-21	94 %	19,7
Río Calete en Seno Otway	4101027	325119	ene-09	may-21	38 %	9,9

Las estaciones con mayor información fluviométrica dentro del periodo de análisis (>85 %) son Río Penitente en Morro Chico, Río San Juan en Desembocadura, Río Tres Brazos antes BT. Sendos, Río Rubens en Ruta N 9 y Río Las Minas en BT. Sendos.

Por otro lado, las estaciones con escasa disponibilidad de datos corresponden a las esta-

ciones de Río Leñadura antes BT. Sendos, Río Grande en Seno Otway, Río Ci-Aike antes Frontera y Río Calete en Seno Otway (cobertura menor al 40 % dentro del periodo de análisis).

3.1.4. Demandas

Los consumos que se presentan en la zona corresponden a demandas brutas agrupadas por uso a nivel de cuenca, obtenidas a partir de Derechos de Aprovechamiento de Aguas, información SISS (Superintendencia de Servicios Sanitarios) e información pública disponible en el Servicio de Evaluación Ambiental. En las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico gran parte de la demanda hídrica proviene de extracciones de los recursos superficiales, siendo esta mucho mayor que la demanda de los recursos subterráneos.

Los Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) no consuntivos fueron excluidos del análisis ya que representan un flujo de retorno al sistema hídrico. Para las series de demanda se tomó en consideración la reconstrucción histórica realizada en DGA (2021) junto al Escenario de Gestión 2 como proyección, que toma como demanda la distribución de flujo mensual permitida en su totalidad complementándose de proyecciones estimadas según el tipo de uso. Particularmente, en cuanto al consumo de agua potable, la proyección de la demanda para el periodo futuro de uso humano se hace a partir de la proyección de clientes de acuerdo con la tasa de crecimiento poblacional.

A continuación, se describen brevemente los tipos de demandas consideradas según el tipo de uso, a partir de los DAA y sectores productivos presentes de la zona de estudio.

Uso humano

La demanda hídrica correspondiente a uso humano se asocia al consumo de agua potable urbana (APU) y agua potable rural (APR). La demanda de agua potable es variable según el mes, aunque suele ser mayor en los meses de verano.

En la zona, la empresa responsable del suministro de APU es Aguas Magallanes S.A., que administran los derechos a nombre de empresas sanitarias preexistentes (ESMAG S.A., SENDOS y ECONSSA). Se identifican cuatro captaciones directas a la planta de producción: Las Minas, Embalse Lynch, Leñadura y Tres Brazos. En el caso de suministro de APR, se identifican tres sistemas de este tipo, donde a cada uno se le asoció un DAA cercano de una institución pública (SENDOS, Municipalidad, Servicio Regional).

Acuícola

La demanda hídrica correspondiente a acuicultura se asocia al consumo proveniente del conjunto de actividades, técnicas y conocimientos de crianza de especies acuáticas vegetales y animales, tanto en agua dulce como salada. En la zona, los cultivos son principalmente de producción de salmón (engorda y otros procesos). Para efectos de la representación de la demanda de acuicultura se consideraron además todos los DAA que declaran un uso de piscicultura.

Pecuario

La demanda hídrica correspondiente a agropecuario se asocia al consumo proveniente del conjunto de actividades relacionadas con la agricultura y ganadería. En este aspecto, se consideran los derechos declarados para riego, silvoagropecuario y actividades agrícolas; junto a DAA ubicados en cercanías de zonas cultivadas.

Minería

La demanda hídrica correspondiente al sector minero en la zona corresponde a la minería de carbón. La principal faena minera corresponde a la mina Peckett, que actualmente no está operativa producto de su cierre tras un derrumbe en 2014. Esta contemplaba el uso de DAA, desde el río Los Patos.

Energía - Hidrocarburos

La demanda hídrica correspondiente al sector de hidrocarburos se divide en tres procesos: perforación, fractura hidráulica (fracking) y refinería. El proceso de perforación se refiere a la realización del pozo, extrayendo el material hasta alcanzar la formación con hidrocarburos. Por su parte, el fracking es una técnica no convencional para aumentar la extracción de petróleo del subsuelo. Finalmente, la refinación incluye los procesos físicos y químicos para la obtención de múltiples subproductos del petróleo crudo. Las principales empresas encargadas de este rubro son ENAP, Geopark y Petromagallanes.

Industrial

La demanda hídrica correspondiente a consumo industrial responde al uso de recurso por parte de industrias no mencionadas en las clasificaciones previas (acuicultura, agropecuario, etc). El sector industrial de la zona se concentra principalmente en el norte de la ciudad de Punta Arenas, donde existe un barrio industrial. En su mayoría las industrias existentes no poseen derechos propios y utilizan la red de agua potable para el consumo, como por ejemplo es el caso del sector de generación eléctrica.

Otros - Consumo Doméstico

Otra clasificación de demanda hídrica es la correspondiente a los derechos de aguas de uso doméstico en la zona. Particularmente se consideran los DAA a nombre de personas naturales de flujo reducido e instituciones como municipalidades, regimientos, entre otros.

La distribución de las demandas según su tipo de uso al 2020 se presenta en la Figura 3.2 y Figura 3.3, respectivamente para las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico.

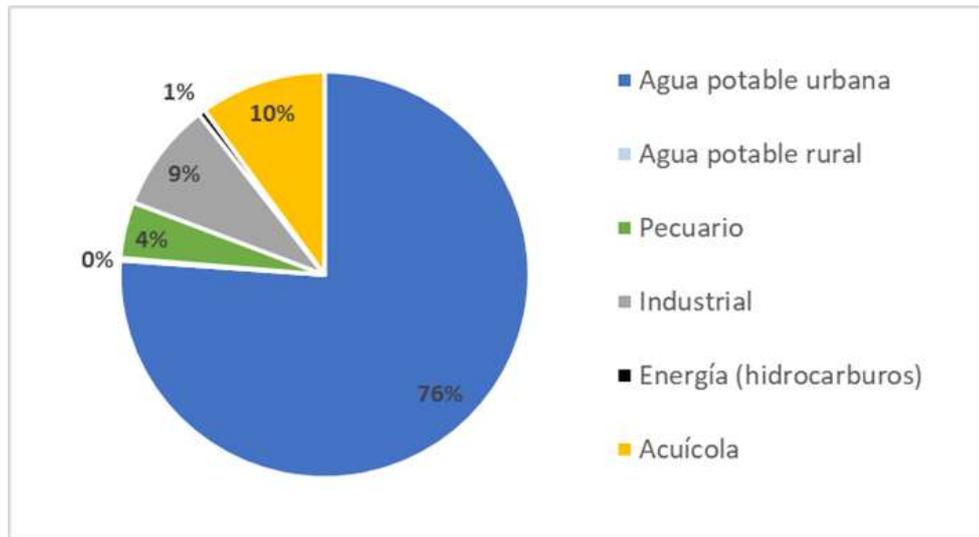


Figura 3.2: Distribución del tipo de uso de las demandas consuntivas al año 2020 en la cuenca de Punta Arenas. Fuente: DGA (2021).

Para el año 2020, en la cuenca de Punta Arenas, la principal demanda está asociada al uso de agua potable urbana (76%), seguida del uso acuícola e industrial. En esta cuenca, los consumos con menor participación son el uso por hidrocarburos (1%) y agua potable rural (0,2%).

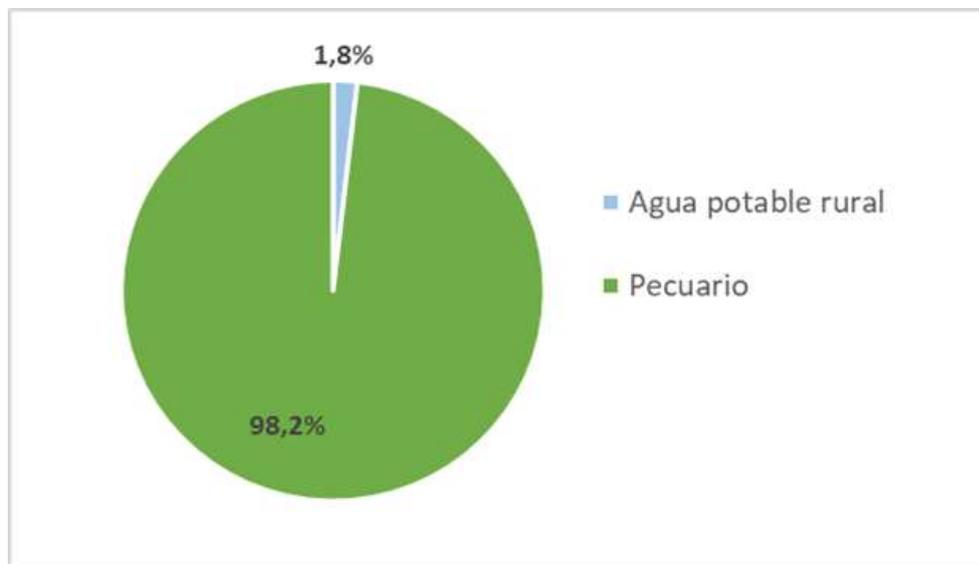


Figura 3.3: Distribución del tipo de uso de las demandas consuntivas al año 2020 en la cuenca de Vertientes del Atlántico. Fuente: DGA (2021).

En cuanto a la cuenca de Vertientes del Atlántico, para el año 2020 se presenta un principal consumo referente al uso pecuario (98,2%), y se complementa de consumo de agua potable rural.

3.2. Modelo hidrológico WEAP de PEGH Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (DGA, 2021)

El proyecto PEGH de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (DGA, 2021) desarrolló dentro de su ejecución un modelo acoplado WEAP-MODFLOW, ocupándose de la construcción conceptualizada del sistema hidrológico y su respectiva calibración con estaciones fluviométricas del sector. El modelo se construye en base a 31 unidades hidrológicas (*Catchments*) de generación de escorrentía u oferta hídrica, utilizando el método *Rainfall Runoff (Soil Moisture Method)* que se emplea para la generación de evapotranspiración asociada a cobertura vegetal. La distribución de las unidades hidrológicas asociadas a la cuenca de Punta Arenas se presenta en la Figura 3.4 y en la Figura 3.5 las asociadas a la cuenca de Vertientes del Atlántico (ver Anexo B).

En la modelación se consideraron únicamente los cauces principales que cuentan con control fluviométrico o presencia de derechos superficiales. Estos cauces principales se representan mediante 31 elementos de río (Tabla B.2). Para cada uno de estos cauces principales, se considera un elemento de generación de escorrentía superficial. Debido a la gran cantidad de cauces superficiales en la zona de estudio, en muchos casos se agruparon diferentes ríos pequeños en un único elemento river, con la preocupación de que esta representación tuviera justificación hidrológica, vale decir que los ríos agrupados estuviesen en una misma subsubcuenca y tuvieran similares características morfológicas (pendiente, elevación, orientación, etc).

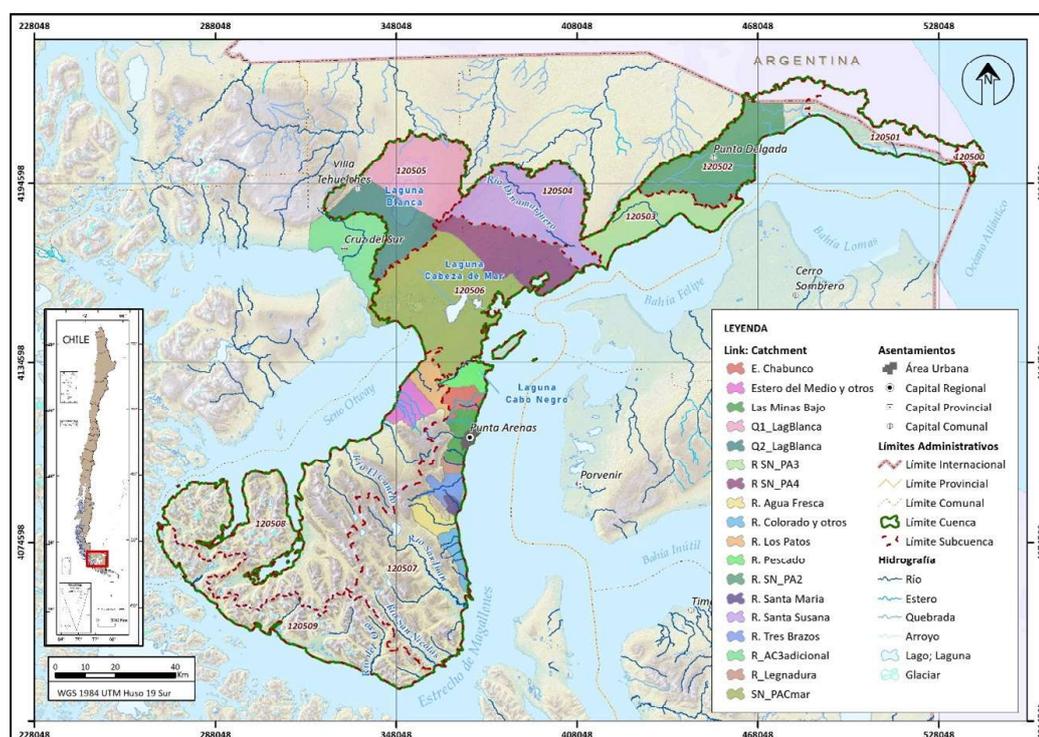


Figura 3.4: Unidades hidrológicas en la cuenca de Punta Arenas. Fuente: DGA (2021).

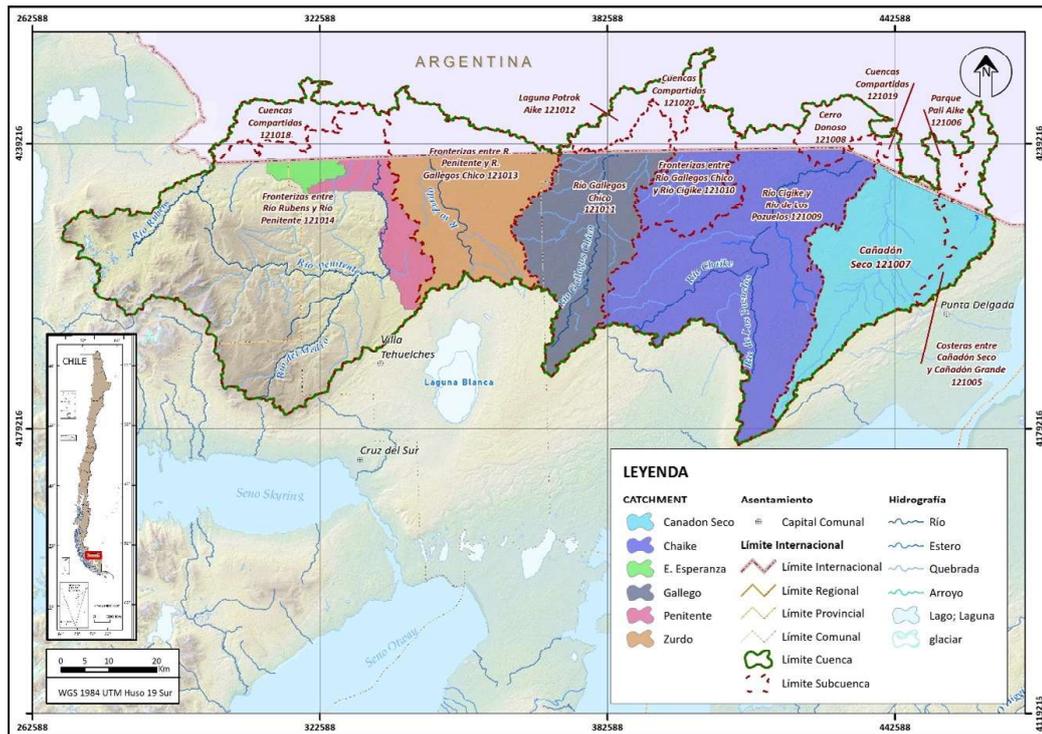


Figura 3.5: Unidades hidrológicas en la cuenca de Vertientes del Atlántico.
Fuente: DGA (2021).

3.2.1. Demandas

El modelo hidrológico, en base a la información expuesta en el acápite 3.1.4, cuenta con nodos de demanda donde cada uno tiene determinado un tipo de uso que permite extraer agua del sistema cumpliendo las demandas particulares de cada uno de los nodos. Los tipos de uso y número de estos nodos de demanda se especifican en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Nodos de demanda según uso

Uso o representación de la demanda	Cantidad
Uso humano - Agua potable	10
Acuícola	5
Pecuario	66
Minería	1
Energía - Hidrocarburos	4
Industrial	6
Otros - Consumo doméstico	15
Total	107

Por su parte, los montos anuales de la demanda total considerada para las cuencas de

Punta Arenas y Vertientes del Atlántico se presentan en la Figura 3.6. A nivel histórico, las demandas fluctúan entre 12 y 27 hm^3 al año, con un aumento promedio paulatino en el tiempo. Sin embargo, para el periodo de proyección, la serie considerada estima un aumento importante en el consumo futuro, el cual parte con un consumo de 37 hm^3 durante el año 2021, monto que va aumentando progresivamente hasta alcanzar una demanda de 120 hm^3 /año para el año 2050.

En la Figura 3.7 se presenta la comparación entre la demanda mensual promedio entre el periodo histórico y futuro. De la anterior, se desprende que como se mencionó anteriormente, las demandas del periodo futuro (7,7 hm^3 /mes promedio) superan de forma considerable las demandas del periodo histórico (1,5 hm^3 /mes promedio), obteniendo una brecha de 6,2 hm^3 /mes. Por otro lado, observando la estacionalidad de la demanda futura, los meses de mayo a diciembre presentan valores de un promedio de 9,2 hm^3 /mes, para luego ir descendiendo el consumo en los meses de enero a marzo, donde este último presentaría un promedio 2,7 hm^3 /mes.

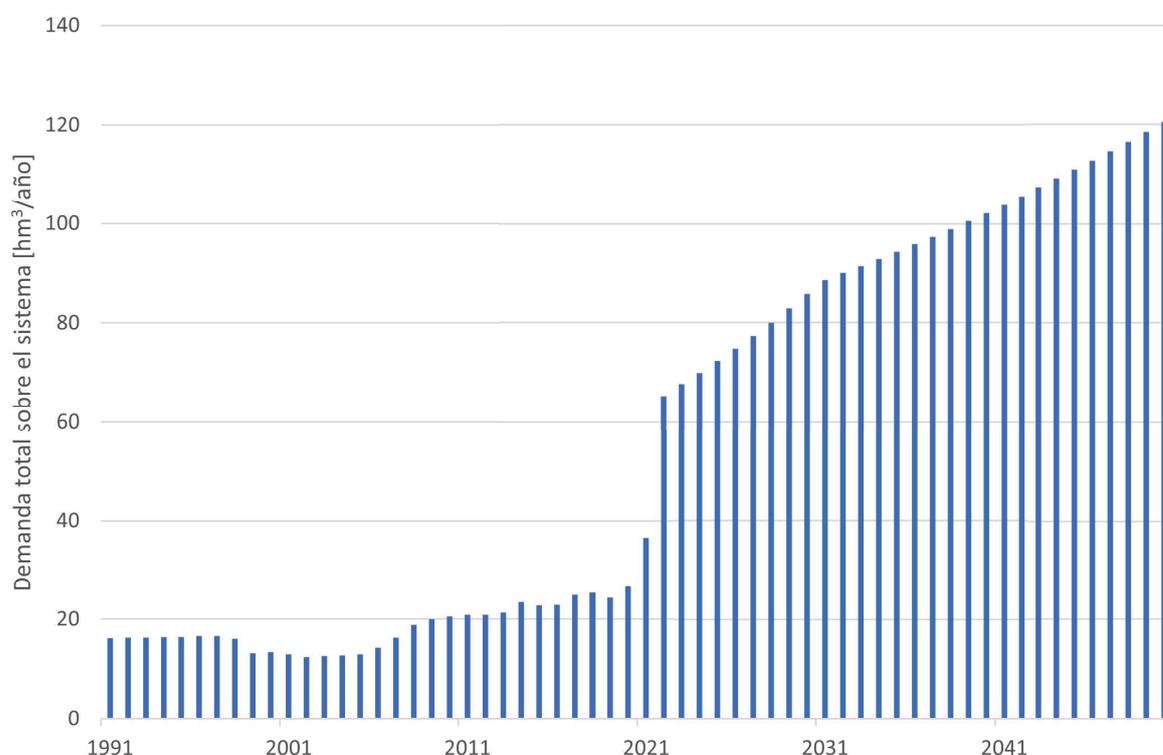


Figura 3.6: Demanda total anual considerada en el periodo de análisis (1991-2050) para las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico).

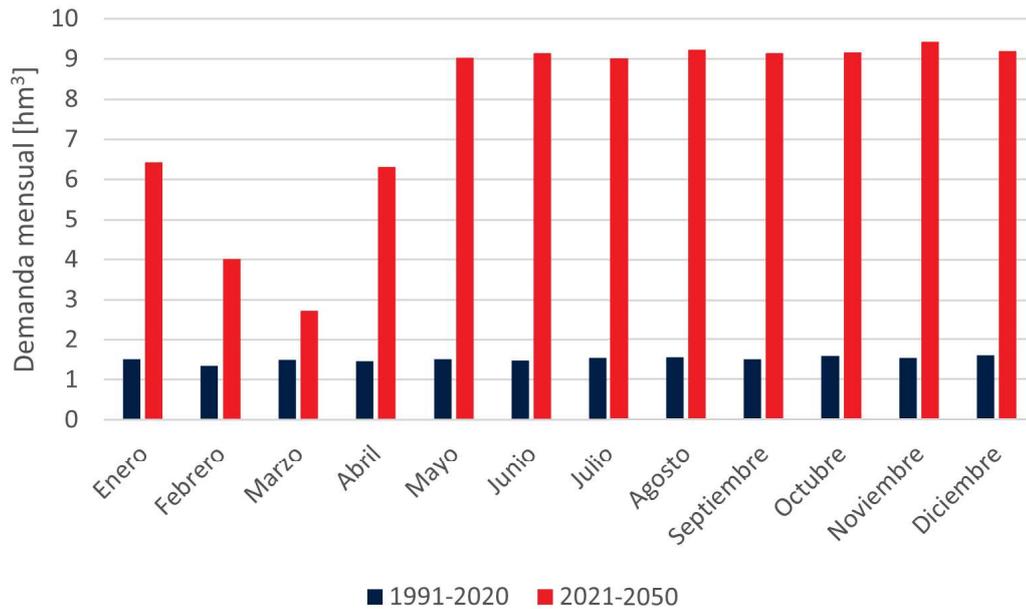


Figura 3.7: Comparación demanda mensual promedio entre periodo histórico y periodo futuro.

3.2.2. Métricas de evaluación del modelo

En la zona de estudio, según lo expuesto en el acápite 3.1.3, se cuenta con registros históricos de 11 estaciones fluviométricas de la DGA, de las cuales, se incorporan 9 como información observada al modelo WEAP a través del elemento Streamflow Gauge. Este elemento permite importar los valores de los registros históricos para poder contrastarlos con lo que el modelo desarrollado genera durante el proceso de calibración, a modo de ajustar los flujos simulados (Anexo C). Las estaciones consideradas para calibración se presentan en la Figura 3.8 y Figura 3.9.

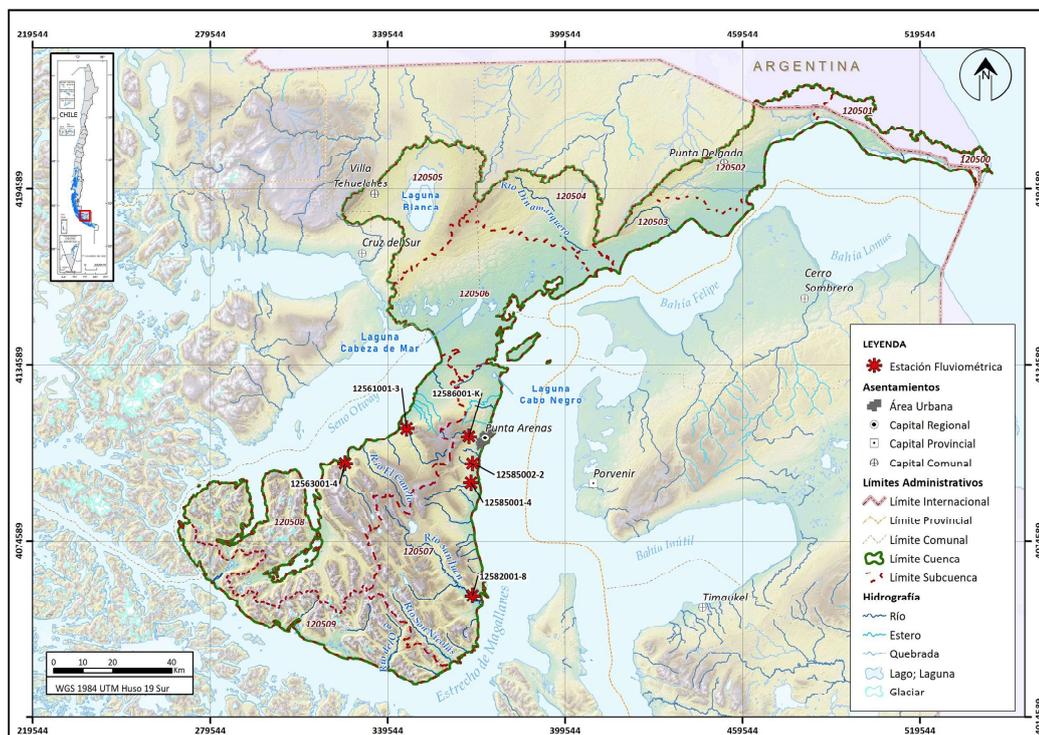


Figura 3.8: Estaciones fluviométricas de calibración en la cuenca de Punta Arenas. Fuente: DGA (2021).

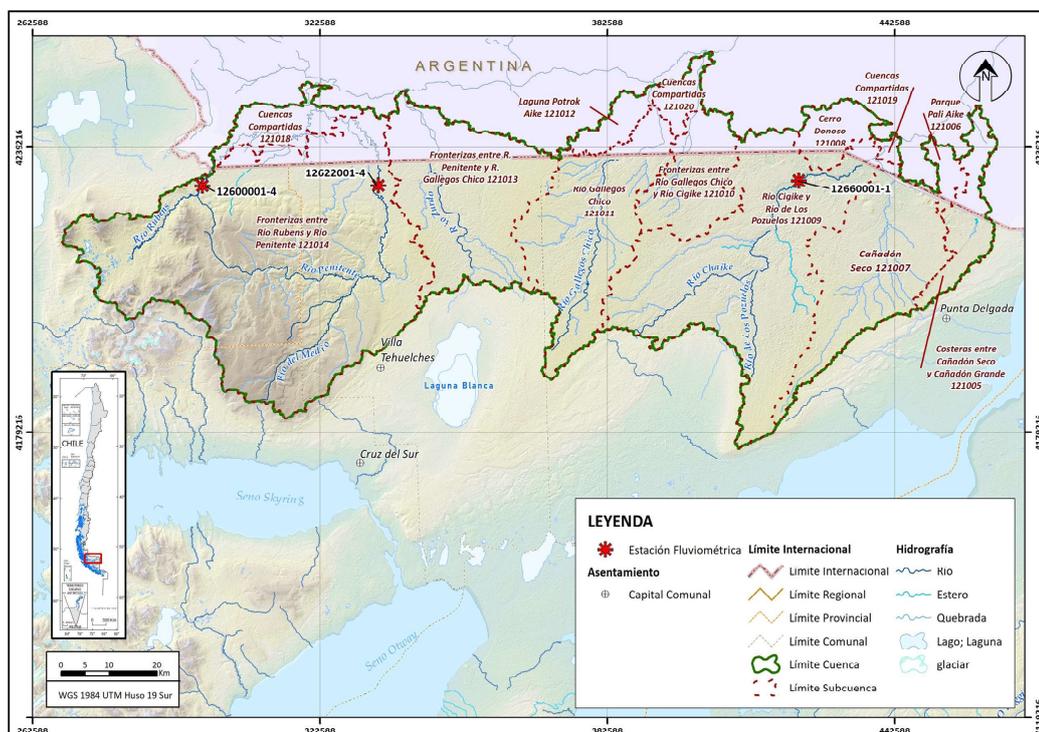


Figura 3.9: Estaciones fluviométricas de calibración en la cuenca de Verientes del Atlántico. DGA (2021).

Entre las estaciones de control fluviométrico implementadas para la calibración se encuentra Río Leñadura antes BT. Sendos, la cual presenta escasas observaciones que impidieron validar adecuadamente los flujos reproducidos en el modelo calibrado. A partir de la calibración que se realizó en DGA-Hídrica Consultores (2021), se obtienen los estadígrafos y caudales con probabilidad de excedencia de 50 y 85 % de calibración asociados al modelo superficial, los cuales son presentados en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Estadígrafos y caudales de calibración del modelo superficial.
Fuente: DGA (2021).

Estación	KGE	NSE	PBIAS	Q50 (m3/s)		Q85 (m3/s)	
				Sim	Obs	Sim	Obs
Rubens en Ruta 9	0,45	0,34	-22,35	9,31	12,06	5,43	5,74
Penitente en Morro Chico	0,45	0,36	18,53	17,41	14,75	9,96	4,98
Ci-Aike Antes frontera	0,12	0,17	-25,58	0,19	0,28	0,08	0,07
Las Minas en BT Sendos	0,40	0,29	-15,76	0,75	0,91	0,29	0,21
Río Tres Brazos antes BT Sendos	0,59	0,19	-10,54	1,88	2,09	0,37	0,39
San Juan en Desemb	0,44	0,31	-2,65	18,98	19,61	12,34	7,69
Rio La Caleta en Seno Otway	0,47	0,14	-31,54	6,11	9,79	3,22	5,25
Rio Grande en Seno Otway	0,31	0,30	-22,39	3,74	5,25	1,95	0,89

A partir de la información anterior, se recomienda utilizar el modelo hidrológico con precaución debido a que éste no presenta en su totalidad índices de calibración aceptables. Lo anterior se puede ver influenciado por el producto grillado del cual se obtienen las forzantes hidrometeorológicas, que puede no representar adecuadamente las características propias de la zona de estudio. Por otro lado, y de acuerdo con los valores de PBIAS obtenidos, los valores de caudales simulados obtenidos del modelo tienden a subestimar el flujo superficial generado en las cuencas, excepto en la estación Penitente en Morro Chico (Figura 3.10), que tiende a sobreestimar los caudales generados.

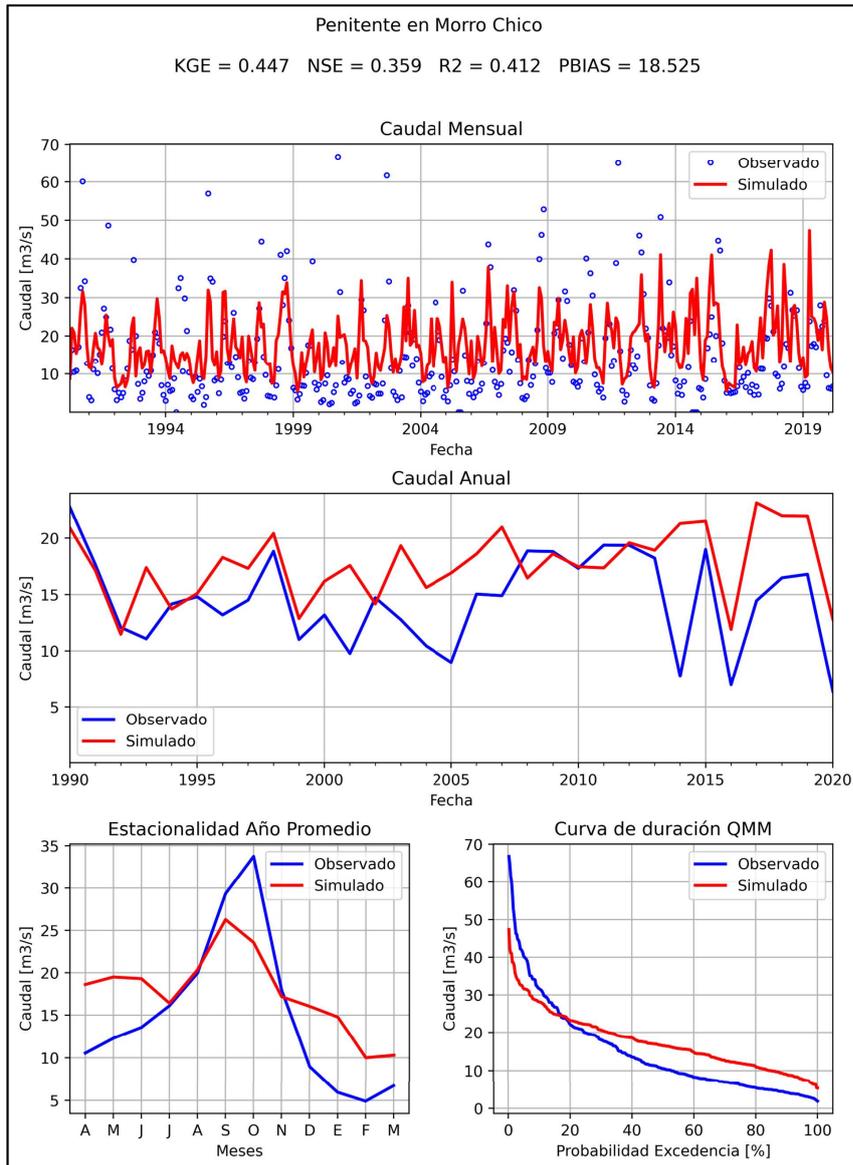


Figura 3.10: Gráfico y métricas de evaluación estación de calibración Penitente en Morro Chico. Fuente: DGA (2021).

Capítulo 4

Metodología

En el siguiente capítulo se presenta la metodología empleada en el desarrollo del presente trabajo (resumida en Figura 4.1). Inicialmente, se realiza un análisis de las variables de precipitación y temperatura, para evaluar el grado de representatividad del producto base utilizado respecto de los registros de estaciones meteorológicas de la zona. Se continúa con el escalamiento de los MCG, en el que se cambia la resolución original de los MCG por una resolución más fina adecuada a la zona de estudio. Finalmente, se generaron las series que son implementadas en el modelo hidrológico, y la simulación de éste.

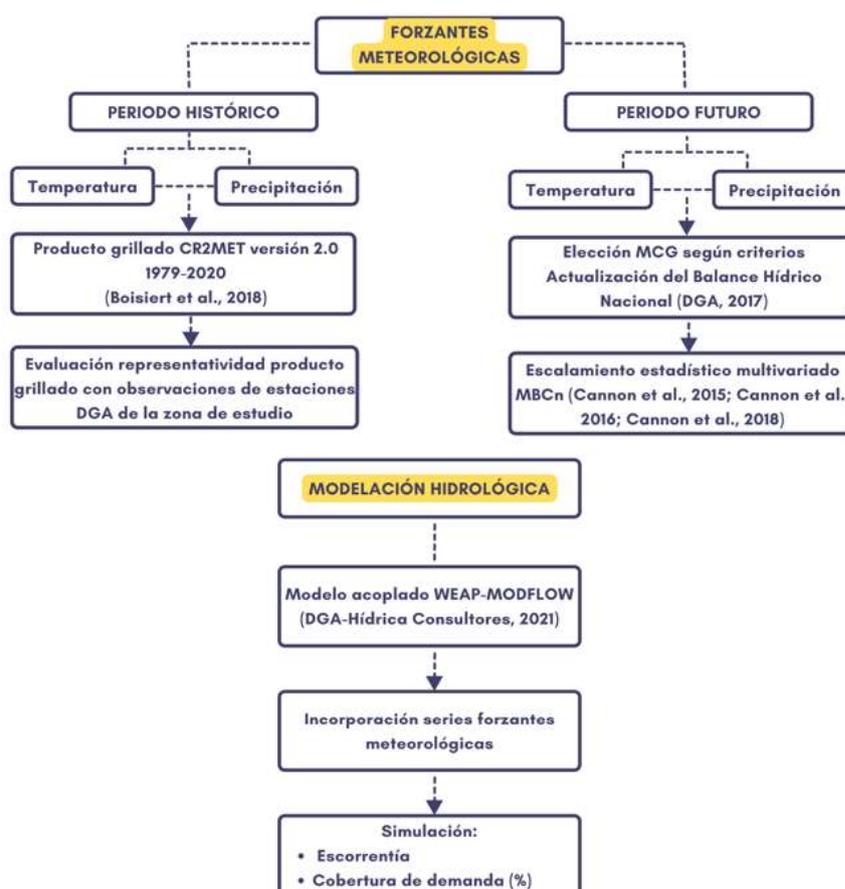


Figura 4.1: Diagrama de flujo de metodología

4.1. Forzantes meteorológicas

Siguiendo la recomendación de Sanzana et al. (2020) se utiliza en la generación de este estudio la información de las forzantes climáticas utilizadas en el estudio de la Actualización del Balance Hídrico Nacional (?), basadas en los productos mencionados en el acápite 2.3.1. Por esto, la precipitación y temperatura se extraen del producto grillado CR2MET (v2.0), y la humedad relativa y velocidad del viento se extraen desde el producto entregado por ? (?) que tienen como base el reanálisis atmosférico ERA-5.

4.1.1. Análisis gráfico

Se evaluó el grado de representación que presentan las series extraídas del producto de información base respecto de registros observados, para las variables de precipitación y temperatura. Un resumen de los aspectos a evaluar se presenta en la Tabla 4.1. El análisis considera los registros observados desde el inicio del periodo histórico utilizado para el escalamiento estadístico (1979).

Tabla 4.1: Resumen de variables a evaluar en el diagnóstico.

Agregación Temporal /Variable	Precipitación	Temperatura
Mensual	Gráfica de la precipitación mensual acumulada (serie de tiempo de la suma de las precipitaciones diarias por mes).	Gráfica de la temperatura promedio mensual (serie de tiempo con la temperatura promedio por mes).
Anual	Gráfica de la precipitación anual (serie de tiempo de la suma de las precipitaciones mensuales por año).	Gráfica de la temperatura promedio anual (serie de tiempo con la temperatura promedio por año).
Estacional	Gráfica de los promedios de los registros observados y simulados para cada mes. En formato año hidrológico.	
Curva de duración	Curva de duración según Weibull para la serie mensual de precipitaciones.	-

El análisis se complementa de estadígrafos que permiten identificar la coherencia y tendencias entre ambas series (producto simulado vs registros observados). Los índices utilizados corresponden a r^2 , PBIAS, NSE y KGE, definidos a continuación.

4.1.2. Análisis estadístico

Con el objetivo de evaluar a través de un análisis estadístico, se toman en cuenta los siguientes indicadores:

Cuadrado del coeficiente de correlación Bravais-Pearson (r^2)

El rango del cuadrado del coeficiente de correlación Bravais-Pearson varía entre 0 y 1, y describe la relación entre la dispersión observada y la dispersión simulada. Un valor de 0 significa que no existe correlación, mientras un valor de 1 significa que la dispersión de la serie simulada es igual a la de la serie observada, siendo típicamente aceptable valores mayores a 0,5 (Santhi et al., 2001; Van Liew et al., 2003). En la validación de modelos, se recomienda que la información de r^2 sea complementada con índices adicionales, dado que éste sólo cuantifica la dispersión (Krause et al., 2005), siendo un índice altamente sensible a valores extremos e insensible a diferencias proporcionales entre la data observada y las predicciones modeladas (Legates y McCabe, 1999).

Expresado a partir de la covarianza estandarizada de las series observadas y simuladas y las desviaciones de éstas, r^2 se define según la siguiente ecuación:

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (4.1)$$

Donde O_i y P_i corresponden a los valores observados y simulados, y \bar{O} y \bar{P} sus respectivas medias.

Percent bias (PBIAS)

El estadístico PBIAS mide la tendencia promedio de los datos simulados a subestimar o sobrestimar los datos observados de forma porcentual. Valores positivos indican un sesgo de subestimación del modelo, y por el contrario, valores negativos indican una tendencia a la sobreestimación, siendo el valor óptimo cuando se alcanza un PBIAS = 0 (Gupta et al., 1999).

Expresado de forma porcentual, PBIAS se define según la siguiente ecuación:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i) * 100}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (4.2)$$

Donde O_i y P_i corresponden a los valores observados y simulados, respectivamente.

Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)

El indicador adimensional, mide la magnitud relativa de la varianza residual (entre la información observada y simulada) a la varianza medida respecto a la media de las observaciones (Nash y Sutcliffe, 1970). Con un rango de NSE $\in(-\infty,1]$, este índice presenta un valor óptimo de 1. Obtener NSE = 0 o menor, indica que la serie promedio de observaciones es mejor modelo predictor que el modelo utilizado para la simulación (Gupta et al., 1999); por lo anterior, es sugerido que el valor del índice NSE sea positivo para indicar un “mínimo aceptable” rendimiento del modelo de simulación.

El NSE se define según la siguiente ecuación:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (4.3)$$

Donde O_i y P_i corresponden a los valores observados y simulados, y \bar{O} la media de las observaciones.

Kling–Gupta Efficiency (KGE)

Este indicador, que nace a partir de una descomposición del índice NSE, relaciona los componentes de: coeficiente de correlación (r), sesgo (β) y variabilidad relativa (α), de la serie simulada con respecto a la observada. Con un rango de $KGE \in (-\infty, 1]$, el valor $KGE = 1$ representa un ajuste perfecto (Gupta et al., 2009).

El índice KGE se define según la siguiente ecuación:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (4.4)$$

Donde los coeficientes permiten evaluar en tres dimensiones la serie simulada: r responde a la coherencia temporal, α a la variabilidad de los datos y β a la representatividad de los promedios entre las series simuladas y observadas.

4.2. Escalamiento estadístico

Esperando realizar un análisis futuro con modelos climáticos que entreguen resultados adecuados a la zona geográfica y climatología, es que se toma en cuenta la selección de modelos hecha en la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017) enfocados en las condiciones del país. Por otro lado, en la elección se consideran los modelos que posean diversidad en la modelación del ozono estratosférico (Anexo A) y que consideren las menores variaciones de precipitación y escorrentía para la cuenca estudiada, esperando compatibilidad con el modelo acoplado.

Además, a modo de presentar diferentes posibilidades se escogen analizar los escenarios de forzamiento de 6,0 RCP y 8,5 RCP, asociados a una gama media y alta de emisiones respectivamente. Para el caso de las simulaciones futuras de este trabajo, se utilizarán las proyecciones de precipitación y temperatura media, a escala temporal diaria.

Bajo las consideraciones mencionadas, se optó por utilizar los modelos CCSM4 y CSIRO-Mk3-6-0, ambos en los escenarios climáticos de 6,0 RCP y 8,5 RCP, que en resumen, presentan las características mencionadas en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Descripción de los Modelos de Circulación General seleccionados

Modelo	CCSM4	CSIRO-Mk3-6-0
Centro de Investigación	National Centre for Atmospheric Research, USA	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence, Australia
Resolución Atmosférica	0,9424°x1,25°	1,8653°x1,875°
Resolución Oceánica	1° x 1°	1,875°x1,875°
Ozono estratosférico	Chem	No-Chem

4.2.1. Escalamiento espacial

A modo de reducir la información a procesar, se recortan tanto la data base observada (CR2MET v2.0) y la data de los modelos MCG a la zona de estudio, según las extensiones máximas y mínimas de la cuenca de estudio (Tabla 4.3).

Tabla 4.3: Extensión de la zona de estudio adoptada. Sistema de referencia WGS84 H19.

Punto Cardinal	Grado
Norte	-51,70°
Sur	-54,00°
Este	-68,35°
Oeste	-72,50°

Para el traspaso de resolución de los MCG a la resolución del producto grillado CR2MET (0.05°), se optó por el método de interpolación bilineal, el cual toma el valor obtenido de la descomposición de los píxeles adyacentes donde el peso de cada uno es inversamente proporcional a la distancia, obteniendo un remuestreo gradual.

De forma anexa, se realizó un análisis y comparación general entre el método de vecino más cercano y método bilineal, sin encontrar variaciones significativas en los resultados del método de escalamiento estadístico. Por lo anterior, se escogió el método bilineal puesto que se espera represente de mejor manera la distribución espacial de las forzantes.

4.2.2. Escalamiento temporal

Con el propósito de representar de manera adecuada las proyecciones de las variables, es necesario realizar un ajuste entre los datos proyectados por los MCG con respecto a los registros locales, en este caso, provenientes del producto grillado CR2MET. Este ajuste se

puede realizar a través de un escalamiento según diversas metodologías, siendo los métodos multivariados (MBC) los que considerablemente mejoran la representación de las precipitaciones líquidas y sólidas, por sobre otros métodos (Dionizis et al., 2021).

El funcionamiento de los métodos MBC es similar al método QDM, sin embargo difieren en que son multivariados. Esto quiere decir que las series escaladas no son tratadas como variables independientes entre sí, sino que se rescata la relación que existe entre ellas, puntualmente en el presente estudio, la relación que existe naturalmente entre la precipitación y la temperatura, entendiéndose que tienen un comportamiento dependiente. Estos métodos son iterativos, por lo que la demanda computacional es considerablemente mayor en relación con los métodos univariados.

La metodología escogida a implementar es el método MBCn, el cual se basa en aplicar transformaciones n-dimensionales de las funciones de densidad de probabilidad de las variables (Pitié et al., 2007), rescatando la correlación entre ellas. Sobre ese espacio transformado se aplica el método QDM (Cannon et al., 2015), basado en la variación de los cuantiles (a través de las curvas de distribución de acumuladas; CDF) y finalmente se aplica la transformación inversa para volver al espacio original, de esta forma se garantiza la convergencia del escalamiento sin importar la distribución de las variables originales. Lo anterior, se puede desarrollar utilizando el paquete MBC (Cannon, 2015; Cannon, 2016; Cannon, 2018) implementado en el software libre R.

Dado que no es recomendable realizar proyecciones hidrológicas a escala sub-anual, pues las estimaciones están afectas a la no representatividad en el periodo histórico (Dionizis et al., 2021), es que es necesario cuidar la estacionalidad en los MCG. Por lo anterior, se filtraron las series mensualmente antes de realizar el escalamiento MBCn, es decir, se desarrolla el escalamiento según cada mes del año, para mantener la tendencia de las estacional.

Por otra parte, se hace necesario identificar un valor traza para la variable de precipitación. Considerando que no suele existir eventos de precipitación de forma diaria permanentemente, se requiere corregir el número de días de precipitación de los MCG, a modo de mantener en el periodo histórico el mismo número de días con precipitación respecto al producto observacional. Para ajustar la serie simulada, es que se determina un valor que sustituye los eventos con precipitación menor o igual a este índice, con precipitación nula.

Finalmente, es importante mencionar que de acuerdo con la disponibilidad de datos históricos de los MCG de CMIP5 es que el periodo histórico de escalamiento abarca los años entre 1979 y 2005, y el periodo proyectado de escalamiento corresponde desde 2006 al año 2050.

4.3. Simulación de procesos hidrológicos

El modelo WEAP utiliza forzantes meteorológicas y parámetros característicos del entorno para realizar un balance hídrico en la unidad hidrológica de interés. Éstos se generan a través de módulos que representan el intercambio de flujos en los procesos del ciclo hidrológico, además de incluir otras funcionalidades como la posibilidad de incorporar demandas u ex-

tracciones, con diferentes prioridades de distribución del agua según se requiera. Lo anterior, hace de WEAP un modelo hidrológico útil para el desarrollo de estudios de cambio climático y de planificación de los recursos hídricos.

El modelo WEAP presenta diferentes elementos y métodos relacionados a los procesos hidrológicos. Particularmente, el elemento de Unidad Hidrológica (*Catchment*) permite integrar diferentes modelos hidrológicos que permiten la simulación de procesos. Actualmente, se puede escoger entre cinco métodos (*Rainfall Runoff Soil Moisture Method*; *Rainfall Runoff Simplified Coefficient Method*; *Irrigation Demands Only Simplified Coefficient Method*; *MA-BIA Method*; *Plant Growth Method*) dependiendo de la disponibilidad de datos y del nivel de complejidad deseado para representar los procesos de la Unidad Hidrológica.

En este trabajo, el modelo implementado utiliza principalmente el método de la humedad del suelo (*Soil Moisture Method*), el cual se basa en un esquema de dos estanques que reproducen distintos procesos involucrados en el balance de flujos subterráneos y superficiales (Figura 4.2). WEAP simula el proceso de precipitación-escorrentía a partir de una función de transferencia (que depende del módulo hidrológico seleccionado) en la que se determina una variable de salida (el caudal) a partir de una o varias variables de entrada, generalmente de carácter meteorológico (precipitación, temperatura, humedad relativa, entre otras) y otros parámetros característicos como el coeficiente de cultivo (k_c) y el área de la superficie. Internamente el modelo utiliza numerosos parámetros calibrables para representar el fenómeno físico, entre los que se encuentran la dirección preferencial del flujo, factor de resistencia al escurrimiento, capacidad de almacenamiento de los estanques, entre otros.

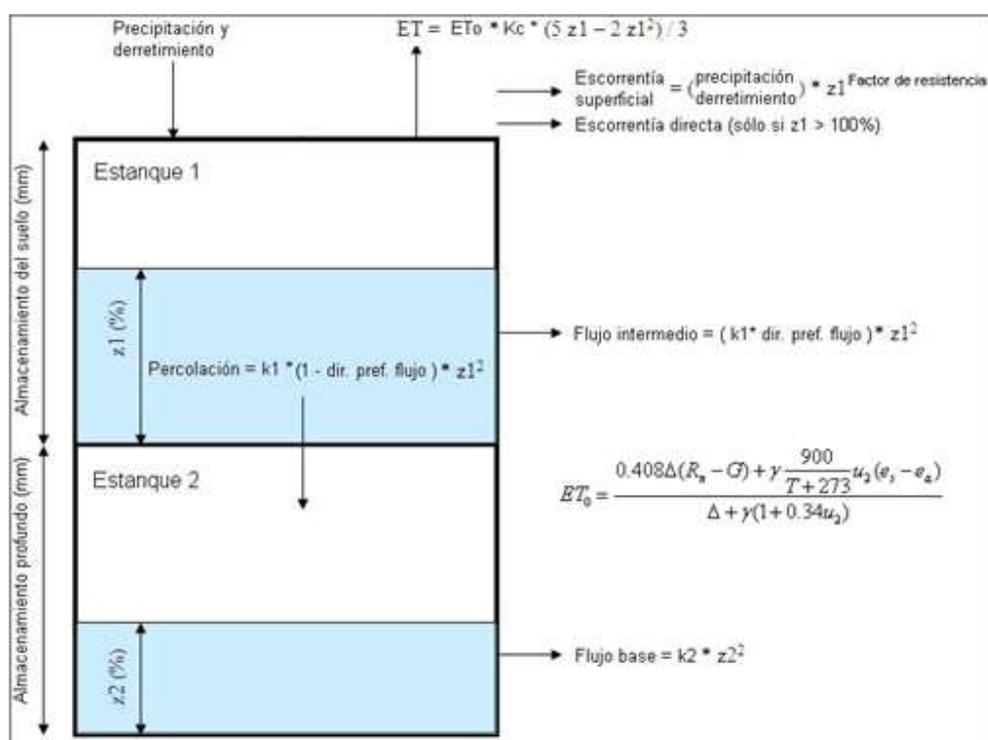


Figura 4.2: Esquema gráfico modelo WEAP. AUTOR: Ayala (2011), modificado a partir de Guía de Uso WEAP.

Donde:

- ET: Evapotranspiración real.
- ET_0 : Evapotranspiración de referencia.
- Z_1 : Porcentaje de la capacidad del estanque superior utilizada.
- Z_2 : Porcentaje de la capacidad del estanque inferior utilizada.
- k_c : Coeficiente de cultivo.
- K_1 : Conductividad del estanque superior.
- K_2 : Conductividad del estanque inferior.
- Dir. Pref. flujo: Dirección preferencial del flujo, correspondiente a la fracción de flujo vertical y horizontal.

El cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0) se realiza mediante el método de Penman-Monteith, según la ecuación 4.5.

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (4.5)$$

Donde:

- ET_0 : Evapotranspiración de referencia.
- R_n : Radiación neta.
- G: Densidad de flujo de calor del suelo.
- T: Temperatura media.
- u_2 : Velocidad del viento a dos metros sobre el suelo.
- e_s : Presión de saturación de vapor de agua.
- e_a : Presión de vapor.
- Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor.
- γ : Constante psicométrica.

A partir de lo anterior, el modelo WEAP realiza la simulación hidrológica a partir de la resolución de dos balances de masas numéricos planteados resumidos a partir de las ecuaciones 4.6 y 4.7.

$$Z_{1max} \frac{dZ_1}{dt} = [P_e(t) - ET_0 k_c \frac{5Z_1 - 2Z_1^2}{3}] - P_e(t) Z_1^{FR} - f K_1 Z_1^2 - K_1(1 - f) Z_1^2 \quad (4.6)$$

$$Z_{2max} \frac{dZ_2}{dt} = K_2(1 - f) Z_2^2 - K_2 Z_2^2 \quad (4.7)$$

Donde:

- P_e : Precipitación más derretimiento.
- Z_{1max} : Capacidad del estanque superior.
- Z_{2max} : Capacidad del estanque inferior.
- Z_1 : Porcentaje de la capacidad del estanque superior utilizada.
- Z_2 : Porcentaje de la capacidad del estanque inferior utilizada.
- k_c : Coeficiente de cultivo.
- K_1 : Conductividad del estanque superior.
- K_2 : Conductividad del estanque inferior.
- f : Dirección preferencial del flujo, correspondiente a la fracción de flujo vertical y horizontal.

Capítulo 5

Resultados

En el presente capítulo se presentan las forzantes de precipitación y temperatura, junto a los resultados del modelo WEAP en la estimación de la disponibilidad hídrica en las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico, particularmente escorrentía y demanda satisfecha; bajo el supuesto del uso de la totalidad de los DAAs de carácter consuntivo otorgados; para el periodo futuro comprendido entre los años 2021-2050.

De forma breve, se realizó la comparación entre las proyecciones de disponibilidad hídrica obtenidas para el MCG CSIRO en escenario RCP 8,5 y las proyecciones del PEGH de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (DGA-Hídrica Consultores, 2021), que utilizó como base el mismo modelo y escenario RCP pero bajo un diferente método de escalamiento: QDM.

Luego, fueron comparados los resultados de los cuatro MGC escalados a través de la metodología MBCn, con la situación del periodo histórico (1991-2020). Este análisis comprende de forma general los cambios en precipitación, escorrentía, y cobertura de demanda a partir de las simulaciones del modelo WEAP-MODFLOW implementado.

5.1. Análisis de forzantes

5.1.1. Precipitación

A partir del análisis realizado se obtienen los índices estadísticos y gráficos comparativos de las series de precipitación extraídos de CR2MET (versión 2.0) con respecto a los registros de las estaciones DGA (Tabla 3.3). Los gráficos comparativos de las series de precipitación se exponen en el Anexo D, el cual incluye un resumen de los índices en la Tabla D.1.

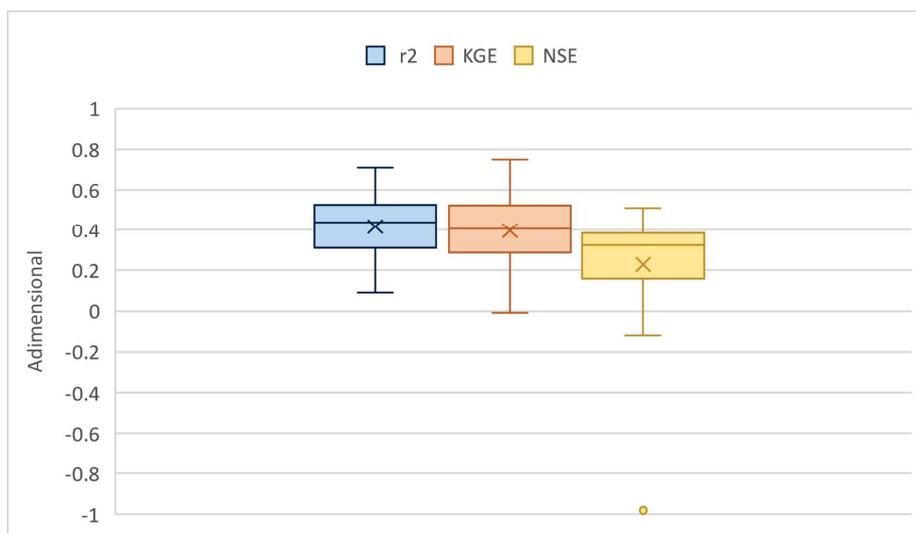


Figura 5.1: Índices r^2 , KGE y NSE del análisis de series simuladas de precipitación respecto a observaciones DGA (Tabla 3.3).

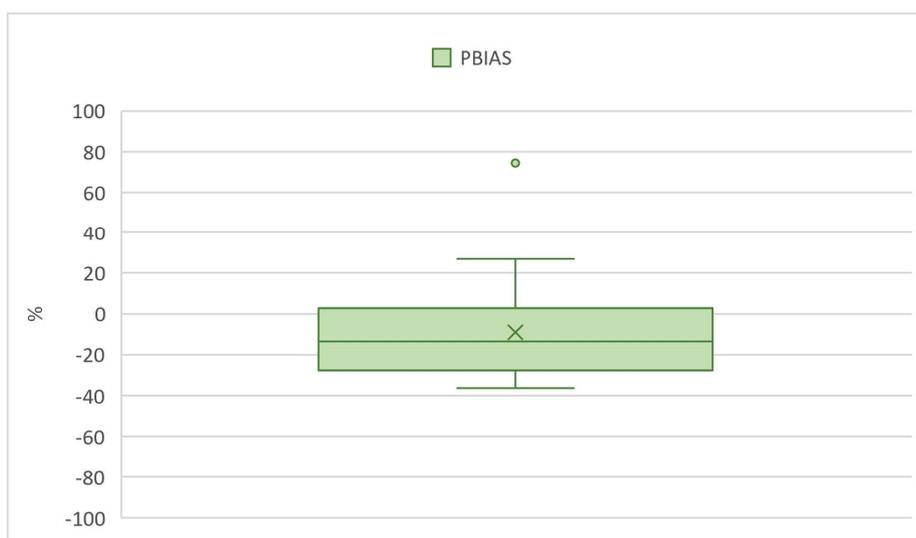


Figura 5.2: Índice PBIAS del análisis de series simuladas de precipitación respecto a observaciones DGA (Tabla 3.3).

De forma general, en la Figura 5.1 se presenta el diagrama de los estadígrafos r^2 , KGE y NSE de las series simuladas de precipitación, en el que se observa que en las estaciones analizadas existen mayoritariamente puntos con índices positivos según KGE y la correlación r^2 , con valores concentrados entre 0,3 y 0,5, rango en el límite de lo aceptable para estos índices; por su parte, el índice NSE presenta valores no aceptables (< 0) en más de un punto, alcanzando valores aceptables en escasos puntos de análisis. En cuanto al índice PBIAS (Figura 5.2), éste presenta gran dispersión y muestra tendencias a la subestimación del producto de precipitaciones, en hasta un -36%; aunque existen puntos en los que las simulaciones de precipitación son sobreestimadas.

Las estaciones presentes en las cuencas de estudio presentan indicadores que alcanzan valores promedios de r^2 de 0,42, KGE de 0,40, NSE de 0,24 y PBIAS de -8,98, sin embargo, las estaciones por sí solas presentan niveles de estadígrafos variados entre sí, sin una tendencia concluyente entre todos los puntos de análisis.

Según lo expuesto en el acápite 3.1.3, las estaciones con mayor cantidad de registros dentro del periodo de análisis corresponden a la estación de Punta Arenas, Teniente Merino y Villa Tehuelche. Además, las estaciones de Laguna Lynch, Lago Parrillar, San Juan, San Gregorio y Río Verde presentan igualmente gran porcentaje de cobertura dentro del periodo de análisis. A partir de ello, las estaciones mencionadas son consideradas como puntos de registro apropiados para la evaluación del producto CR2MET debido a su gran extensión temporal de datos observados.

En cuanto a los índices estadísticos, r^2 , los valores en casi la mitad de los puntos son de categoría aceptables ($>0,5$), donde las estaciones con peor correlación corresponderían a Penitente Alto, Río Rubens en Ruta N9, Río San Juan en Desembocadura, Río Verde y San Juan ($r^2 < 0,3$), sin embargo, según lo expuesto en 4.1.2, es importante complementarla con el resto de los índices. Por parte del estadígrafo KGE, las estaciones que presentan valores cercanos al óptimo ($KGE = 1$) corresponden a Río Perez en Desembocadura y Ohiggins Villa ($>0,7$), seguidas de San Gregorio, Villa Tehuelche, Rubens en Ruta N9, Río Perez y Lago Parrillar ($>0,5$). En cuanto a NSE, la mayoría de las estaciones presentan un NSE considerado como mínimo aceptable; a excepción de las estaciones de Las Minas y Penitente alto que presentan valores cercanos a 0, y de Río Rubens en Ruta N9 y San Juan que presentan índices negativos.

Gráficamente, un caso particular es la subestimación encontrada en múltiples puntos de control. Esta situación se puede apreciar en la Figura 5.7 que muestra el análisis gráfico de Punta Arenas, donde se observa una subestimación por parte del producto CR2MET de al menos un 25 % promedio. Esta situación se repite igualmente para otras estaciones, como Bitsch Alto, Canal de Trasvase Estero Llau-Llau, Cerro Mirador, Las Minas, Magdalena Giglio 2, Monte Aymond, Penitente Alto, Río Las Minas en BT., San Gregorio, San Juan y Teniente Merino.

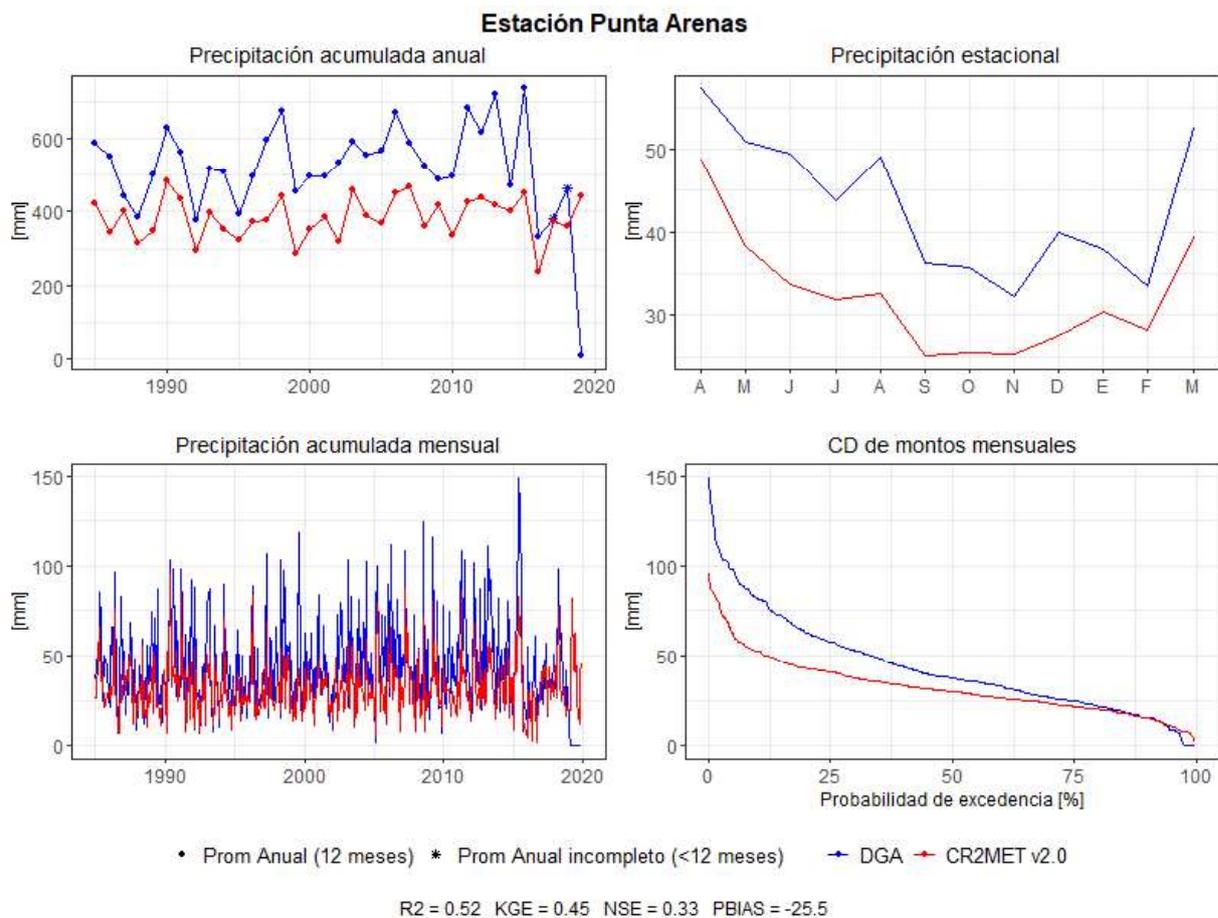


Figura 5.3: Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Punta Arenas.

Por otro lado, se encuentra igualmente el caso de sobreestimación por parte de CR2MET de los registros de ciertos puntos, como se puede observar en la Figura 5.4, donde se puede distinguir que para la estación de Villa Tehuelche presenta una sobreestimación principalmente en los meses de septiembre a abril. Otras estaciones que presentan un alza importante respecto de los datos observados son Laguna Lynch, Ohiggins Villa, Río Rubens en Ruta N9 y Rubens en Ruta N9.

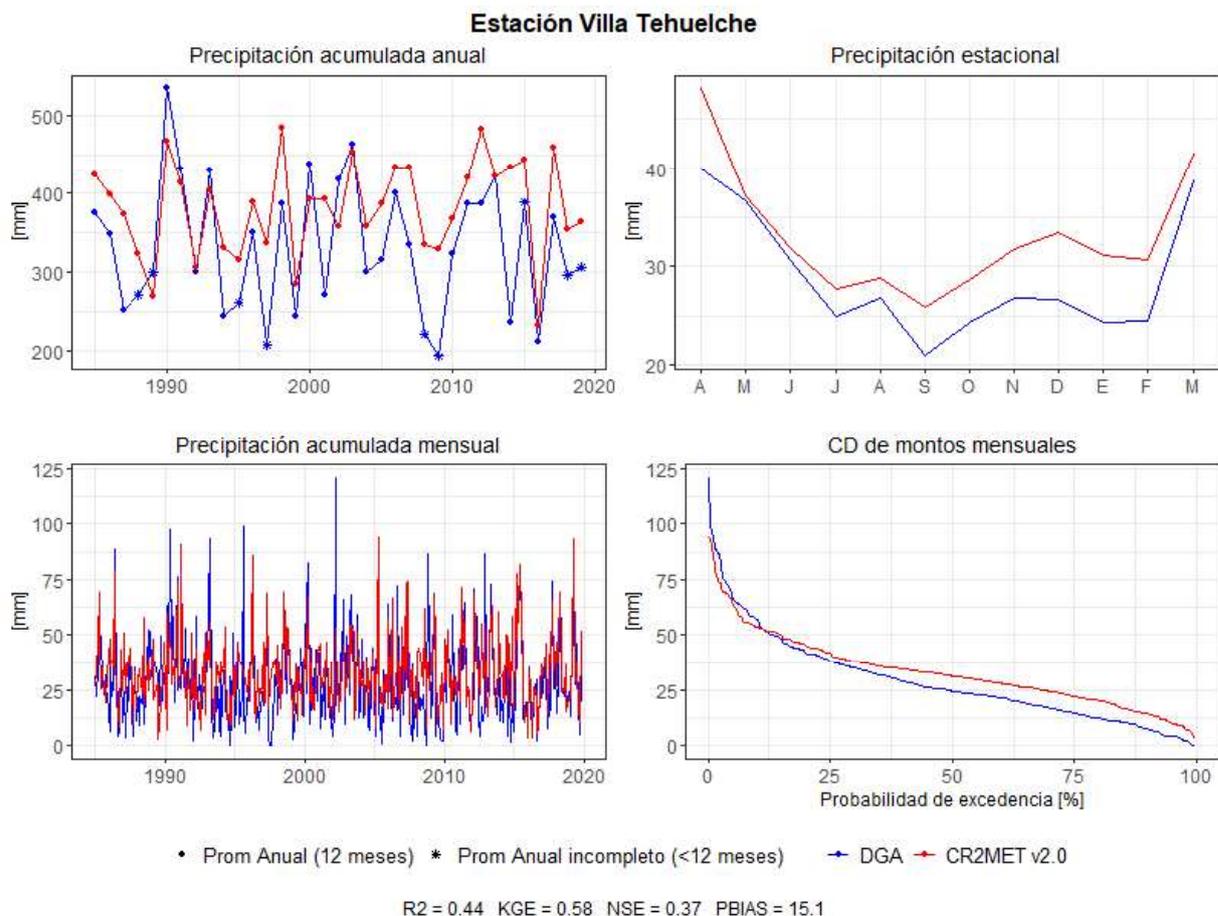


Figura 5.4: Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Villa Tehuelche.

A partir del análisis realizado se observan grandes sesgos por parte del producto grillado en las estaciones de precipitación evaluadas, siendo algunas escasamente representadas, por lo que los resultados, tanto del escalamiento estadístico como de las simulaciones del modelo hidrológico pueden verse afectadas, por lo que es importante tomar en cuenta los resultados con prudencia.

5.1.2. Temperatura

A partir del análisis realizado se obtienen los índices estadísticos y gráficos comparativos de las series de temperatura extraídos de CR2MET (versión 2.0) con respecto a los registros de las estaciones DGA (Tabla 3.4), descartando del análisis la estación Penitente Alto debido a la escasez de datos registrados. Los gráficos comparativos de las series de temperatura se exponen en el Anexo E, el cual incluye un resumen de los índices en la Tabla E.1.

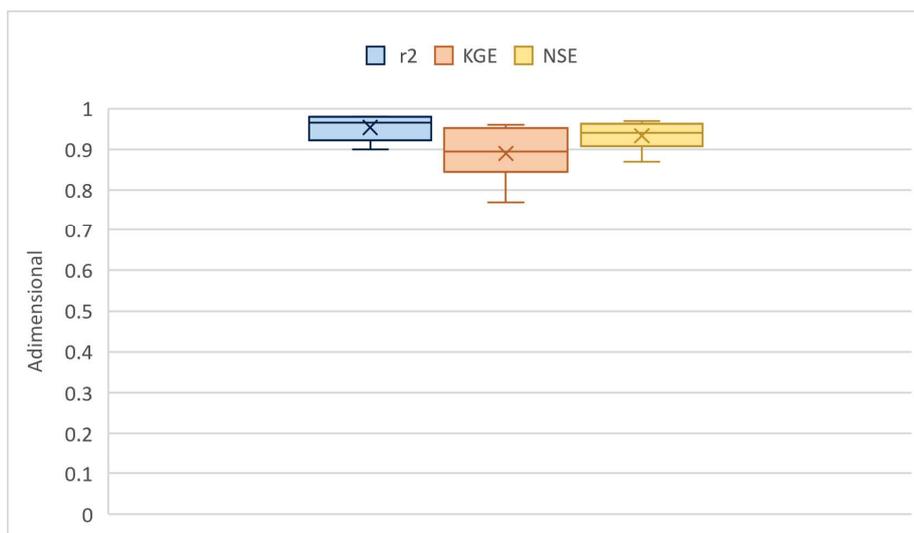


Figura 5.5: Índices r^2 , KGE y NSE del análisis de series simuladas de temperatura respecto a observaciones DGA (Tabla 3.4).

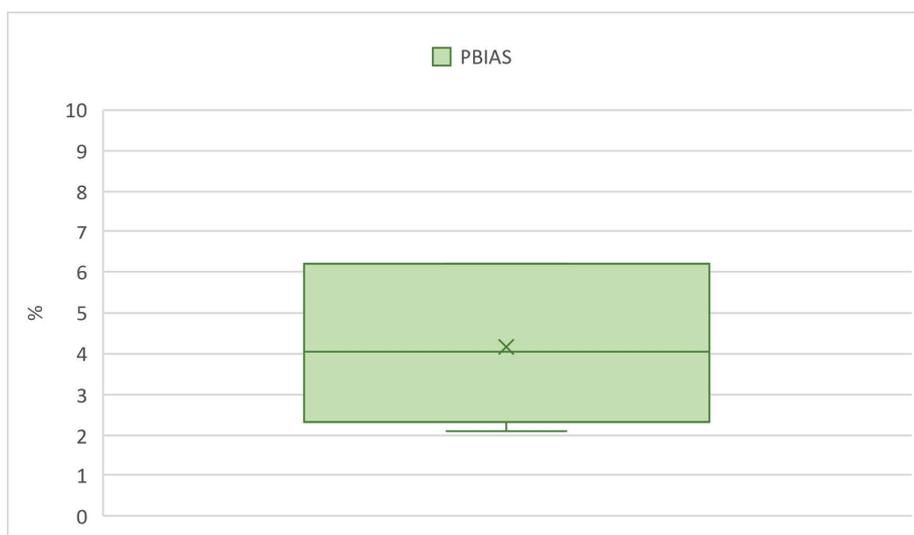


Figura 5.6: Índice PBIAS del análisis de series simuladas de temperatura respecto a observaciones DGA (Tabla 3.4).

De forma general, en la Figura 5.5 se presenta el diagrama de los estadígrafos r^2 , KGE y NSE de las series simuladas de temperatura, en el que se observa que en las estaciones analizadas representan de forma aceptable las observaciones, con valores muy cercanos al óptimo especialmente según NSE y la correlación r^2 . En cuanto al índice PBIAS (Figura 5.6) muestra una sobreestimación leve del producto de temperatura de máximo un 6,1%. Las estaciones presentes en las cuencas de estudio presentan indicadores aceptables, alcanzando valores promedio de r^2 de 0,95, KGE de 0,89, NSE de 0,62 y PBIAS de 4,17. Adicionalmente, todas las estaciones por sí solas presentan valores de indicadores aceptables, aunque presentando una leve sobreestimación por parte del producto grillado CR2MET respecto de los registros observados.

Sin embargo, es importante tener en consideración la disponibilidad de datos. Según lo expuesto en el acápite 3.1.3, la estación de Punta Arenas presenta el mayor número de registros respecto del resto de estaciones del sector, seguida de Villa Tehuelche; con lo que ambas estaciones son consideradas como puntos de observación apropiados para la evaluación del producto CR2MET debido a su gran extensión temporal de datos observados.

En la Figura 5.7 se presenta el análisis gráfico realizado en la estación de Punta Arenas, en la cual se aprecia que la estacionalidad entregada por el producto CR2MET sigue la misma tendencia respecto de las observaciones, existiendo una leve sobreestimación en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo. En un análisis temporal, suele existir una sobreestimación de la temperatura media anual en el periodo de análisis, a excepción de los años entre 2004 a 2011, en los que existe una subestimación por parte del producto grillado CR2MET. En cuanto a los estadígrafos, para este punto se presentan los más altos índices estadísticos (r^2 , KGE, NSE), con valores superiores a lo indicado como aceptable (acápite 4.1.2), aunque con una sobreestimación del 2,1%. Sin embargo, a partir del análisis gráfico y estadístico realizado, se aprecia que el producto grillado logra representar de forma adecuada la temperatura en el punto de estudio.

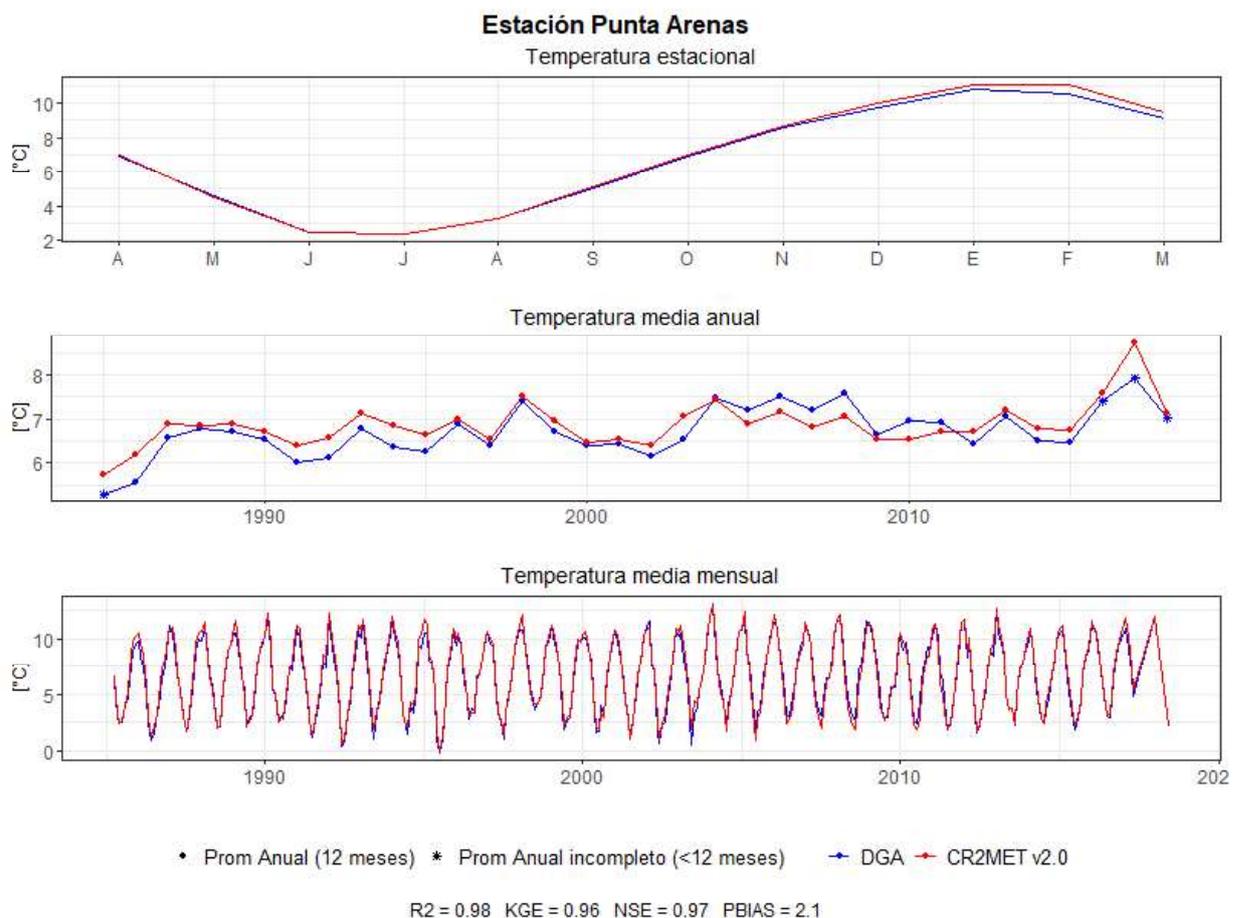


Figura 5.7: Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Punta Arenas.

Siguiendo el mismo análisis, en la estación de Villa Tehuelche se distingue que la estacionalidad entregada por el producto evaluado sigue la misma tendencia respecto de las observaciones al igual que en el caso anterior, existiendo la misma sobre estimación leve en los meses de diciembre a marzo. En cuanto al análisis gráfico temporal, se identifican un mayor número de episodios de sobreestimación de la temperatura media anual que de subestimación de ésta, lo que es confirmado a través del índice PBIAS que indica una sobreestimación de 2,4%. Por su parte, respecto al resto de índices estadísticos, para este punto se presentan valores que califican mucho mayor a lo aceptable según las métricas, denotando que existe igualmente una buena representación de los datos observados para esta estación.

Complementando con el análisis efectuado para el resto de estaciones presentes, tanto para Monte Aymond como Río Perez se obtiene una curva estacional que representa de forma similar a la de las observaciones con leves sobreestimaciones (meses de junio y julio en Monte Aymond, y entre agosto a abril en Río Perez). Por su parte, las estaciones de Ohiggins Villa y Río Perez en Desembocadura no logran generar una curva estacional de todos los meses del año dada la escasez de datos observados que presentan. Con lo anterior, se observa que estas estaciones presentan igualmente una representatividad gráfica aceptable en el limitado periodo analizado.

A partir del análisis realizado para la variable de temperatura media, el producto grillado presenta una buena representación de las observaciones en las estaciones evaluadas.

5.2. Modelo CSIRO RCP 8,5

Como se mencionó anteriormente, el modelo utilizado en el presente trabajo consideraba originalmente un escenario de proyección basado en los productos MCG escalados en la Actualización del Balance Hídrico Nacional a través de la metodología QDM (DGA, 2017). De forma preliminar, se comparan los resultados de las proyecciones escaladas mediante el método previamente mencionado y el método MBCn tratado en el presente trabajo.

A continuación, se presentan las características generales de las proyecciones comparadas en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Caracterización escenarios de proyección implementados en WEAP bajo distintos métodos de escalamiento.

Descripción	CSIRO 8,5 RCP	PEGH (DGA-Hídrica Consultores, 2021)
Modelo de Circulación General	CSIRO	CSIRO
Escenario RCP	8,5	8,5
Método de escalamiento	MBCn	QDM
Demanda	100 % de los DAAs otorgados de carácter consuntivo.	100 % de los DAAs otorgados de carácter consuntivo.

En cuanto a la precipitación, el promedio anual para las proyecciones a partir de QDM y MBCn son de 379,4 y 390,1 mm respectivamente en las cuencas de estudio, por lo que de forma general la precipitación proyectada a partir de MBCn aumenta respecto de la otra metodología. En la Figura 5.8 se presentan las series de precipitación a escala temporal mensual y anual para ambos métodos de escalamiento del modelo de proyección CSIRO 8,5 RCP.

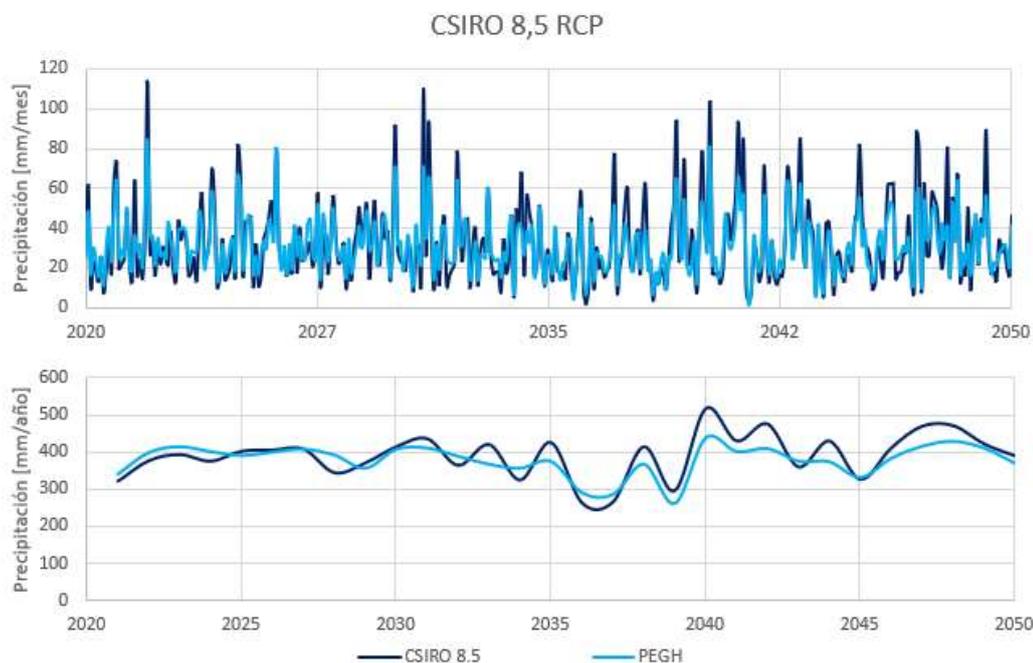


Figura 5.8: Proyección mensual y anual de precipitación de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (abr 2020 - mar 2050).

Las series de precipitación, tanto a nivel mensual como anual, de ambas metodologías muestran tendencias similares durante todo el periodo (incrementos y descensos), sin embargo, la serie a partir de MBCn muestra eventos extremos de precipitación de mayor magnitud

respecto de QDM.

Siguiendo el mismo análisis anterior, el promedio anual para las proyecciones de temperatura a partir de QDM y MBCn son de 6,4 y 4,9 °C respectivamente en las cuencas de estudio, por lo que la temperatura a partir de MBCn aumenta en promedio al menos 1,5 °C respecto de la otra metodología. En la Figura 5.9 se presentan las series de temperatura a diferentes escalas temporales para ambos métodos de escalamiento del modelo de proyección CSIRO 8,5 RCP, donde se aprecia la tendencia oscilatoria de la temperatura, aunque la versión de QDM alcanza mínimos más pronunciados y máximos menores respecto de lo proyectado por la metodología de MBCn.

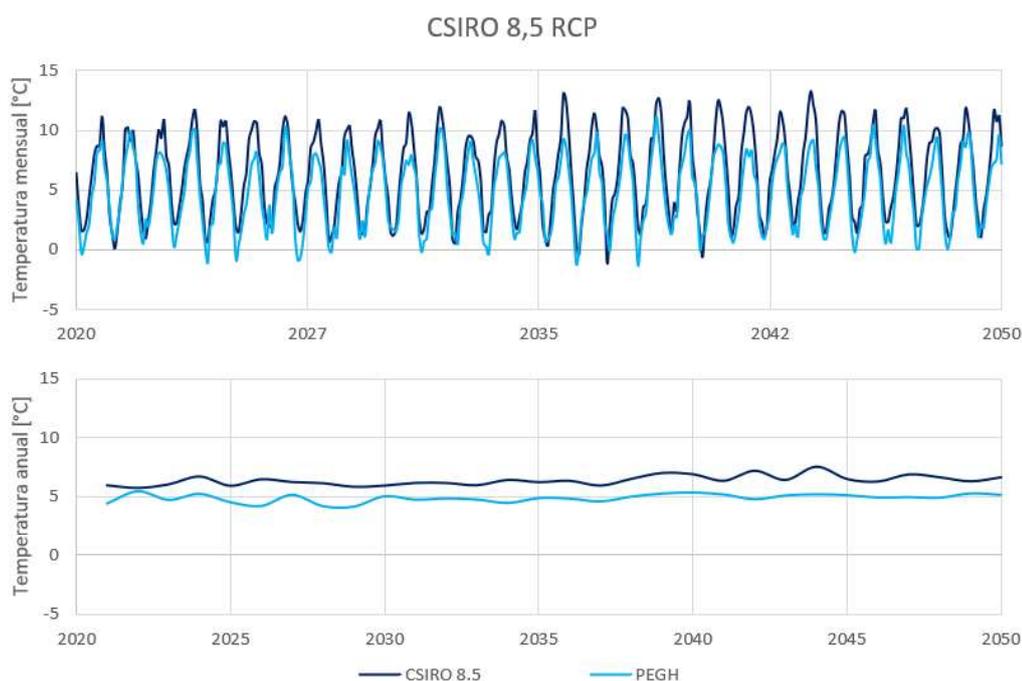


Figura 5.9: Proyección mensual y anual de temperatura de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (abr 2020 - mar 2050).

A nivel estacional (Figura 5.10), la precipitación presenta en ambos casos tendencia similar, con precipitaciones más altas entre marzo y mayo, comenzando el descenso a partir de junio. Por otro lado, en el periodo de julio a noviembre, y enero - febrero, el orden de las precipitaciones mensuales es del mismo orden en ambas metodologías, sin embargo, entre marzo y mayo la metodología de MBCn presenta más altos niveles de precipitación, lo que se puede deber a los altos valores mensuales registrados. Por su parte, la temperatura muestra la misma tendencia según MBCn y QDM, siendo esta última más baja en un orden de 1,1 a 2,3 °C según el mes (a excepción de julio, en el que QDM presenta una temperatura 0,3 °C menos que la propuesta por MBCn).

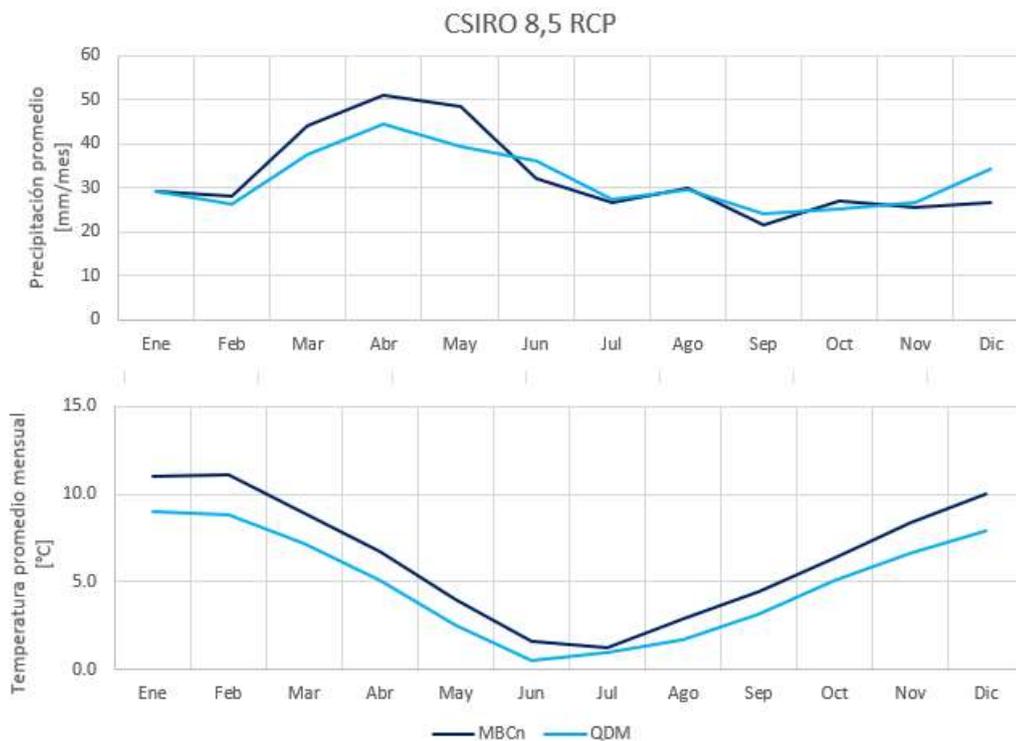


Figura 5.10: Proyección estacional de precipitación y temperatura de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (abr 2020 - mar 2050).

Si bien el modelo CSIRO 8,5 escalado a través de MBCn da proyecciones en promedio más altas (tanto de precipitación como temperatura) que las generadas en el PEGH (DGA, 2021), es importante destacar que la metodología aplicada por este último (QDM) no toma en cuenta la relación entre precipitación y temperatura como la metodología de MBCn. Sin embargo, según se puede apreciar, independiente del método utilizado la estacionalidad no se ve afectada en las proyecciones.

A continuación, se presentan los resultados proyectados para las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico a partir de los MCG escalados mediante la metodología MBCn, utilizando el modelo WEAP-MODFLOW.

5.3. Periodo histórico

El periodo histórico denominado como la ventana temporal 1991-2020, considera el periodo desde abril de 1990 a marzo de 2020. En la Figura 5.11 se presentan las series anuales de las forzantes de precipitación y temperatura, junto con la escorrentía simulada a partir del modelo hidrológico.

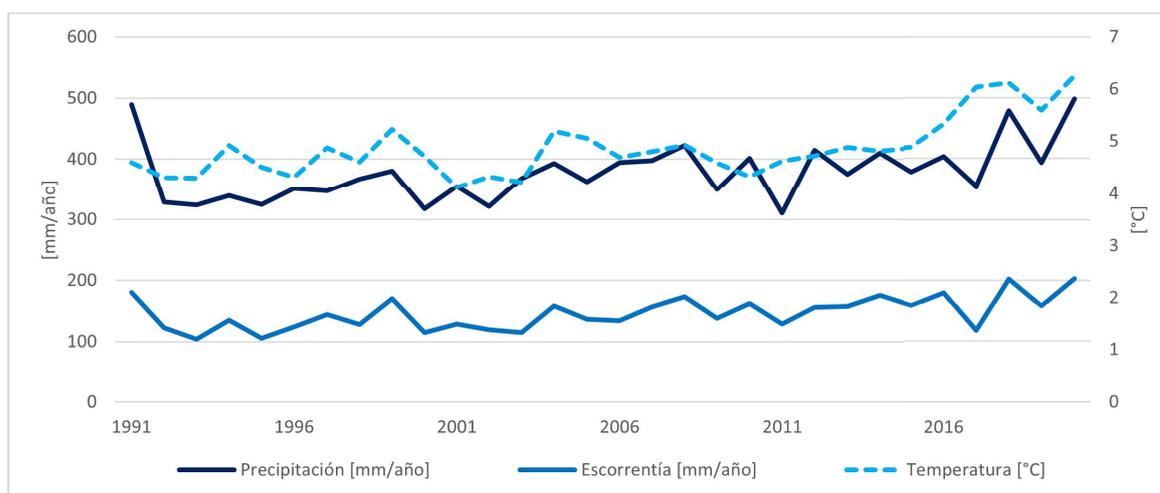


Figura 5.11: Serie anual de precipitación, escorrentía y temperatura de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (abr 1990 - mar 2020).

Los resultados presentados consideran el promedio ponderado por área en las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico, sin perjuicio de poder darse diferentes tendencias sectorialmente en la zona. Independiente de lo anterior, se observa una correcta correlación entre la escorrentía y la precipitación, donde las alzas y bajas de la precipitación tienden a influenciar el comportamiento del flujo en la zona. A su vez, se logra evidenciar la tendencia al alza de la temperatura en al menos los últimos 5 años, factor importante en la generación de escorrentía dado los procesos de evaporación y derretimiento de nieve, donde dependiendo del sector estos procesos pueden ser más o menos relevantes.

Particularmente, en cuanto a la serie de precipitación, presenta un promedio de 378,2 mm/año, donde el mínimo alcanzado ocurre en el año 2011, con 310,2 mm/año, y un máximo de 498,3 mm/año en 2020. Por parte de la temperatura (media anual), se muestra un valor promedio de 4,9 °C en todo el periodo, y sus valores extremos corresponden a 4,1 y 6,3 °C, conseguidos en el año hidrológico 2001 y 2020 respectivamente.

La escorrentía, por su lado, en el periodo histórico presenta un promedio de 146,3 mm/año. La escorrentía máxima se alcanzaría el año 2020, con un valor de 202,6 mm/año (cerca de un 30 % mayor al promedio) siendo consecuente con el año de máxima precipitación y temperatura a nivel anual. En el lado contrario, el mínimo de la serie de escorrentía se alcanza el año 1993 con 104,2 mm/año, en el que si bien no se logra una correlación con el año de mínima de precipitación y/o escorrentía, la precipitación de ese año alcanza los 323,6 mm con una temperatura media anual de 4,3 °C, valores cercanos a los mínimos de las series de estas forzantes. Además, es importante considerar que en el modelo hidrológico se incorporan otras forzantes, particularmente, la humedad relativa y la velocidad del viento, que pueden influenciar la escorrentía generada.

La estacionalidad dentro del periodo histórico de las forzantes de precipitación y temperatura, junto a la de escorrentía simulada históricamente se presentan en la Figura 5.12. Al observar las tendencias de la precipitación, los montos de máxima acumulación se dan principalmente entre los meses de marzo y abril, y los mínimos tienden a darse entre sep-

tiembre y noviembre; por otra parte, existe una tendencia a altas temperaturas en los meses de verano, mientras que los mínimos, en promedio se concentran en los meses de junio y julio, meses desde los que luego comienza un aumento temperatura promedio. Siguiendo el mismo análisis, se aprecia que la escorrentía presenta un régimen mixto nivo-pluvial, donde la mayor escorrentía a nivel mensual se da entre los meses de septiembre y octubre, de la que se intuye es favorecida por el derretimiento de las acumulaciones de precipitación sólida.

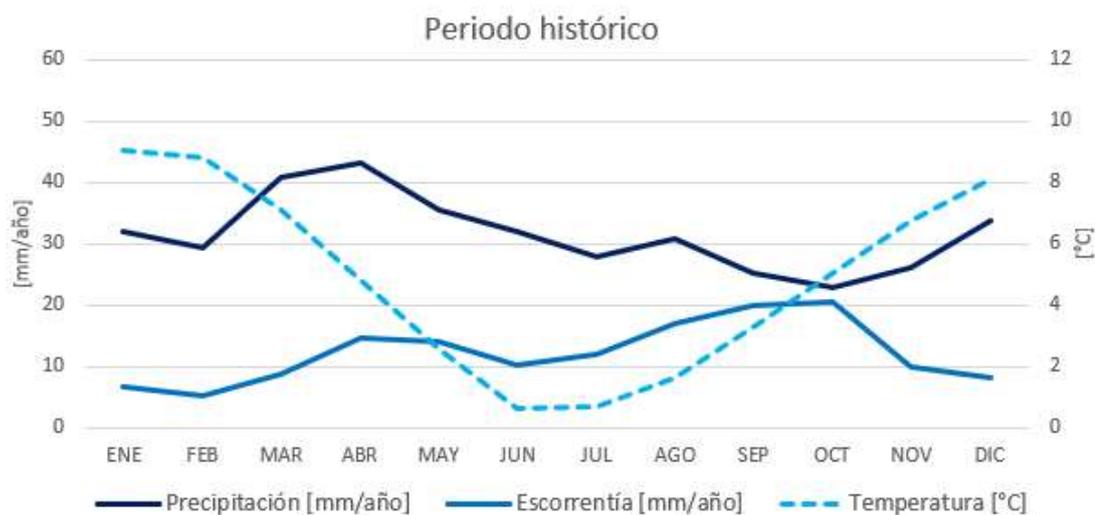


Figura 5.12: Estacionalidad de precipitación, escorrentía y temperatura de las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (abr 1990 - mar 2020).

En la Figura 5.13 se presenta la serie de cobertura porcentual de demanda a nivel mensual. De ella se observa que los cauces de Río Pescado y Río Los Patos presentan meses con coberturas menores al 100 % dentro del periodo 1991-2020, siendo Río Pescado el cauce con mayor número de eventos de cobertura incompleta dentro del periodo. En cuanto al tipo de uso asociado, las demandas de energía (ENE) presentan mayor número de eventos de cobertura, seguida del uso industrial (IND), donde luego el uso agropecuario (APEC) comienza con déficit de cobertura a partir de 2005. Además, los meses totales con cobertura insuficiente corresponden a menos de un 5 % del periodo de análisis.

En cuanto a la estacionalidad de la cobertura de demanda (Figura 5.14), se observa que los tramos simulados con problemas de cobertura están asociados principalmente al cauce de Río Pescado durante el mes de noviembre, siendo el caso más crítico la demanda de tipo de uso de energía (hidrocarburos). Por su parte, el Río Los Patos presenta cobertura promedio de casi un 100 %.

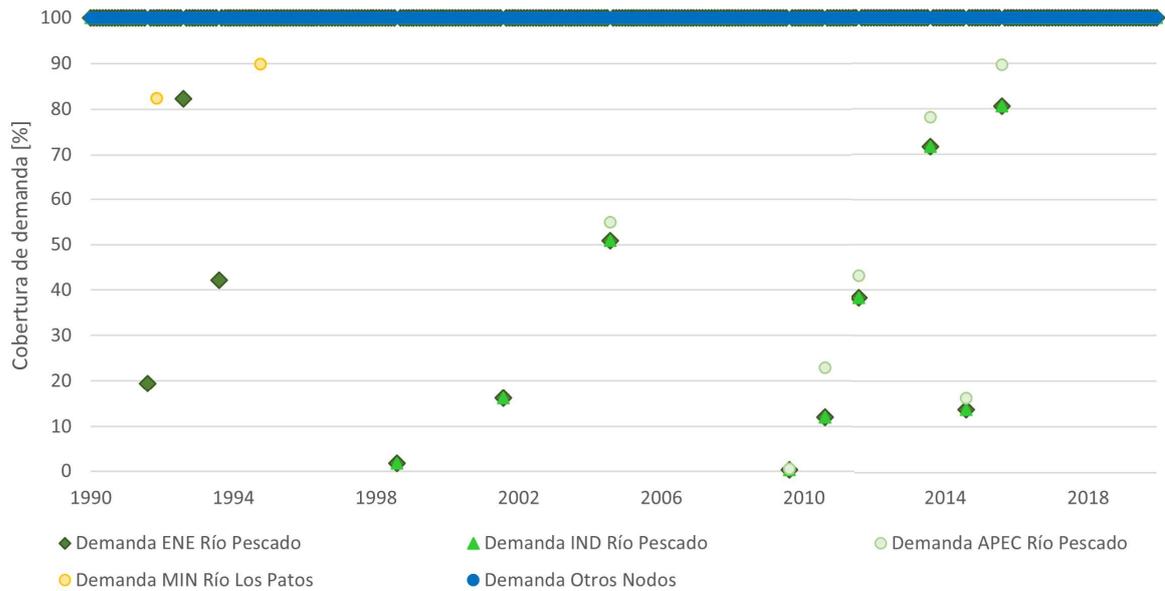


Figura 5.13: Cobertura porcentual de demanda a nivel mensual de las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (abr 1990 - mar 2020).

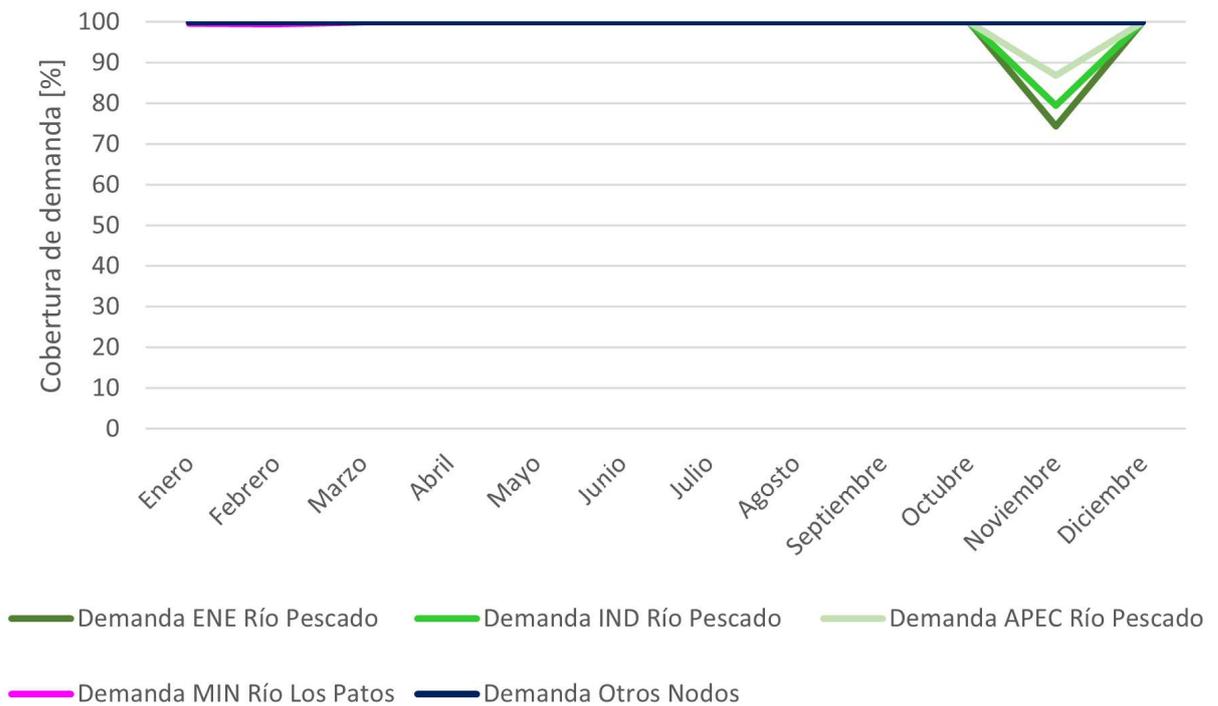


Figura 5.14: Cobertura porcentual de demanda promedio mensual de las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (abr 1990 - mar 2020).

5.4. Periodo futuro

El periodo futuro denominado como la ventana temporal 2021-2050, considera el periodo desde abril de 2020 a marzo de 2050. Los resultados presentados consideran el promedio ponderado por área sin perjuicio de poder darse diferentes tendencias sectorialmente en la zona de estudio. Los casos de proyección comparados responden a cuatro (4) conjuntos de precipitación y temperatura, que consideran como base los MCG CSIRO y CCSM4, ambos en escenarios RCP 8,5 y RCP 6,0.

De forma preliminar y general, se presenta el ciclo anual de precipitación (Figura 5.15) para el periodo histórico y futuro promedio, en la que se distingue una disminución de los montos de precipitación acumulada en los meses de verano respecto de lo histórico. Por su parte, el ciclo anual de temperatura (Figura 5.16) expone un alza en las temperaturas respecto de la línea base.

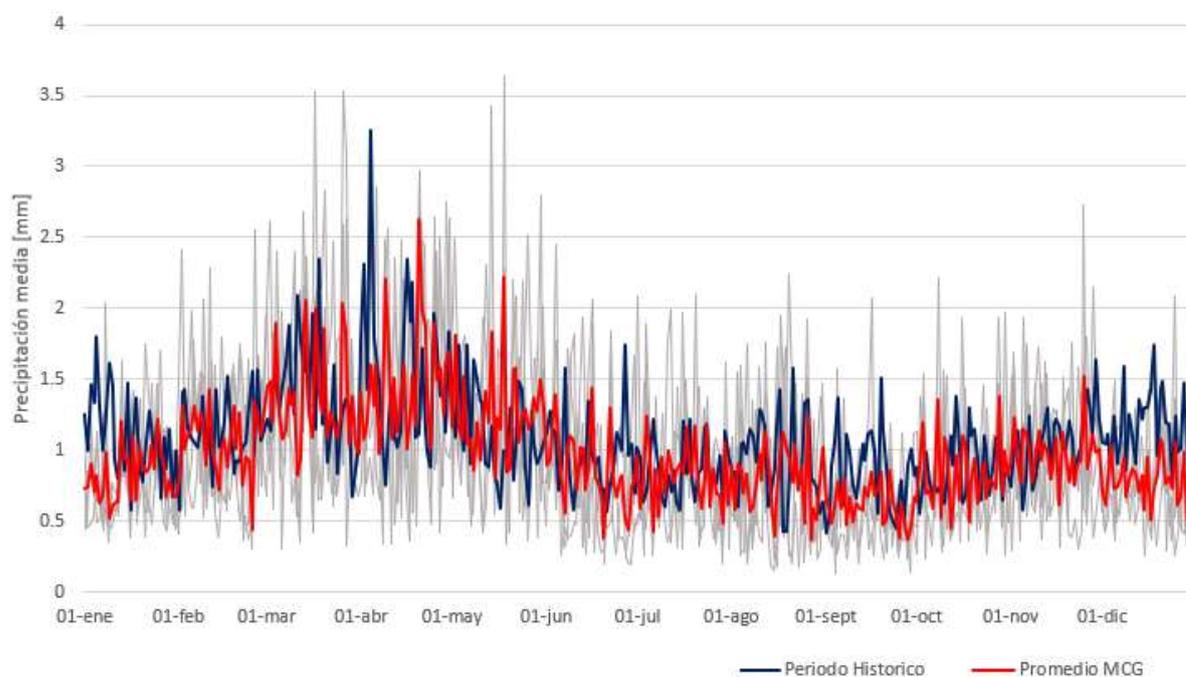


Figura 5.15: Ciclo anual de precipitación de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico. Líneas grises corresponden a proyecciones individualizadas de cada conjunto de proyección.

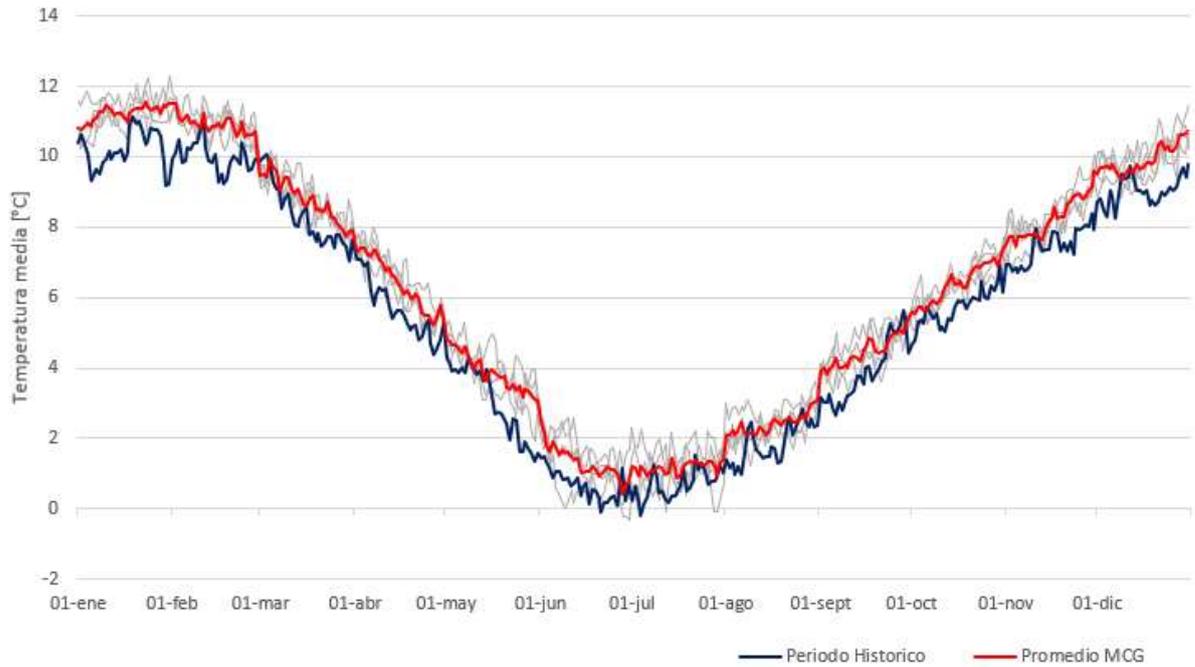


Figura 5.16: Ciclo anual de temperatura media de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico. Líneas grises corresponden a proyecciones individualizadas de cada conjunto de proyección.

5.4.1. Forzantes y escorrentía

En la Figura 5.17 se presentan las series a escala temporal anual de las forzantes de precipitación y temperatura de los diferentes escenarios de proyección, y la escorrentía simulada bajo esos escenarios. En la Tabla 5.2 se presentan los promedios anuales de precipitación, temperatura y escorrentía según el conjunto de proyección, y en la Tabla 5.3 su respectiva variación porcentual según el promedio histórico.

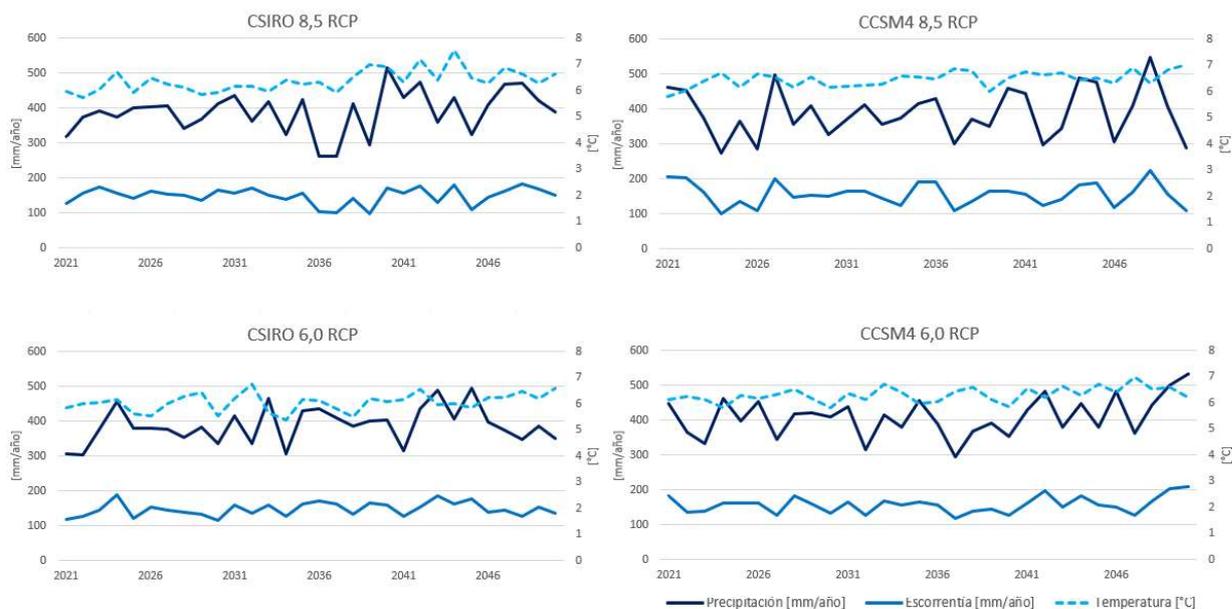


Figura 5.17: Serie anual de precipitación, escorrentía y temperatura de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (abr 2020 - mar 2050).

Tabla 5.2: Precipitación, temperatura y escorrentía simulada promedio según escenario de proyección (2021-2050).

Variable	CSIRO 8,5	CSIRO 6,0	CCSM4 8,5	CCSM4 6,0	Histórico (1991-2020)
Precipitación [mm]	390,1	387,7	389,1	410,5	378,2
Temperatura [°C]	6,4	6,1	6,5	6,3	4,9
Escorrentía [mm]	149,5	147,3	156,5	157,8	146,3

Tabla 5.3: Variación de precipitación, temperatura y escorrentía simulada promedio según escenario de proyección (2021-2050) respecto del promedio histórico (1991-2020).

Variable	CSIRO 8,5	CSIRO 6,0	CCSM4 8,5	CCSM4 6,0
Precipitación [%]	+3.1	+2.5	+2.9	+8.5
Temperatura [°C]	+1,5	+1,2	+1,6	+1,4
Escorrentía [%]	+2.1	+0.7	+7.0	+7.8

De forma general, en cuanto a la precipitación, en los diferentes escenarios se presenta un incremento en el promedio anual para el periodo 2021-2050, siendo el escenario de proyección con mayor incremento de precipitación el de MCG CCSM4 6,0 RCP, aunque la respuesta

en todos los escenarios sigue diferentes tendencias dentro de la serie con alzas y bajas distribuidas en el periodo. Respecto a la respuesta según el modelo MCG, CSIRO presenta menores incrementos de forma anual, siendo sus máximos de 494 y 517 mm/año según el escenario RCP (6,0 y 8,5 respectivamente), y de 534 y 547 mm/año aproximadamente (RCP 6,0 y RCP 8,5) en el MCG CCSM4. Por otro lado, analizando el escenario de impacto, RCP 8,5 presenta valores máximos y mínimos más altos y bajos, respectivamente, respecto a los mismos alcanzados en el escenario RCP 6,0, con lo que el escenario RCP 6,0 se mueve en un menor rango de valores en ambos modelos MCG.

Por su parte, la temperatura media anual en todos los escenarios de proyección presenta un alza importante respecto a la temperatura media anual histórica (a excepción de los últimos 5 años de ésta) de más de 1,2 °C (Tabla 5.3), donde en promedio los MCG presentan temperaturas medias anuales entre 6,1 y 6,5 °C, lo que representa un alza de entre 1,2 a 1,6 grados respecto al promedio alcanzado en el periodo histórico. Respecto a la respuesta de los diferentes escenarios de proyección, la temperatura propuesta en los escenarios de modelo CSIRO presentan mayores amplitudes de oscilación entre años respecto a las temperaturas de modelo CCSM4, que se mueven de forma estable en entre 5,8 y 7,0 °C aproximadamente, al contrario del modelo CSIRO que se mueve 5,4 y 7,5 según el escenario RCP. En cuanto al escenario de impacto, entre los modelos MCG CSIRO, el escenario RCP 8,5 presenta máximos de temperatura pronunciados y un rango que recorre entre 5,7 y 7,5 °C, por su parte el escenario RCP 6,0 se mueve entre los 5,4 y 6,8 °C, con alzas y bajas abruptas en la serie de tiempo; en el caso del MCG CCSM4, en ambos escenarios RCP el rango de temperatura media anual va entre 5,8 a 7,0 °C, aunque el escenario de 8,5 RCP presenta menores oscilaciones a lo largo de la serie temporal respecto del otro escenario RCP, que suele alcanzar temperaturas más bajas.

Independiente de las variaciones mencionadas en las forzantes de precipitación y temperatura, el rango de la escorrentía simulada se mantiene entre 100 y 200 mm al año aproximadamente, donde los modelos MCG en escenario RCP 6,0 presentan valores más estables a lo largo de la serie, al contrario de los MCG de RCP 8,5 que presentan aumentos y descensos anuales abruptos dentro de la serie.

Por otro lado, en la Figura 5.18 se presenta la estacionalidad de las forzantes de precipitación y temperatura de los diferentes escenarios de proyección, y la escorrentía simulada bajo esos escenarios.

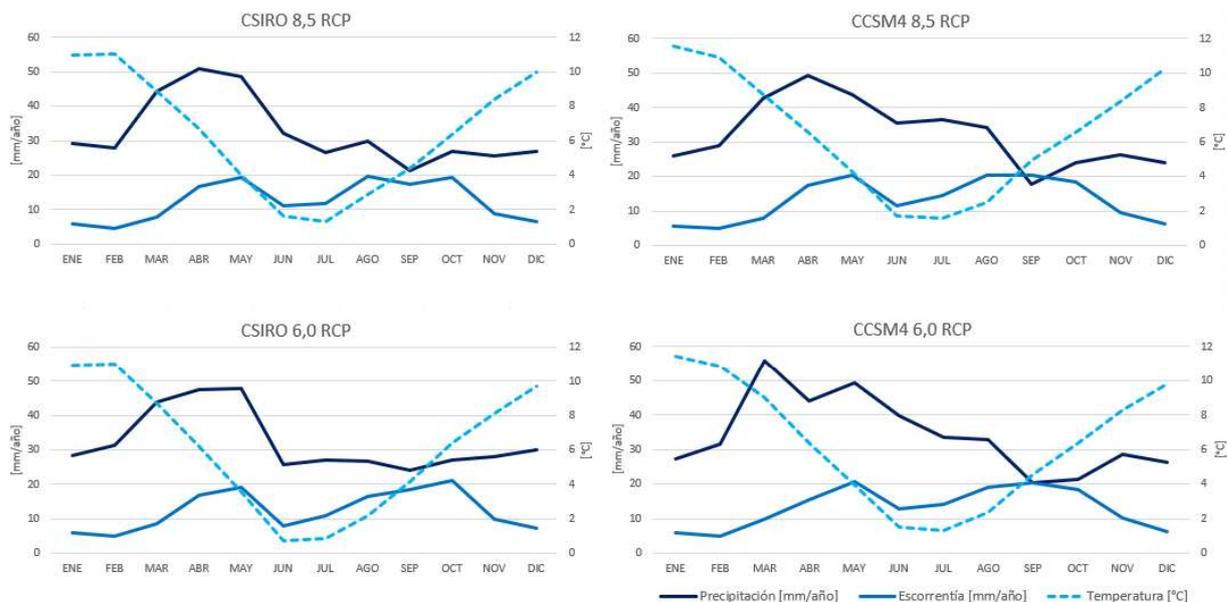


Figura 5.18: Estacionalidad de precipitación, escorrentía y temperatura de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico (abr 2020 - mar 2050).

En los diferentes escenarios de proyección, la precipitación suele seguir una tendencia de presentar las mayores precipitaciones en los meses de de marzo a mayo, junto con un descenso particular en el mes de septiembre que marca el inicio de un periodo de precipitaciones medias. Particularmente, es posible observar que la precipitación por los escenarios de MCG CSIRO, tiende a presentar como temporada principal los meses de marzo a mayo para luego mantener un ritmo medio de las precipitaciones. Por el contrario, los MCG CCSM4, se destacan tres tramos de precipitación, donde luego de la temporada principal, existe un periodo en que ocurren precipitaciones intermedias en los meses de invierno.

Siguiendo el mismo análisis, la temperatura de todos los modelos de proyección MCG responden con una estacionalidad similar al periodo histórico. Particularmente, el modelo CSIRO 6,0 RCP es el que presenta una estacionalidad con mayor similitud respecto al periodo histórico, aunque con un alza considerable en la temperatura promedio asociada a los meses entre noviembre y abril. Por su parte, el resto de escenarios de proyección presentan las mismas tendencias, salvo que con valores más elevados de temperatura respecto al periodo histórico.

En tanto para la escorrentía, la estacionalidad mantiene la tendencia mixta nivo-pluvial registrada en el periodo histórico, aunque ampliando el periodo de escorrentía bajo régimen nival durante la temporada invernal. Considerando la relación de la precipitación y temperatura en los procesos de generación de escorrentía, es posible imaginar que el aumento en las temperaturas hace hostil la generación de nieve en los meses de invierno, incrementando la escorrentía generada en los meses de invierno.

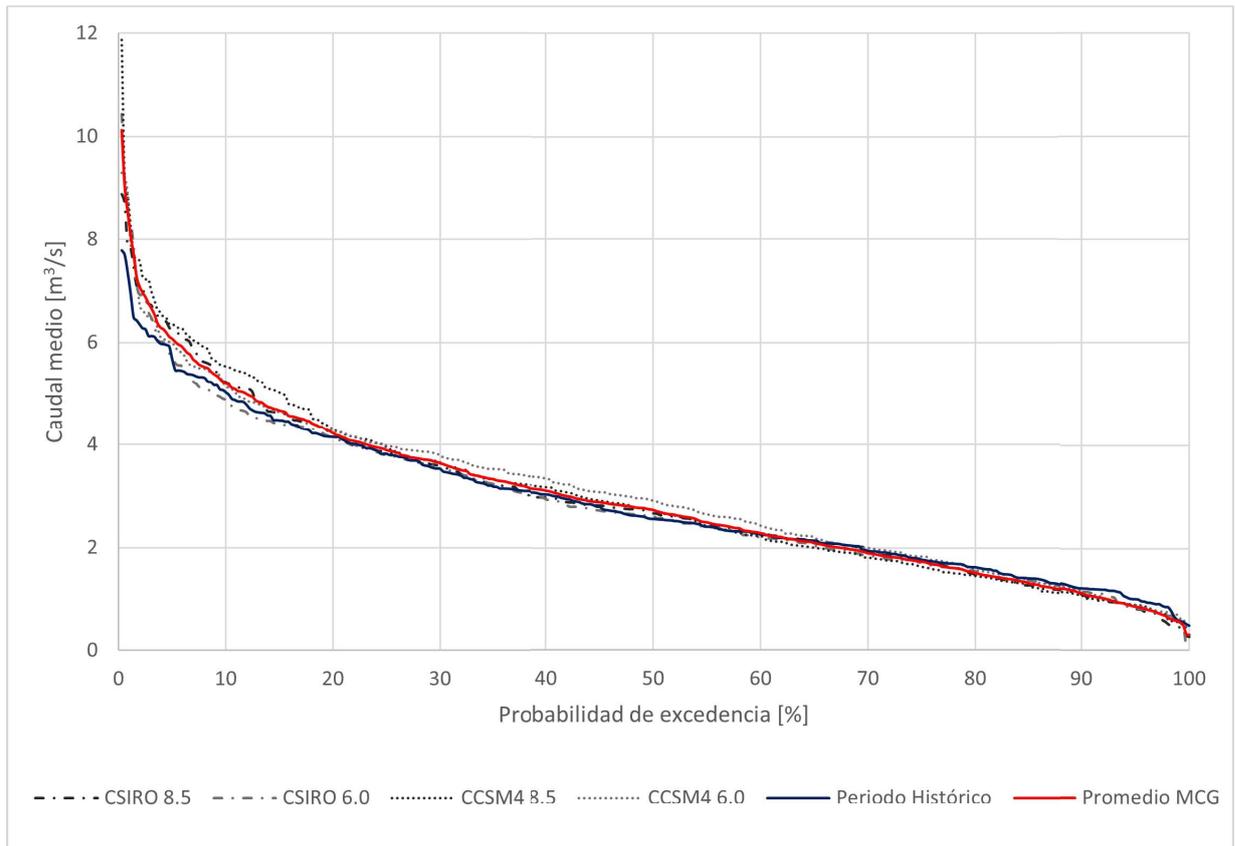


Figura 5.19: Curva de duración de caudales medios para las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico.

Comparando respecto al periodo histórico, a pesar de que todos los escenarios de proyección analizados mantienen tendencias mensuales similares, la estacionalidad presentada en el modelo MCG CSIRO 6,0 RCP tanto para las forzantes (precipitación y temperatura) como para la simulación de escorrentía, muestra la tendencia más semejante y consistente con la existente en el periodo base, siendo este escenario el que presenta las menores variaciones a futuro, de las proyecciones analizadas.

Es importante tener en consideración que la escorrentía calculada por el modelo WEAP implementado no solo depende de la precipitación y la temperatura, sino que también de otras forzantes como la humedad relativa y velocidad del viento. Por otro lado, los parámetros internos del modelo también definen cuánto flujo es generado y a su vez, cuánto es distribuido en los diferentes procesos hidrológicos (por ejemplo, la cantidad de agua que se evapora o infiltra).

5.4.2. Cobertura de demanda

Evaluando los cuatro contextos propuestos, se proyecta la presencia de nodos que no podrán satisfacer la demanda impuesta. En la Figura 5.20 y la Figura 5.21 se presenta la cobertura porcentual de demanda a nivel mensual bajo los diferentes casos futuros. Comparando con la cobertura del periodo histórico (Figura 5.13), se observa que tanto los cauces como número de eventos con demanda con cobertura insuficiente aumentan. Particularmente, los nodos con meses cobertura de demanda menor al 100% corresponden a los tramos de Río Pescado, Río Tres Brazos, Río Santa María y Estero Chabunco.

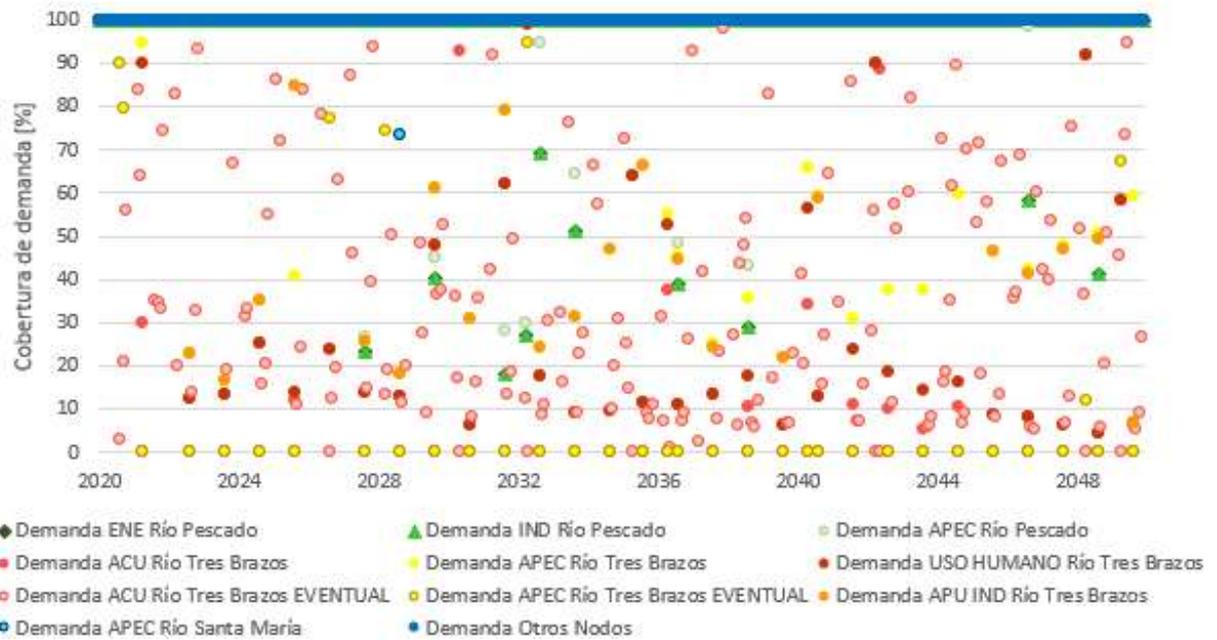
Además, en la Figura 5.22 y la Figura 5.23 se presenta la cobertura porcentual de demanda mensual promedio para los diferentes casos futuros, identificando menor cobertura en el mes de noviembre, seguida del mes de junio.

El Río Pescado, al igual que en periodo histórico (Figura 5.13), presenta meses con cobertura de demanda insuficiente, los cuales se repiten con mayor frecuencia en el periodo futuro respecto del periodo 1991-2020. Estos eventos se concentran en los meses de noviembre para todos los casos de proyección, y en promedio, alcanzaría sobre un 80% de cobertura durante el periodo de análisis.

Dentro del periodo futuro, el cauce con mayores eventos con cobertura insatisfecha es el Río Tres Brazos. Los usos que presentan dificultades de consumo dentro del Río Tres Brazos son acuicultura (ACU), agropecuario (APEC), de uso humano, e industrial (IND), donde los flujos eventuales asociados a ACU y APEC presentarían menores probabilidades de ser cubiertos satisfactoriamente.

Dentro de los cauces con menor brecha, se encuentran el Río Santa María y Estero Chabunco, en los cuales se proyecta solo un evento de cobertura de demanda mensual incompleta en todo el periodo futuro. El Río Santa María, para el consumo agropecuario, presentaría cobertura insuficiente en los casos de modelo base CSIRO. Por su parte, el Estero Chabunco presentaría cobertura insuficiente en los casos CSIRO 6,0 RCP y CCSM4 8,5 RCP.

CSIRO 8,5 RCP



CSIRO 6,0 RCP

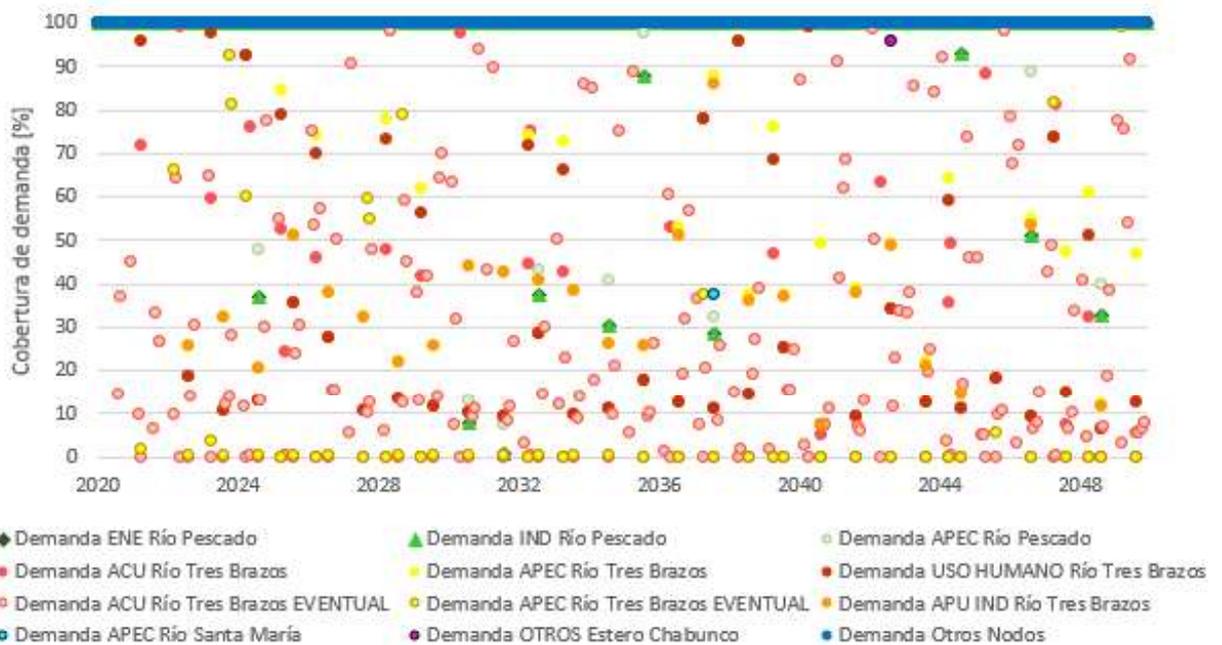
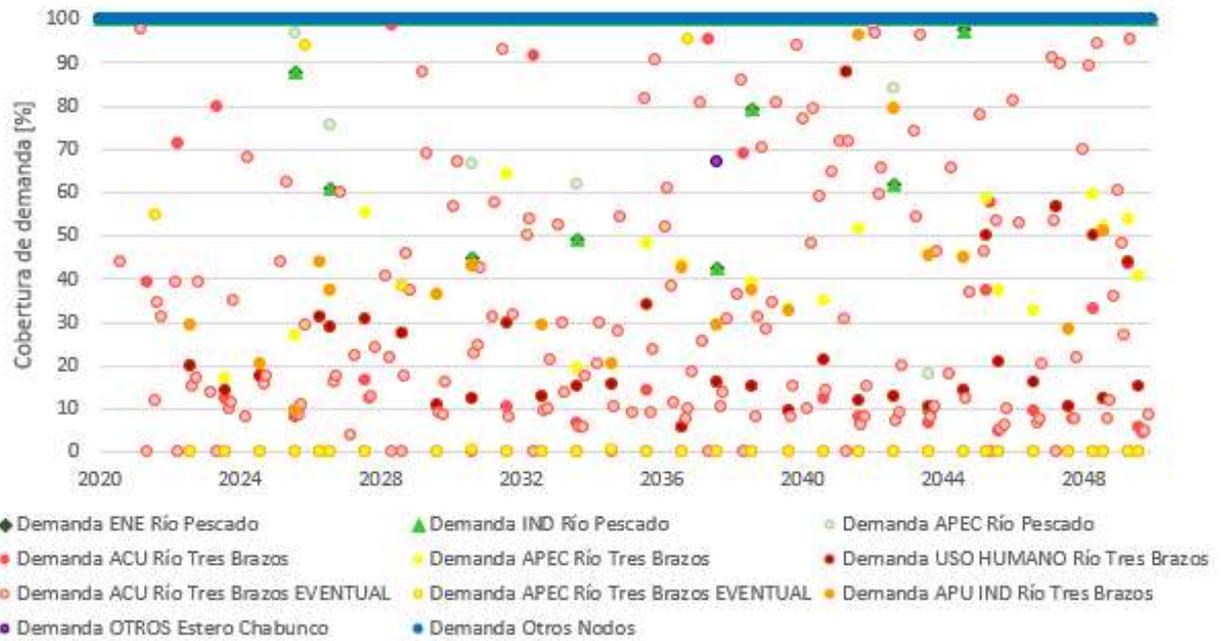


Figura 5.20: Cobertura porcentual de demanda a nivel mensual bajo MCG CSIRO (abr 2020 - mar 2050).

CCSM4 8,5 RCP



CCSM4 6,0 RCP

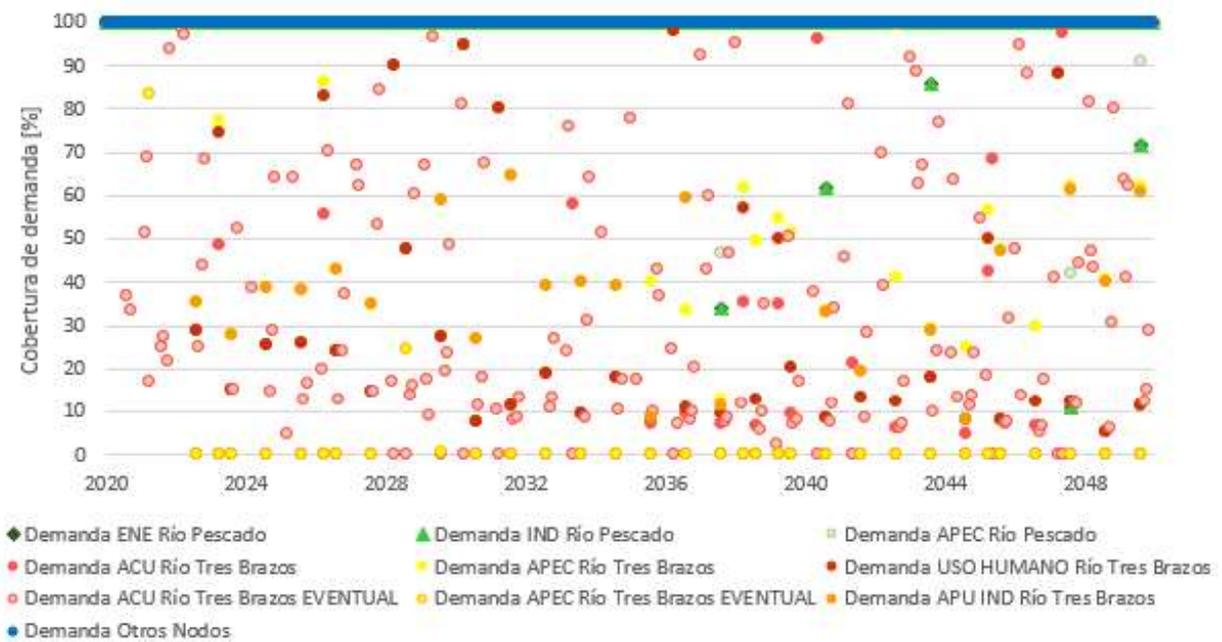


Figura 5.21: Cobertura porcentual de demanda a nivel mensual bajo MCG CCSM4 (abr 2020 - mar 2050).

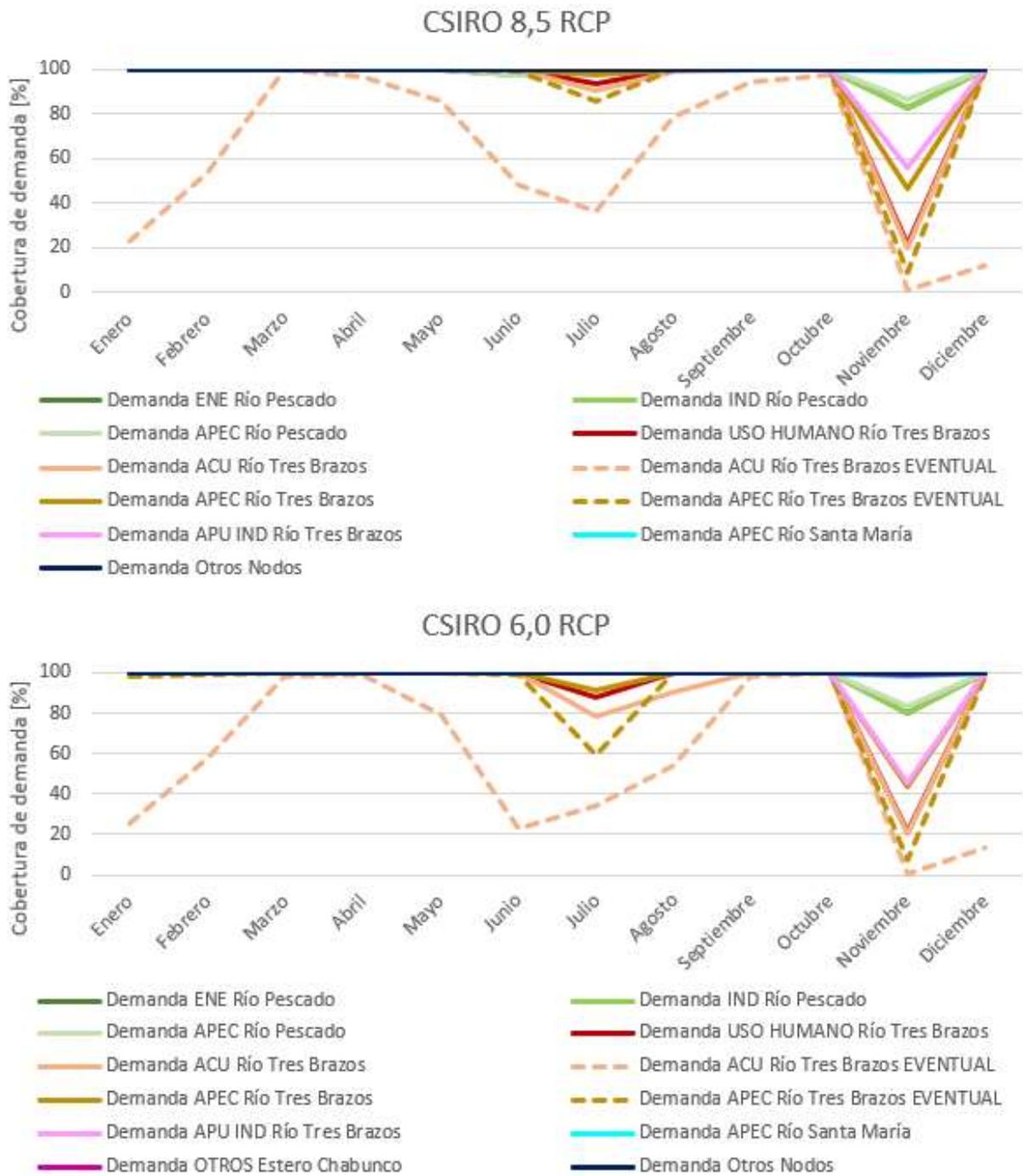


Figura 5.22: Cobertura porcentual de demanda mensual promedio bajo MCG CSIRO (abr 2020 - mar 2050).

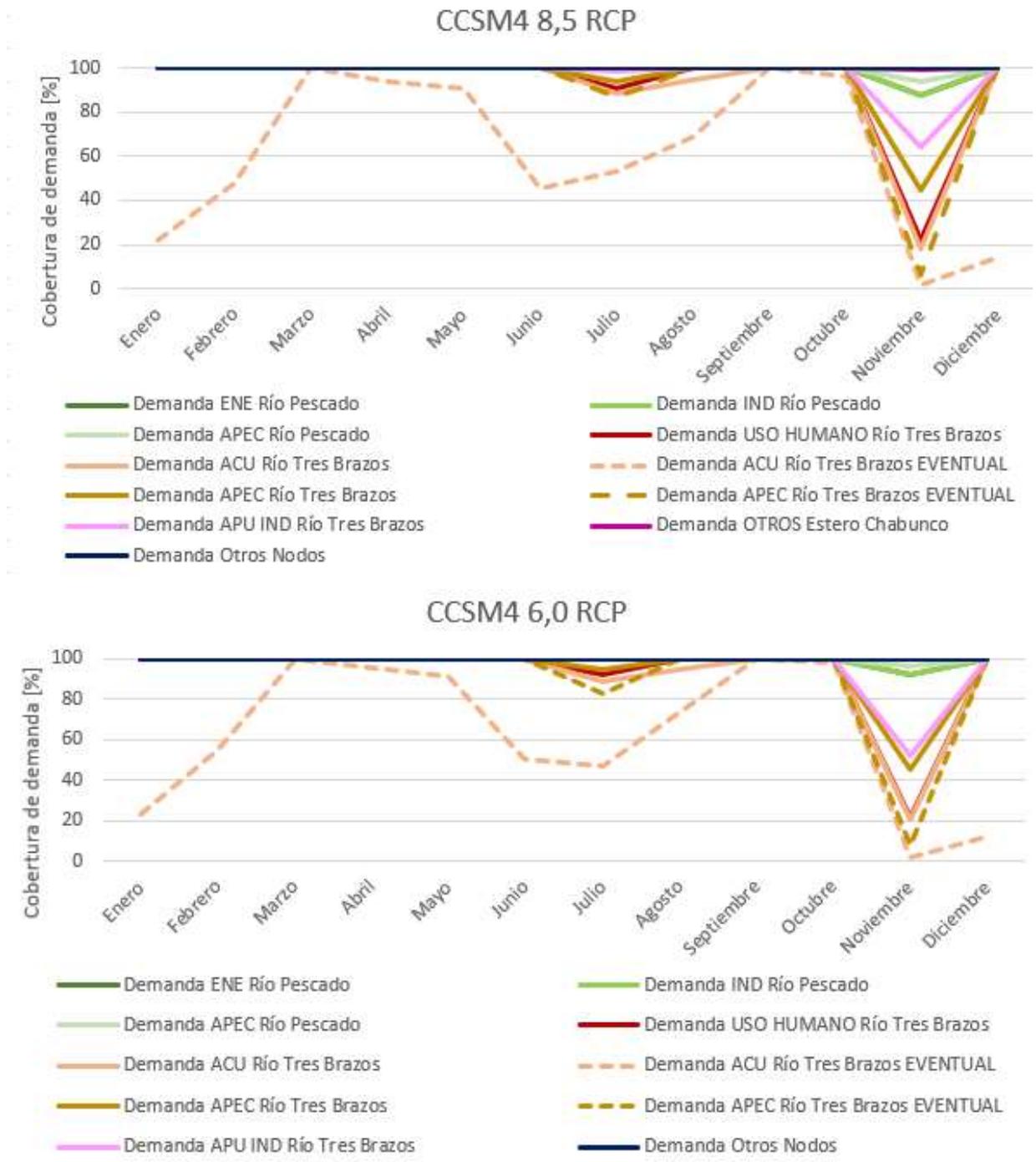


Figura 5.23: Cobertura porcentual de demanda mensual promedio bajo MCG CCSM4 (abr 2020 - mar 2050).

Por otro lado, en cuando a los montos de demanda no cubierta, en la Figura 5.24 se presenta la demanda insatisfecha promedio mensual según los distintos casos de proyección evaluados. Confirmando lo observado en los resultados mencionados anteriormente, para las diferentes simulaciones futuras los meses de mayor demanda insatisfecha corresponden a los meses de noviembre y diciembre alcanzando demandas sin cubrir de cerca de $6 \text{ hm}^3/\text{mes}$, seguidos del mes de junio (entre 3 y $4 \text{ hm}^3/\text{mes}$, a excepción de CSIRO $6,0 \text{ RCP}$). A su vez, el mes de marzo es el mes con mayor cobertura de demanda en todos los casos propuestos, lo cual se apoya en la tendencia a menor demanda mensual (Figura 3.7) y el periodo de mayores montos de escorrentía que suele iniciar el mes de marzo (Figura 5.18).

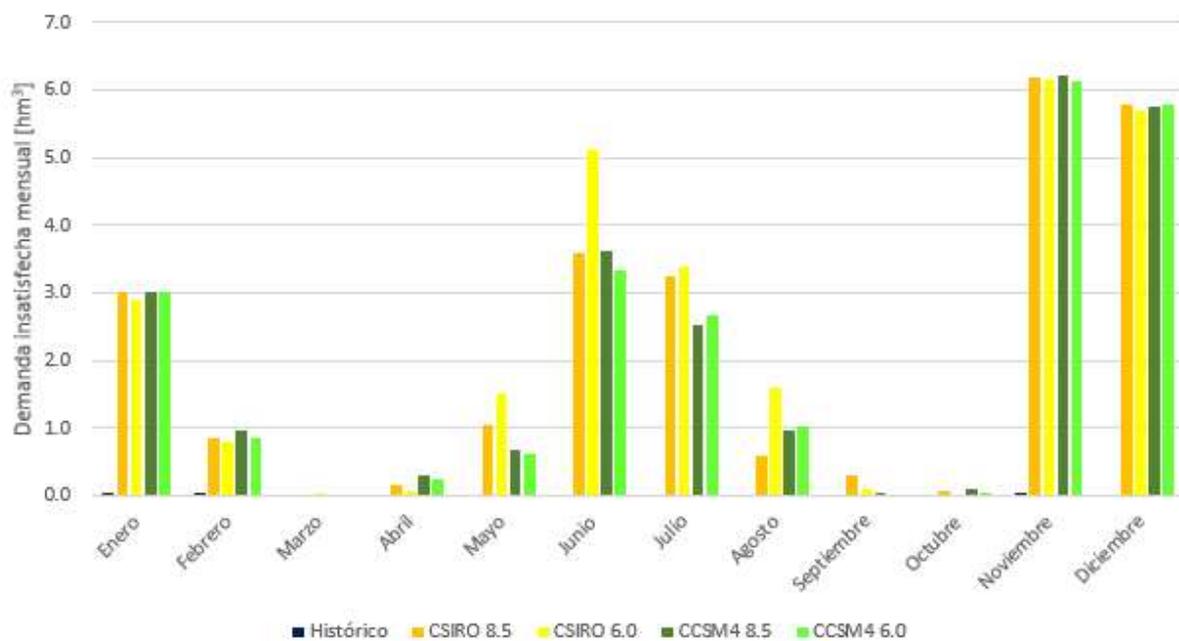


Figura 5.24: Comparación demanda mensual insatisfecha promedio entre periodo histórico y periodo futuro bajo los distintos casos de proyección.

Respecto al volumen que falta por satisfacer (Tabla 5.4), este fluctúa entre los $23,7$ y $27,4 \text{ hm}^3/\text{año}$ según el caso evaluado, donde la proyección a partir de CSIRO $6,0 \text{ RCP}$ presenta la mayor demanda insatisfecha, consistente con su leve aumento en la escorrentía estimado ($+0,7\%$). En la misma línea, los escenarios que utilizan el modelo CCSM4 presentan menos déficit anual en el periodo $2021-2050$ respecto de los escenarios de proyección de modelo CSIRO, lo que se justifica con el aumento porcentual proyectado para la escorrentía, del orden de un $+7,4\%$ promedio (versus el aumento porcentual promedio de $1,4\%$ de los casos CSIRO).

Tabla 5.4: Demanda insatisfecha anual promedio en el periodo futuro (2021-2050).

Caso futuro	Demanda insatisfecha periodo 21-50 [$hm^3/año$]
CSIRO 8,5	24,8
CSIRO 6,0	27,4
CCSM4 8,5	24,2
CCSM4 6,0	23,7

Capítulo 6

Conclusiones

A partir de los objetivos planteados y los capítulos expuestos a lo largo de este trabajo, se presentan a continuación las conclusiones y comentarios finales de los resultados obtenidos a través del escalamiento de la precipitación y temperatura provenientes de los MCG como proyección y la utilización del modelo WEAP-MODFLOW para el análisis de la disponibilidad hídrica de las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico.

Comentarios generales

Para el desarrollo del presente trabajo fue necesaria la utilización de un modelo hidrológico basado en la información existente en antecedentes, previamente calibrado para su adaptación con la zona de estudio y representación aceptable de los flujos simulados.

Por otro lado, dada la necesidad de proyección de variables meteorológicas futuras, se realizó un análisis de las forzantes de precipitación y temperatura provenientes del producto grillado CR2MET (v2.0) con el fin de validar e identificar posibles sesgos que pudiesen afectar el resultado final en la proyección de forzantes.

Luego, a partir de los MCG previamente seleccionados para la zona, se realiza el escalamiento estadístico MBCn, utilizando interpolación bilineal, y con base observacional el producto grillado CR2MET (v2.0) de las variables de precipitación y temperatura a nivel diario.

Finalmente, se generaron las series de precipitación y temperatura para el periodo futuro a partir del promedio ponderado de cada subsubcuenca de las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico y se incorporaron en cuatro (4) casos de proyección en el modelo hidrológico WEAP-MODFLOW, permitiendo reproducir el comportamiento hidrológico y cobertura de demanda que se espera bajo el consumo proyectado y los diferentes casos futuros propuestos.

Conclusiones

En primer lugar, respecto a la evaluación de la representatividad del producto grillado CR2MET en la zona de estudio, se identifica una buena representación de la variable de temperatura media respecto de las observaciones existentes, sin embargo, en la variable de precipitación se identifican grandes sesgos por parte del producto grillado, por lo que se recomienda utilizar los resultados con cautela. También, es posible concluir que dados los escenarios RCP y modelos evaluados, en general, a nivel de cuenca, para el periodo de proyección para los casos simulados, existe una tendencia al aumento de la precipitación (+4,25 % promedio) y la temperatura (+1,4 °C promedio) y a su vez, en la escorrentía (+4,40 % promedio) en las cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico. Sin embargo, esta inclinación no sería suficiente para satisfacer de forma efectiva la demanda proyectada; particularmente en los tramos de Río Pescado, Río Tres Brazos, Río Santa María y Estero Chabunco; a partir de los derechos actualmente constituidos (DAAs de tipo consuntivo) tomando en cuenta lo proyectado por DGA (2021) de ser necesaria su utilización.

Por otro lado, a una escala menor, según el catchment que se analice se pueden observar aumentos o disminuciones respecto al periodo histórico no necesariamente siendo consistente con la variación de precipitación (que un aumento en la precipitación incrementa la escorrentía, o viceversa) como se da en el caso promedio de las cuencas de estudio. Lo anterior, no permite sacar conclusiones de tendencia clara de cómo impacta la variación de precipitación en la disponibilidad del recurso de forma sectorizada en la zona, lo cual se debe a que en el cálculo de los flujos existen otras variables meteorológicas involucradas que pueden ser preponderantes en el sector.

En cuanto al impacto que tiene el escenario de proyección adoptado, dadas las condiciones implementadas en la modelación, la estimación efectuada a partir de CSIRO RCP 6,0 es la que presenta un menor incremento de precipitación anual promedio (2,5 %), y en el otro extremo, la proyección a partir de CCSM4 RCP 6,0 ofrece un mayor incremento de precipitaciones (8,5 %); ambos respecto al periodo histórico. En el caso de esta variable, los modelos CSIRO y CCSM4 en escenario RCP 8,5 presentan un incremento promedio del 3 % respecto del periodo histórico, por lo que se concluye que bajo el escenario RCP 8,5 no existiría mayor impacto entre ambos modelos estudiados respecto a la proyección de precipitación en la zona de estudio.

En el caso de la escorrentía, en las cuencas estudiadas al impacto que tiene el escenario de proyección adoptado se rige por el modelo MCG, por sobre el escenario de forzante radiativa, donde el modelo CCSM4 (en promedio según ambos escenarios RCP) incrementaría un 7,4 % la escorrentía anual promedio, por sobre el aumento promedio de 1,4 % del modelo CSIRO. A su vez, el caso futuro que presenta un menor aumento en la escorrentía es la proyección de CSIRO 6,0 RCP que presenta un 0,7 % de incremento respecto al periodo histórico. Por otro lado, se proyecta una tendencia a un aumento en los montos de caudales de eventos extremos y una disminución en los caudales de mayor probabilidad de excedencia.

Es importante tener en consideración que la escorrentía calculada por el modelo WEAP implementado no solo depende de la precipitación, sino que también de la temperatura y otras forzantes como la humedad relativa y velocidad del viento. Por otro lado, los parámetros internos del modelo también definen cuánto flujo es generado y a su vez, cuánto es

distribuido en los diferentes procesos hidrológicos (por ejemplo, la cantidad de agua que se evapora o infiltra).

De forma general, la demanda proyectada presentaría altos consumos en los meses de mayo a diciembre. Contrastando con las tendencias mensuales de escorrentía, los meses de mayor magnitud de escorrentía (septiembre - octubre) coinciden con los meses de mayor cobertura porcentual de demanda. Por otro lado, el mes de marzo proyecta leves volúmenes de consumo respecto al resto de los meses, siendo en promedio suficiente la disponibilidad hídrica para cubrir la demanda proyectada.

La demanda insatisfecha, que alcanza hasta $6,2 \text{ hm}^3/\text{mes}$ promedio en noviembre, se ve relacionada de forma inversamente proporcional al incremento de la escorrentía. En el caso del modelo CCSM4, el número de meses con demandas insatisfechas disminuye respecto de los meses insatisfechos de los escenarios de proyección de modelo CSIRO. Sin embargo, la situación no es menor alcanzando un volumen promedio de entre $23,7$ y $27,4 \text{ hm}^3/\text{año}$ de demanda insatisfecha dentro del periodo 2021-2050, viéndose particularmente afectados los sectores de Río Tres Brazos y Río Pescado por lo que otorgación de nuevos derechos de aprovechamiento de tipo consuntivo no serían adecuados según lo simulado.

Recomendaciones

Comentarios respecto de escalamiento estadístico realizado

En cuanto posibles sesgos sobre el método de escalamiento aplicado, se utilizó en el desarrollo del método MBCn el producto grillado CR2MET, que según el análisis realizado presenta grandes sesgos para la variable de precipitación a partir de los datos observados de estaciones DGA, sin mostrar una tendencia clara de sesgo según el sector de estos puntos de registro observacional e incluso siendo escasamente representada para ciertas estaciones (por ejemplo, el sector de Río Rubens, San Juan y Penitente Alto).

Al tratarse de un CMIP con ventana histórica hasta el año 2005, no es posible representar apropiadamente al menos los últimos 15 años del periodo histórico contemplado, por lo que sin duda afecta a los resultados obtenidos. La utilización de modelos de proyección más recientes, como la versión CMIP6, podría presentar mejores resultados al tener un periodo más amplio de simulaciones de periodo histórico con los cuales corregir las proyecciones de los MCG.

Comentarios respecto de la modelación hidrológica

El modelo hidrológico implementado incorporó forzantes de precipitación, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa, sin embargo, información apropiada de otras variables (por ejemplo, albedo, cobertura de nubes, entre otros) y de parámetros característicos de la zona de estudio podrían permitir resultados con menor incertidumbre respecto a la disponibilidad hídrica futura. En la misma línea, mayor certeza del consumo efectivo por parte de los sectores demandantes de agua permitiría evaluar con mayor precisión la brecha en la zona.

Por otro lado, las métricas del modelo hidrológico utilizado en algunos casos presenta zonas con altos sesgos porcentuales, siendo mayoritariamente subestimado en los puntos de calibración evaluados; también, en las estaciones de calibración, las series simuladas no representan adecuadamente los flujos según un valor óptimo de índice KGE ni NSE. Un mayor ajuste del modelo utilizado podría mejorar considerablemente la representación hidrológica obteniendo mejor precisión en las simulaciones.

Bibliografía

- Araya-Osses, D., Casanueva, A., Román-Figueroa, C., Uribe, J. M., y Paneque, M. (2020). Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics*, 54(9-10), 4309–4330. doi: 10.1007/s00382-020-05231-4
- Barria, P., Peel, M., Walsh, K., y Garreaud, R. (2017). Analysis of within and between-GCM uncertainties of runoff projections in Mediterranean-like catchments. *Journal of Southern Hemisphere Earth System Science*, 67(3), 181–213. doi: 10.22499/3.6703.003
- Berrisford, P., Dee, D., Poli, P., Brugge, R., Fielding, M., Fuentes, M., ... Simmons, A. (2011). *The ERA-Interim archive Version 2.0*. ECMWF.
- Boisier, A.-G. C. C. J. O. A. V. N. R. R., J. P. (2018). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydro-climatic research in Chile. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 20, 19739.
- Cannon, A. J. (2016). Multivariate bias correction of climate model output: Matching marginal distributions and intervariable dependence structure. *Journal of Climate*, 29(19), 7045–7064. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0679.1
- 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. doi: 10.1007/s00382-017-3580-6
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., y Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28(17), 6938–6959. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00754.1
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. (2018). Proyecto “Simulaciones climáticas regionales y marco de evaluación de la vulnerabilidad”.
- David Yates, D. R. P., Jack Sieber, y Huber-Lee, A. (2005). WEAP21—A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model: Part 1, Model Characteristics. *Water International*, 30(4).
- DGA. (2008a). Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos en la cuenca del río Maipo. Fase II, S.I.T. N° 133 . *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación; Consultoría en Ingeniería Luis Arrau del Canto E.I.R.L.*
- DGA. (2008b). Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos en la cuenca del río Maule. Fase II, S.I.T. N° 134 . *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación; Consultoría en Ingeniería Luis Arrau del Canto E.I.R.L.*

- DGA. (2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional. *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Elaborado por: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile.*
- DGA. (2018). Aplicación de la metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de las Macrozonas Norte y Centro. SIT N° 435. *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Elaborado por: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile.*
- DGA. (2019a). Aplicación de la metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de la Macrozona Sur y parte Norte de la Macrozona Austral. SIT N° 444. *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Elaborado por: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile.*
- DGA. (2019b). Aplicación de la metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de la parte sur de la macrozona Austral e Isla de Pascua. SIT N° 441. *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Elaborado por: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile.*
- DGA. (2020a). Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la cuenca de Huasco. *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación; UTP Hídrica Consultores SPA y Rubio Cartes y Meza Ingenieros Consultores LTDA (UTP Hídrica - ERIDANUS).*
- DGA. (2020b). Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la cuenca de Aconcagua. *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación; UTP Hídrica Consultores SPA y Rubio Cartes y Meza Ingenieros Consultores LTDA (UTP Hídrica - ERIDANUS).*
- DGA. (2020c). Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la cuenca del Maule. *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación; UTP Everis Chile S.A. y Hidrogestión S.A..*
- DGA. (2021). Plan Estratégico de Gestión Hídrica en las Cuencas de Punta Arenas y Vertientes del Atlántico. *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación; UTP Hídrica Consultores SPA y Rubio Cartes y Meza Ingenieros Consultores LTDA (UTP Hídrica - ERIDANUS).*
- Dionizis, D., Ojeda, P., Quezada, S., Lagos, M., y Montserrat, S. (2021). Implicancias de la elección del Método de escalamiento Estadístico de Modelos de Circulación general en proyecciones de cambio hidrológico. *Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, 4(1), 1-23.*
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M., Bi, X., . . . Brankovic, C. (2012). RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research, 52, 7-29.*
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., y Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology, 377(1-2), 80-91.* doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003

- Gupta, H. V., Sorooshian, S., y Yapo, P. O. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135–143. doi: 10.1061/(asce)1084-0699(1999)4:2(135)
- Harbaugh, A. (2005). MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular groundwater model – the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16.
- Hersbach, B. B. B. P. H. S. H. A. M. J. . . T. J. N., H. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.
- IDE. (2021). *División Política Administrativa*. Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo.
- INE. (2017). *Censo de Población y Vivienda*.
- IPCC. (2012). *Gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático*.
- Kidson, J. W., y Thompson, C. S. (1998). A comparison of statistical and model-based downscaling techniques for estimating local climate variations. *Journal of Climate*, 11(4), 735–753. doi: 10.1175/1520-0442(1998)011<0735:ACOSAM>2.0.CO;2
- Krause, P., Boyle, D. P., y Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89–97. doi: 10.5194/adgeo-5-89-2005
- Legates, D. R., y McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of 'goodness-of-fit' measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233–241. doi: 10.1029/1998WR900018
- Mizukami, N., Clark, M. P., Gutmann, E. D., Mendoza, P. A., Newman, A. J., Nijssen, B., . . . Brekke, L. D. (2016). Implications of the methodological choices for hydrologic portrayals of climate change over the contiguous united states: Statistically downscaled forcing data and hydrologic models. *Journal of Hydrometeorology*, 17(1), 73–98. doi: 10.1175/JHM-D-14-0187.1
- Najafi, M. R., Moradkhani, H., y Jung, I. W. (2011). Assessing the uncertainties of hydrologic model selection in climate change impact studies. *Hydrological Processes*, 25(18), 2814–2826. doi: 10.1002/hyp.8043
- Nash, J. E., y Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting through Conceptual Models: Part I. A Discussion of Principles. *ournal of Hydrology* 10 (3): 282-90..
- Pitié, F., Kokaram, A. C., y Dahyot, R. (2007). Automated colour grading using colour distribution transfer. *Computer Vision and Image Understanding*, 107(1-2), 123–137. doi: 10.1016/j.cviu.2006.11.011
- Santhi, C., J. G. Arnold, J. R. W., W. A. Dugas, R. S., y Hauck., L. M. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. American Water Resources Assoc.*
- Sanzana, P., Moncada, A., Vicuña, S., Purkey, D., Suárez, F., Muñoz, J.-F., y Gironás, J. (2020). Consideraciones Metodológicas para la modelación superficial y subterránea integrada aplicada a Planes de Gestión Hídrica en Chile. En *Rutas hidrológicas: Recordando a un colega por los senderos de la hidrología*.

- Schlosser, C., K. Strzepek, X. G., C. Fant, É. B., S. Paltsev, H. J., Reilly, J., y Gueneau, A. (2014). The future of global water stress: An integrated assessment. *Earth's Future*.
- Storch, H. v., Zorita, E., y Cubasch, U. (1993). Downscaling of Global Climate Change Estimates to Regional Scales: An Application to Iberian Rainfall in Wintertime.
- Surfleet, C. G., Tullos, D., Chang, H., y Jung, I. W. (2012). Selection of hydrologic modeling approaches for climate change assessment: A comparison of model scale and structures. *Journal of Hydrology*, 464-465, 233–248. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.07.012
- Van Liew, M. W., Arnold, J. G., y Garbrecht., J. D. (2003). Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models.
- Vano, J. A., Kim, J. B., Rupp, D. E., y Mote, P. W. (2015). *Selecting climate change scenarios using impact-relevant sensitivities*.
- Vicuña, S., Vargas, X., Boisier, J. P., Mendoza, P. A., Gómez, T., Vásquez, N., y Cepeda, J. (2021). Impacts of Climate Change on Water Resources in Chile. , 347–363. doi: 10.1007/978-3-030-56901-3{_}19
- y Constituyente, L. C. C. (2021). Encuesta sobre percepciones de la ciudadanía de Punta Arenas sobre cambio climático, gobernanza climática y aspectos constitucionales. *Punta Arenas: Universidad de Chile, Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo.*

Anexos

Anexo A. Proyecto CMIP5

Tabla A.1: Descripción MCG pertenecientes al proyecto CMIP5 (Adaptado de Barria et al., 2017).

MCG	Centro	Resolución		Ozono estratosférico
		Atmosférica	Oceánica	
ACCESS1-0	Centre for Australian Weather and Climate Research, Australia	1,875° x 1,25°	1° x 1°	No-Chem
ACCESS1-3	Centre for Australian Weather and Climate Research, Australia	1,875° x 1,25°	1° x 1°	No-Chem
BNU-ESM	College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, China	2,7906°x2,8125°	1° x 1°	Chem
CCSM4	National Centre for Atmospheric Research, USA	0,9424°x1,25°	1° x 1°	Chem
CESM1-BGC	Community Earth System Model Contributors	0,9424°x1,25°	1° x 1°	Chem
CESM1-CAM5	Community Earth System Model Contributors	0,9424°x1,25°	1° x 1°	Chem
CMCC-CMS	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici, Italy	3,7111°x3,75°	-	No-Chem

Tabla A.1: Descripción MCG pertenecientes al proyecto CMIP5

MCG	Centro	Resolución		Ozono estratosférico
		Atmosférica	Oceánica	
CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici, Italy	0,7484°x0,75°	-	No-Chem
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Meteorologiques, France	1,4008°x1,40625°	1° x 1°	Chem
CSIRO-Mk3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence, Australia	1,8653°x1,875°	1,875°x1,875°	No-Chem
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	2,7906°x2,8125°	0,9303°x1,1407°	No-Chem
EC-EARTH	EC-EARTH consortium, Europe	1,1215°x1,125°	-	No-Chem
FGOALS-g2	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences and CESS, Tsinghua University, China	2,7906°x2,8125°	1°x1°	No-Chem
FGOALS-s2	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, China, The First Institute of Oceanography, SOA, China	1,6590°x2,8125°	1°x1°	No-Chem
FIO-ESM	The First Institute of Oceanography, SOA, China	2°x2°	-	No-Chem

Tabla A.1: Descripción MCG pertenecientes al proyecto CMIP5

MCG	Centro	Resolución		Ozono estratosférico
		Atmosférica	Oceánica	
GFDL-CM3	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	2°x2,5°	0,3344°x1°	Chem
GFDL-ESM2G	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	2,0225°x2°	0,375°x1°	No-Chem
GFDL-ESM2M	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	2,0225°x2,5°	0,3344°x1°	No-Chem
GISS-E2-H-CC	NASA Goddard Institute for Space Studies, USA	2°x2,5°	1°x1°	No-Chem
GISS-E2-H-p1	NASA Goddard Institute for Space Studies, USA	2°x2,5°	1°x1°	No-Chem
GISS-E2-H-p2, GISS-E2-H-p3	NASA Goddard Institute for Space Studies, USA	2°x2,5°	1°x1°	Chem
GISS-E2-R-CC	NASA Goddard Institute for Space Studies, USA	2°x2,5°	1°x1,25°	No-Chem
GISS-E2-R-p1	NASA Goddard Institute for Space Studies, USA	2°x2,5°	1°x1,25°	No-Chem
GISS-E2-R-p2, GISS-E2-R-p3	NASA Goddard Institute for Space Studies, USA	2°x2,5°	1°x1,25°	Chem
HadGEM2-AO	National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration, Korea	1,25°x1,875°	1°x1°	No-Chem
HadGEM2-CC	Met Office Hadley Centre, UK	1,25°x1,875°	1°x1°	No-Chem
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre, UK	1,25°x1,875°	1°x1°	No-Chem

Tabla A.1: Descripción MCG pertenecientes al proyecto CMIP5

MCG	Centro	Resolución		Ozono estratosférico
		Atmosférica	Oceánica	
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre Simon Laplace, France	1,8947°x3,75°	2°x2°	Chem
IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre Simon Laplace, France	1,2676°x2,5°	2°x2°	Chem
IPSL-CM5B-LR	Institut Pierre Simon Laplace, France	1,8947°x3,75°	2°x2°	Chem
MIROC-ESM-CHEM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies, Japan	2,7906°x2,8125°	0,5582°x1,40625°	Chem
MIROC-ESM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies, Japan	2,7906°x2,8125°	0,5582°x1,40625°	No-Chem
MIROC5	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean	1,4008°x1,40625°	0,5°x1,40625°	No-Chem
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	1,8653°x1,875°	-	No-Chem

Tabla A.1: Descripción MCG pertenecientes al proyecto CMIP5

MCG	Centro	Resolución		Ozono estratosférico
		Atmosférica	Oceánica	
MPI-ESM-MR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	1,8653°x1,875°	-	No-Chem
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute, Japan	1,8653°x1,875°	-	No-Chem
NorESM1-ME	Norwegian Climate Centre, Norway	1,8947°x2,5°	-	Chem
NorESM1-M	Norwegian Climate Centre, Norway	1,8947°x2,5°	-	Chem
bcc-csm1-1-m	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration, China	2,7906°x2,8125°	1° x 1°	No-Chem
bcc-csm1-1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration, China	2,7906°x2,8125°	1° x 1°	No-Chem
inmcm4	Russian Institute for Numerical Mathematics, Russia	1,5°x2°	0,5°x1°	No-Chem

Anexo B. Elementos WEAP

Tabla B.1: Descripción Elementos Catchment

Catchment	Subsubcuenca de referencia	Código DGA (Subsubcuenca de referencia)	Área [km^2]
Cañadon Seco	Cañadón Seco	121007	794
Rubens	Fronterizas entre Río Rubens y Río Penitente	12101402	504
Penitente	Fronterizas entre Río Rubens y Río Penitente	12101400	1480

Tabla B.1: Descripción Elementos Catchment

Catchment	Subsubcuenca de referencia	Código DGA (Subsubcuenca de referencia)	Área [km^2]
E. Esperanza	Fronterizas entre Río Rubens y Río Penitente	12101401	282
El Zurdo	Fronterizas entre R. Penitente y R. Gallegos Chico	121013	685
Chaike o Chico	Río Cigike y Río de Los Pozuelos	121009	504
Gallegos	Río Gallegos Chico	121011	862
Las Minas	Costeras e Islas Orientales de la Península Brunswick	12050702	36
E. Chabunco	Costeras e Islas Orientales de la Península Brunswick	12050701	105
R. Pescado	Costeras e Islas Orientales de la Península Brunswick	12050701	105
R. Tres Brazos	Costeras e Islas Orientales de la Península Brunswick	12050703	100
R. Agua Fresca	Costeras e Islas Orientales de la Península Brunswick	12050704	184
R. San Juan	Costeras e Islas Orientales de la Península Brunswick	12050706	867
R. Colorado y otros	Costeras e Islas Orientales de la Península Brunswick	12050705	137
Rio Legnadura	Costeras e Islas Orientales de la Península Brunswick	12050703	49
R. Santa María	Costeras e Islas Orientales de la Península Brunswick	12050703	20
R. San Pedro	Costeras e Islas Orientales de la Península Brunswick	12050707	103
Rio SN_PA2	Costeras entre Chorrillo Kimiri Aike y Cañadón Grande	120502	937
Rio SN_PA4	Costeras entre Laguna Blanca, Península Brunswick y Santa Susana	120506	291
SN_PA_Cmar	Costeras entre Laguna Blanca, Península Brunswick y Santa Susana	120506	1166
Rio SN_PA3	Costeras entre Río Santa Susana y Chorrillo Kimiri Aike	120503	526
R. Grande	Costeras Occidentales Península Brunswick	12050801	504
R. Los Patos	Costeras Occidentales Península Brunswick	12050800	173

Tabla B.1: Descripción Elementos Catchment

Catchment	Subsubcuenca de referencia	Código DGA (Subsubcuenca de referencia)	Área [km^2]
R. El Canelo	Costeras Occidentales Península Brunswick	12050802	161
R. La Caleta	Costeras Occidentales Península Brunswick	12050803	214
R. El Ganso	Costeras Occidentales Península Brunswick	12050802	119
Estero del Medio y otros	Costeras Occidentales Península Brunswick	12050800	173
Q1_LagBlanca	Laguna Blanca	120505	591
Q2_LagBlanca	Laguna Blanca	120505	591
R. Santa Susana	Río Santa Susana	120504	943
R_AC3adicional	Costeras Continentales del Seno Skyring	120405	388

Tabla B.2: Descripción Elementos river.

Río modelado	Subcuenca de referencia
Cañadón Seco	Cañadón Seco
Rubens	Fronterizas entre Río Rubens y Río Penitente
Penitente	Fronterizas entre Río Rubens y Río Penitente
E. Esperanza	Fronterizas entre Río Rubens y Río Penitente
El Zurdo	Fronterizas entre R. Penitente y R. Gallegos Chico
Chaike o Chico	Río Cigike y Río de Los Pozuelos
Gallegos	Río Gallegos Chico
Las Minas	Costeras e Islas Orientales de la Península Brunswick
E. Chabunco	Costeras e Islas Orientales de la Península Brunswick
R. Pescado	Costeras e Islas Orientales de la Península Brunswick
R. Tres Brazos	Costeras e Islas Orientales de la Península Brunswick
R. Agua Fresca	Costeras e Islas Orientales de la Península Brunswick
R. San Juan	Costeras e Islas Orientales de la Península Brunswick
R. Colorado y otros	Costeras e Islas Orientales de la Península Brunswick
Rio Legnadura	Costeras e Islas Orientales de la Península Brunswick

Tabla B.2: Descripción Elementos river.

Río modelado	Subcuenca de referencia
R. Santa María	Costeras e Islas Orientales de la Península Brunswick
R. San Pedro	Costeras e Islas Orientales de la Península Brunswick
Rio SN_PA2	Costeras entre Chorrillo Kimiri Aike y Cañadón Grande
Rio SN_PA4	Costeras entre Laguna Blanca, Península Brunswick y Santa Susana
SN_PA_Cmar	Costeras entre Laguna Blanca, Península Brunswick y Santa Susana
Rio SN_PA3	Costeras entre Río Santa Susana y Chorrillo Kimiri Aike
R. Grande	Costeras Occidentales Península Brunswick
R. Los Patros	Costeras Occidentales Península Brunswick
R. El Canelo	Costeras Occidentales Península Brunswick
R. La Caleta	Costeras Occidentales Península Brunswick
R. El Ganso	Costeras Occidentales Península Brunswick
Estero del Medio y otros	Costeras Occidentales Península Brunswick
Q1_LagBlanca	Laguna Blanca
Q2_LagBlanca	Laguna Blanca
R_AC3adicional	Costeras Continentales del Seno Skyring
R. Santa Susana	Río Santa Susana

Anexo C. Métricas de evaluación del modelo hidrológico

Tabla C.1: Estaciones fluviométricas utilizadas como elemento de calibración

Zona	Elemento Streamflow Gauge	Control Fluviométrico	Código Estación
Vertientes del Atlántico	R.Rub_Ruta9	R. Rubens en Ruta N 9	12600001-4
Vertientes del Atlántico	Penitente en M.Chico	R. Penitente en Morro Chico	12622001-4
Vertientes del Atlántico	R.Chaike_AF	R. Ci-Aike antes Frontera	12660001-1
Punta Arenas	R. LM_BTSendos	R. Las Minas en BT. Sendos	12586001-K
Punta Arenas	LegnAntesBTSendos	R. Leñadura antes BT. Sendos	12585002-2
Punta Arenas	Río Tres Brazos antes BT Sendos	R. Tres Brazos antes BT. Sendos	12585001-4
Punta Arenas	San Juan en Desemb	R. San Juan en Desembocadura	12582001-8
Punta Arenas	R. Calete en Seno Otway	R. Calete en Seno Otway	12563001-4
Punta Arenas	R. Grande en Seno Otway	R. Grande en Seno Otway	12561001-3

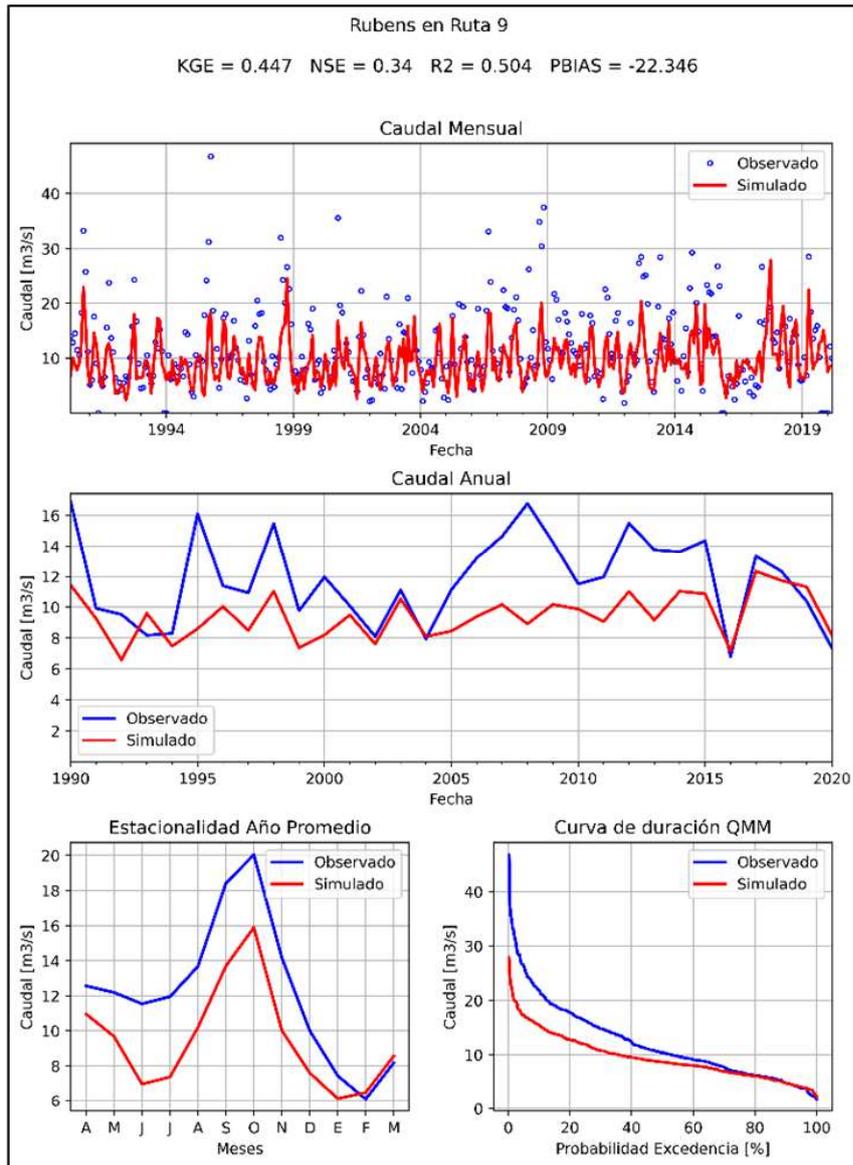


Figura C.1: Gráfico y métricas de evaluación estación de calibración Río Rubens en Ruta N9. Fuente: DGA (2021).

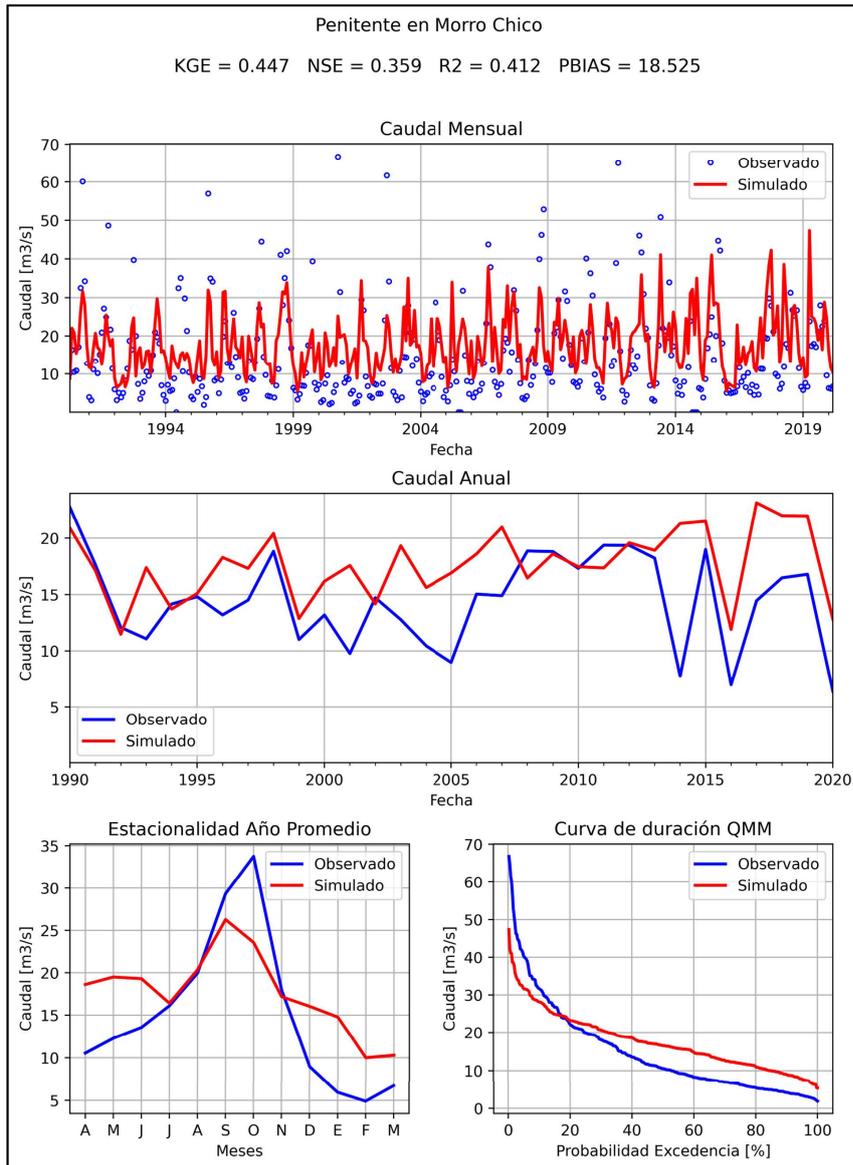


Figura C.2: Gráfico y métricas de evaluación estación de calibración Penitente en Morro Chico. Fuente: DGA (2021).

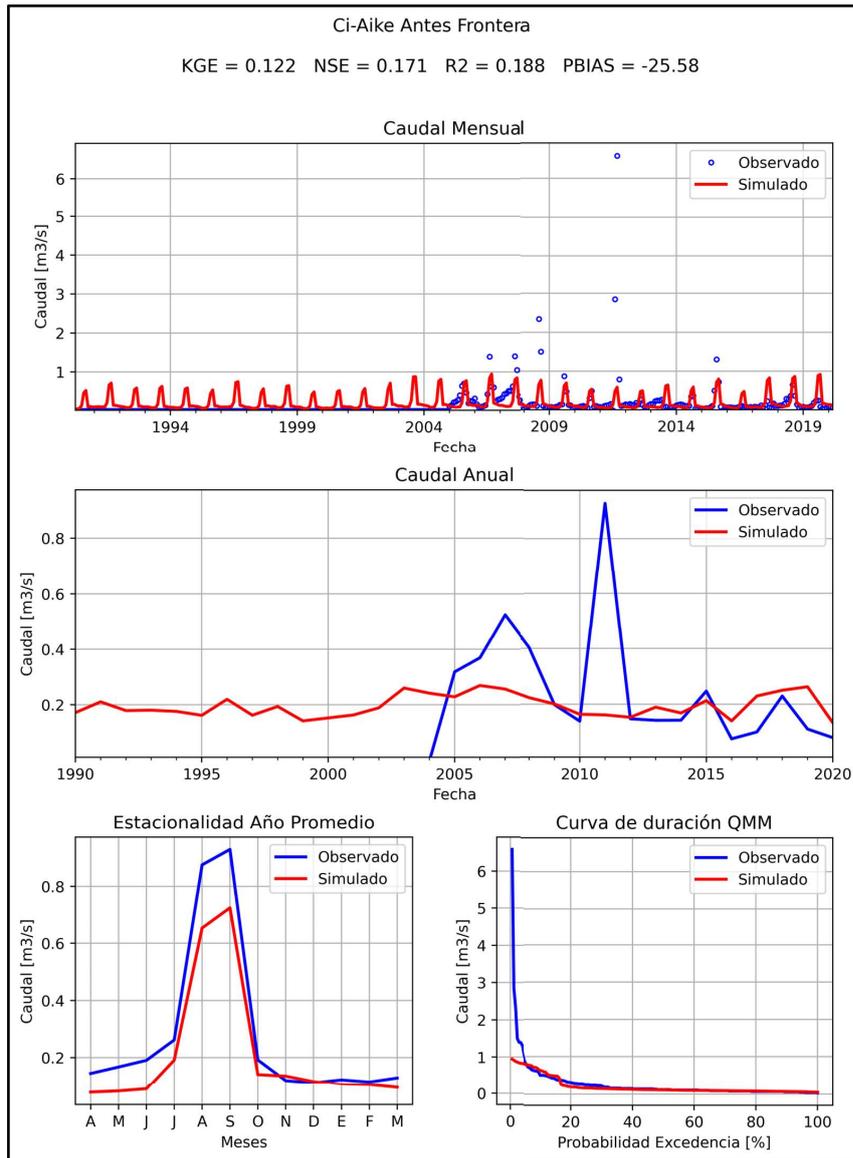


Figura C.3: Gráfico y métricas de evaluación estación de calibración Río Ci-Aike antes Frontera. Fuente: DGA (2021).

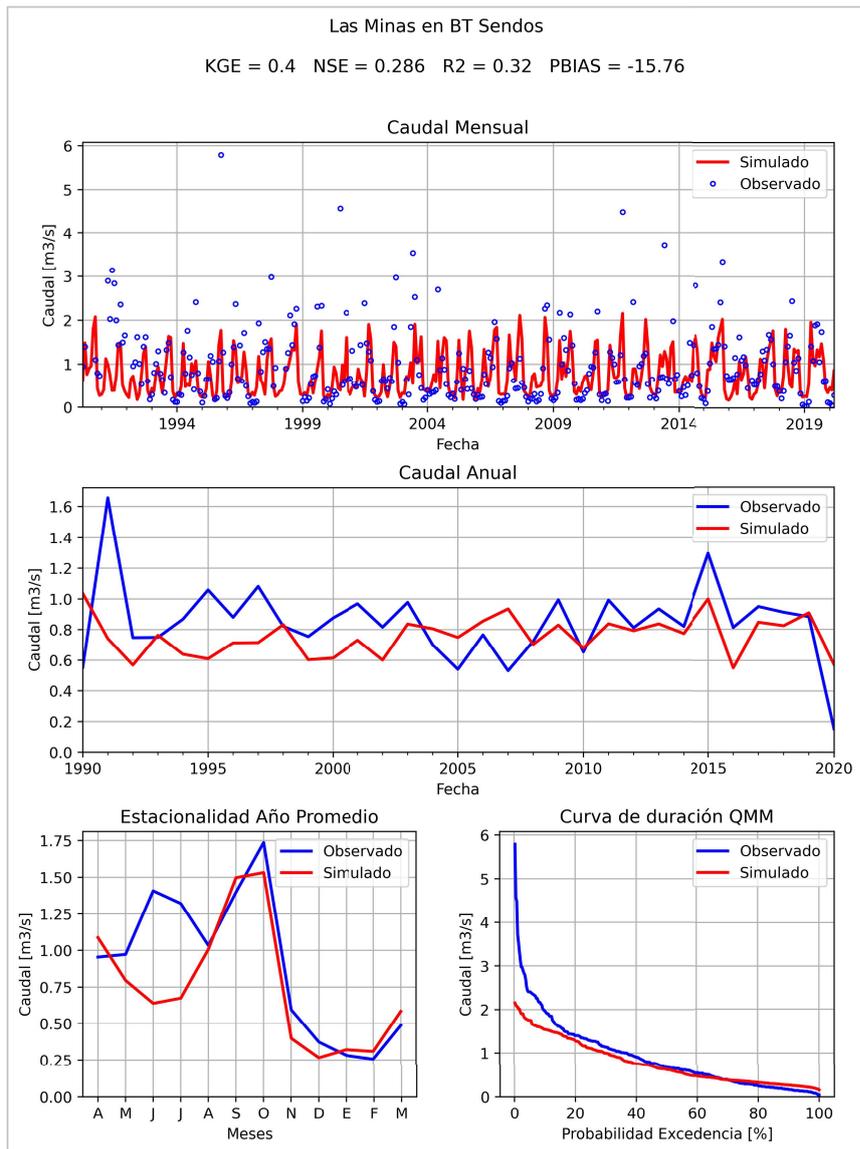


Figura C.4: Gráfico y métricas de evaluación estación de calibración Río Las Minas en BT. Sendos. Fuente: DGA (2021).

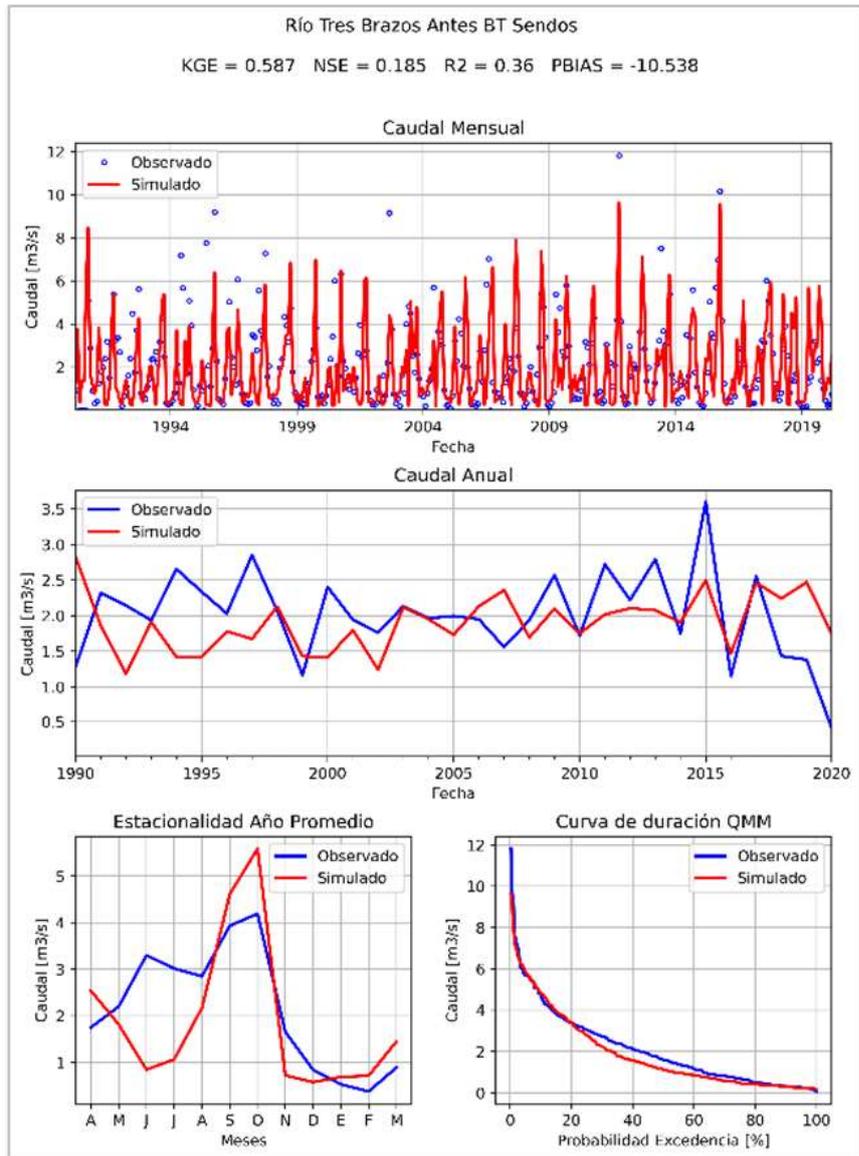


Figura C.5: Gráfico y métricas de evaluación estación de calibración Río Tres Brazos antes BT. Sendos. Fuente: DGA (2021).

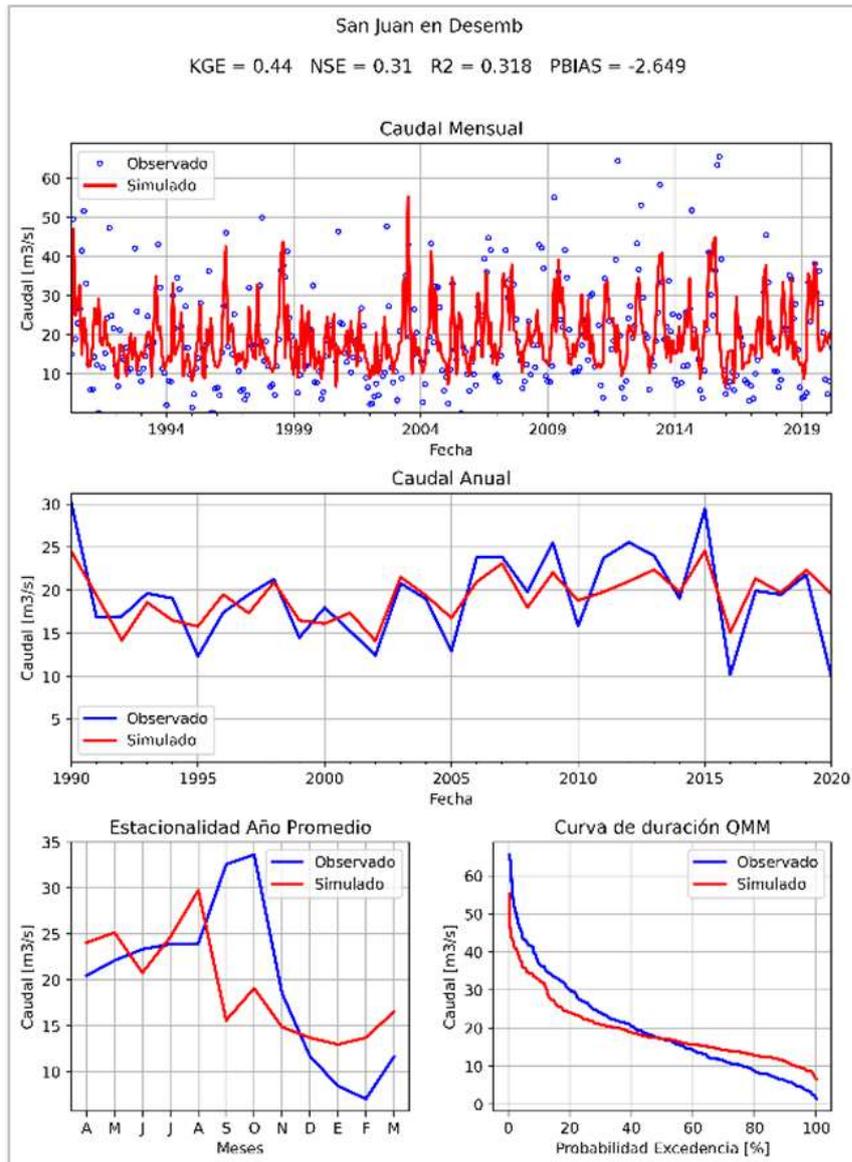


Figura C.6: Gráfico y métricas de evaluación estación de calibración Río San Juan en Desembocadura. Fuente: DGA (2021).

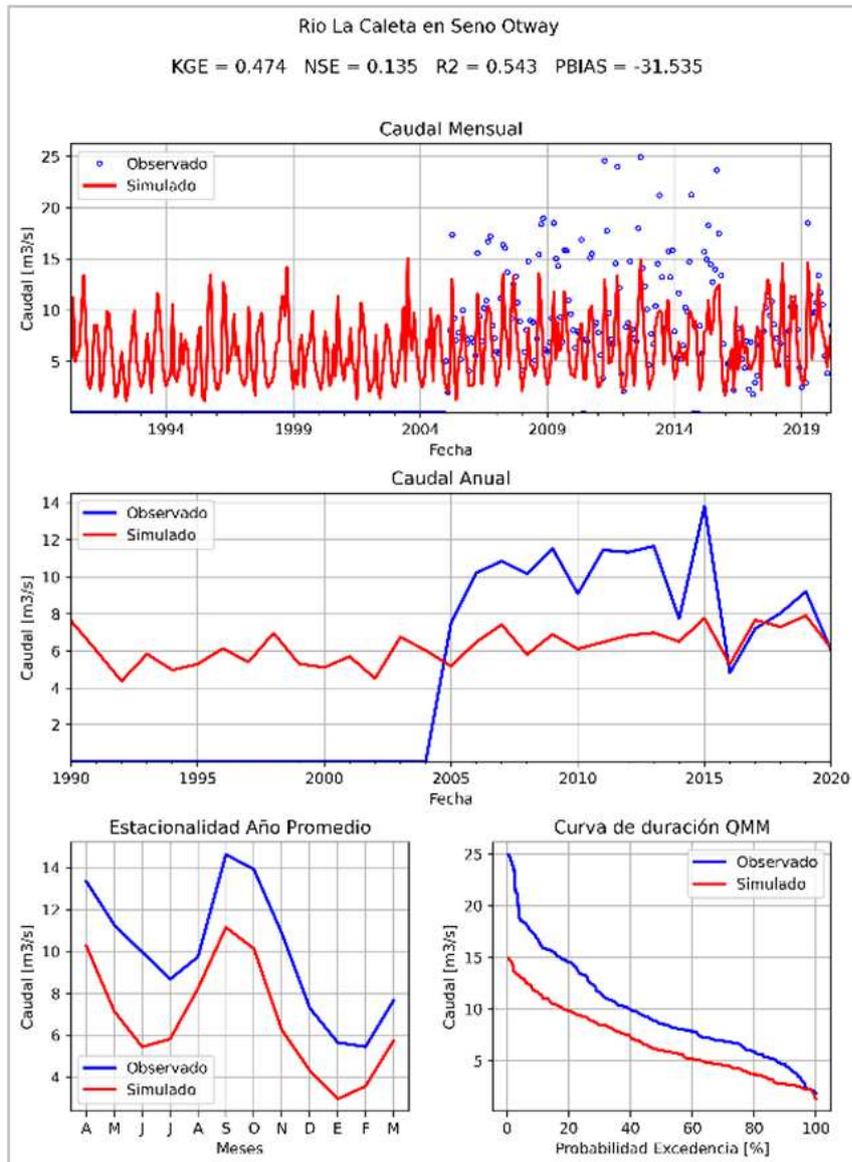


Figura C.7: Gráfico y métricas de evaluación estación de calibración Río La Caleta en Seno Otway. Fuente: DGA (2021).

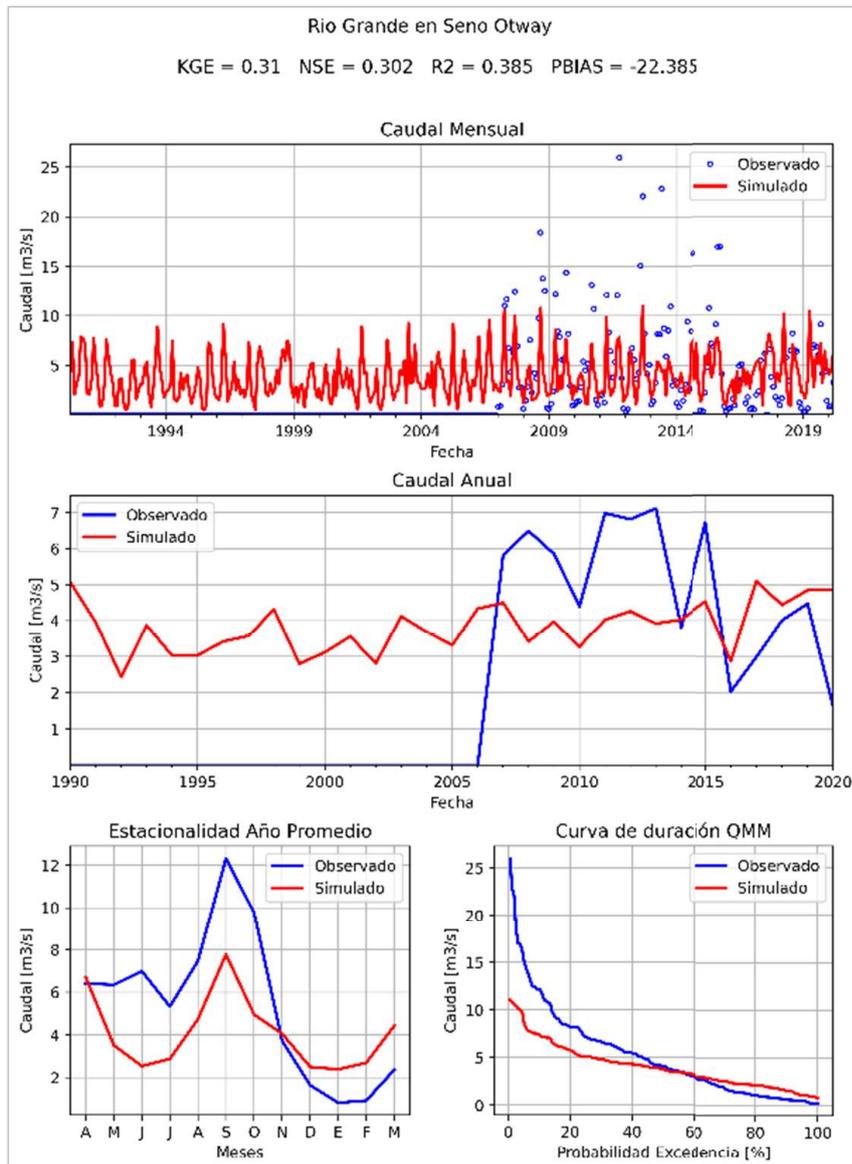


Figura C.8: Gráfico y métricas de evaluación estación de calibración Río Grande en Seno Otway. Fuente: DGA (2021).

Anexo D. Análisis de precipitación

El resumen de los estadígrafos obtenidos para la serie de precipitación en los puntos observados se presentan en la Tabla D.1.

Tabla D.1: Resumen indicadores obtenidos producto grillado CR2MET (v2.0). Precipitación acumulada mensual.

Estación DGA	r^2	KGE	NSE	PBIAS
Bitsch Alto	0,56	0,33	0,39	-22,50

Tabla D.1: Resumen indicadores obtenidos producto grillado CR2MET (v2.0). Precipitación acumulada mensual.

Estación DGA	r^2	KGE	NSE	PBIAS
Canal de Trasvase Estero Llau-Llau	0,66	0,48	0,45	-24,40
Cerro Mirador	0,71	0,39	0,30	-31,60
Lago Parrillar	0,44	0,51	0,41	-9,50
Laguna Lynch	0,31	0,31	0,23	26,90
Las Minas	0,50	0,28	0,09	-35,00
Leñadura Alta	0,42	0,40	0,37	-12,40
Magdalena Giglio 2	0,52	0,44	0,22	-27,50
Monte Aymond	0,53	0,49	0,33	-30,80
Ohiggins Villa	0,57	0,70	0,49	17,40
Penitente Alto	0,09	-0,01	0,02	-27,80
Punta Arenas	0,52	0,45	0,33	-25,50
Río Las Minas en BT.	0,51	0,24	0,11	-36,40
Río Penitente en Morro Chico	0,33	0,41	0,32	-10,60
Río Perez	0,36	0,53	0,33	0,70
Río Perez en Desembocadura	0,57	0,75	0,51	3,40
Río Rubens en Ruta N9	0,29	0,12	-0,98	74,40
Río San Juan en Desembocadura	0,19	0,18	0,19	0,50
Río Verde	0,23	0,31	0,15	-21,00
Rubens en Ruta N9	0,37	0,54	0,25	17,10
San Gregorio	0,46	0,59	0,40	-14,50
San Juan	0,14	0,15	-0,12	-29,80
Teniente Merino	0,31	0,36	0,33	-11,80
Villa Tehuelche	0,44	0,58	0,37	15,10
PROMEDIO	0,42	0,40	0,23	-8,98

El análisis gráfico realizado a cada una de las estaciones de precipitación con respecto al producto grillado CR2MET se presenta en las figuras a continuación.

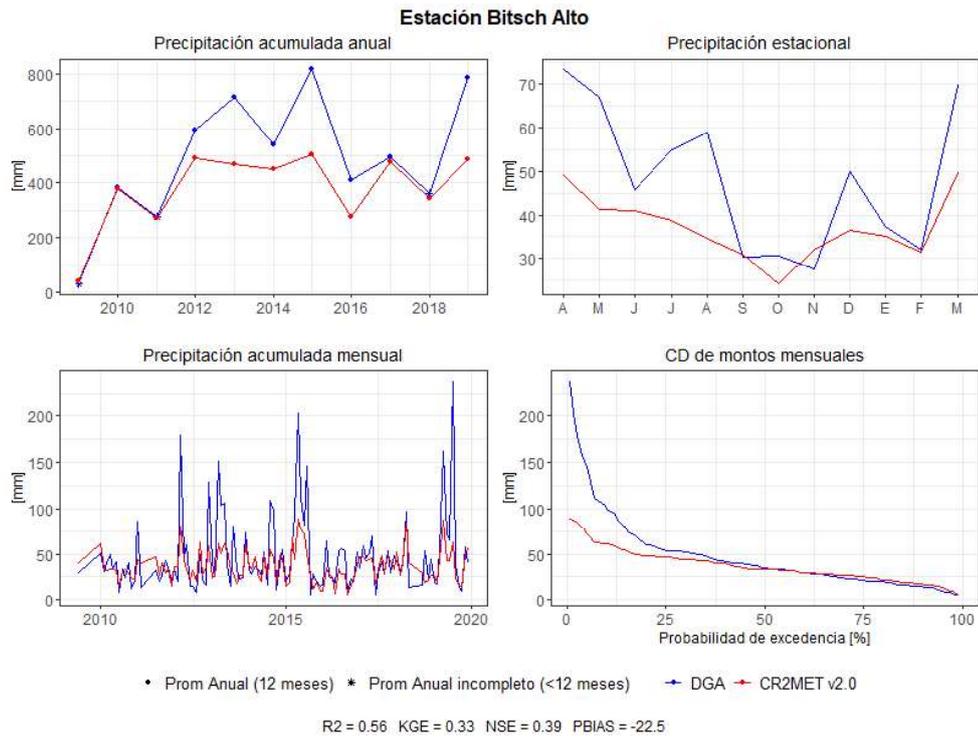


Figura D.1: Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Bitsch Alto.

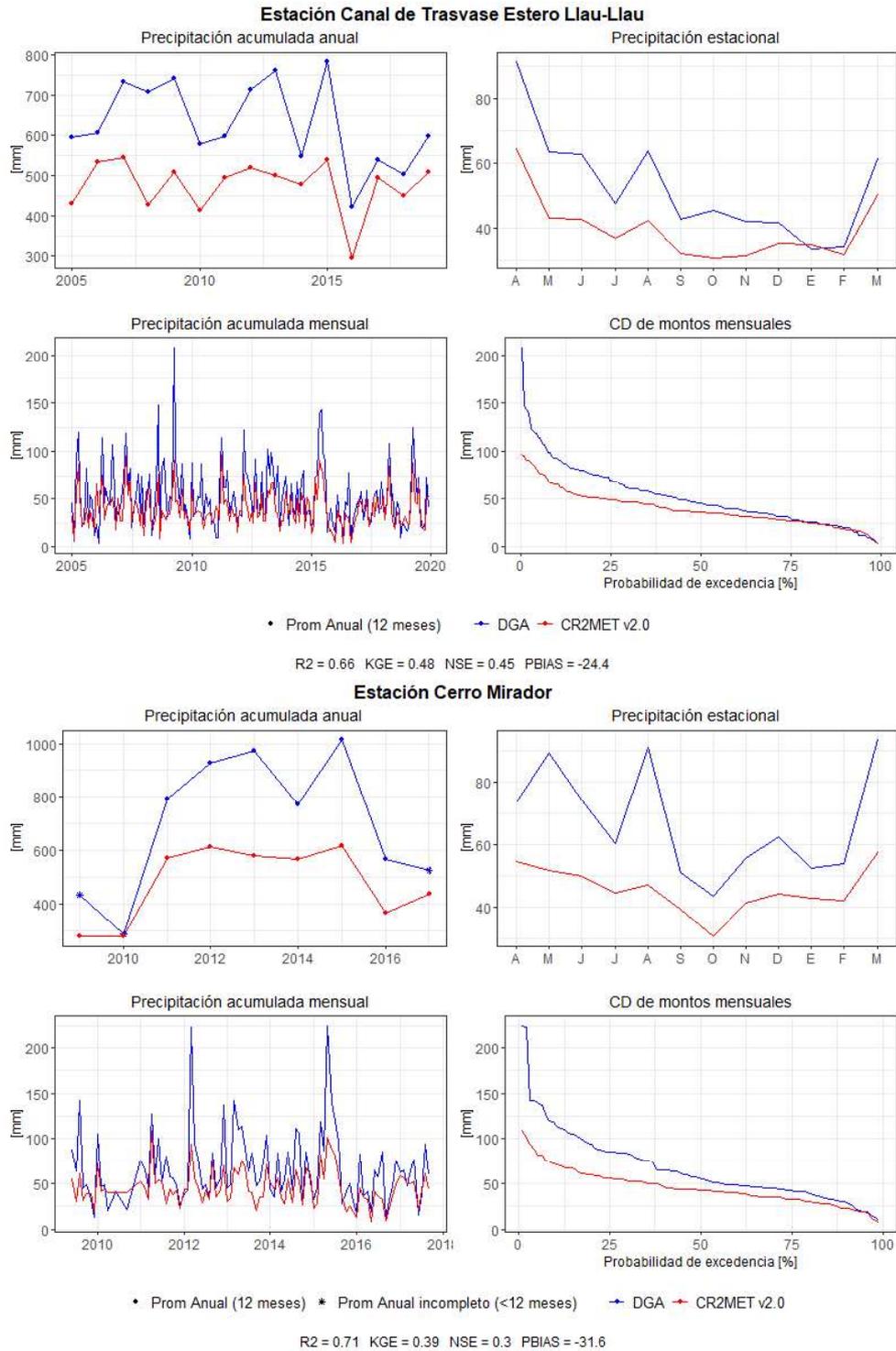


Figura D.2: Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Canal de Trasvase Estero Llau-Llau y Cerro Mirador.

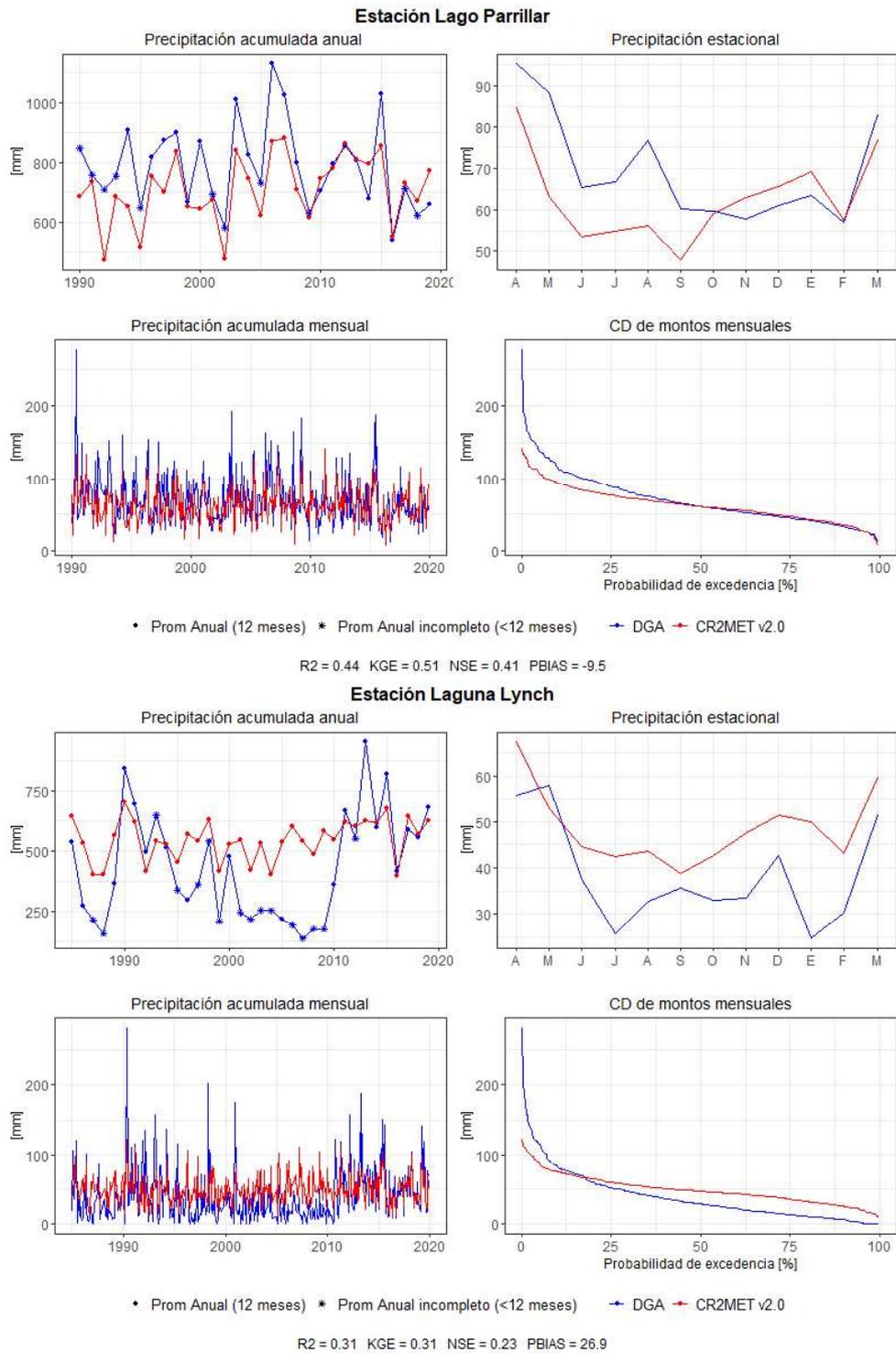


Figura D.3: Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Canal de Trasvase Estero Lago Parrillar y Laguna Lynch.

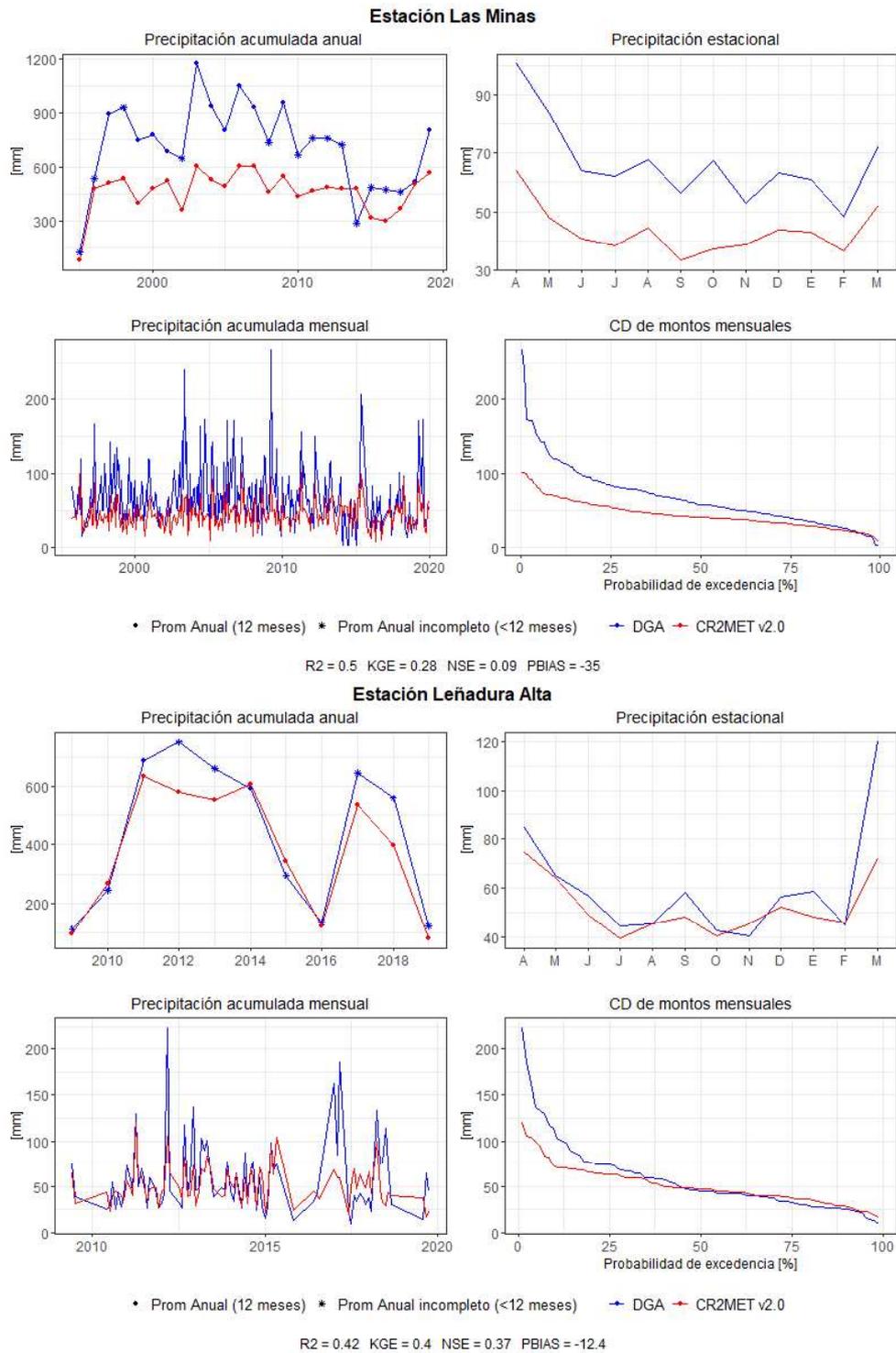


Figura D.4: Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Las Minas y Leñadura Alta.

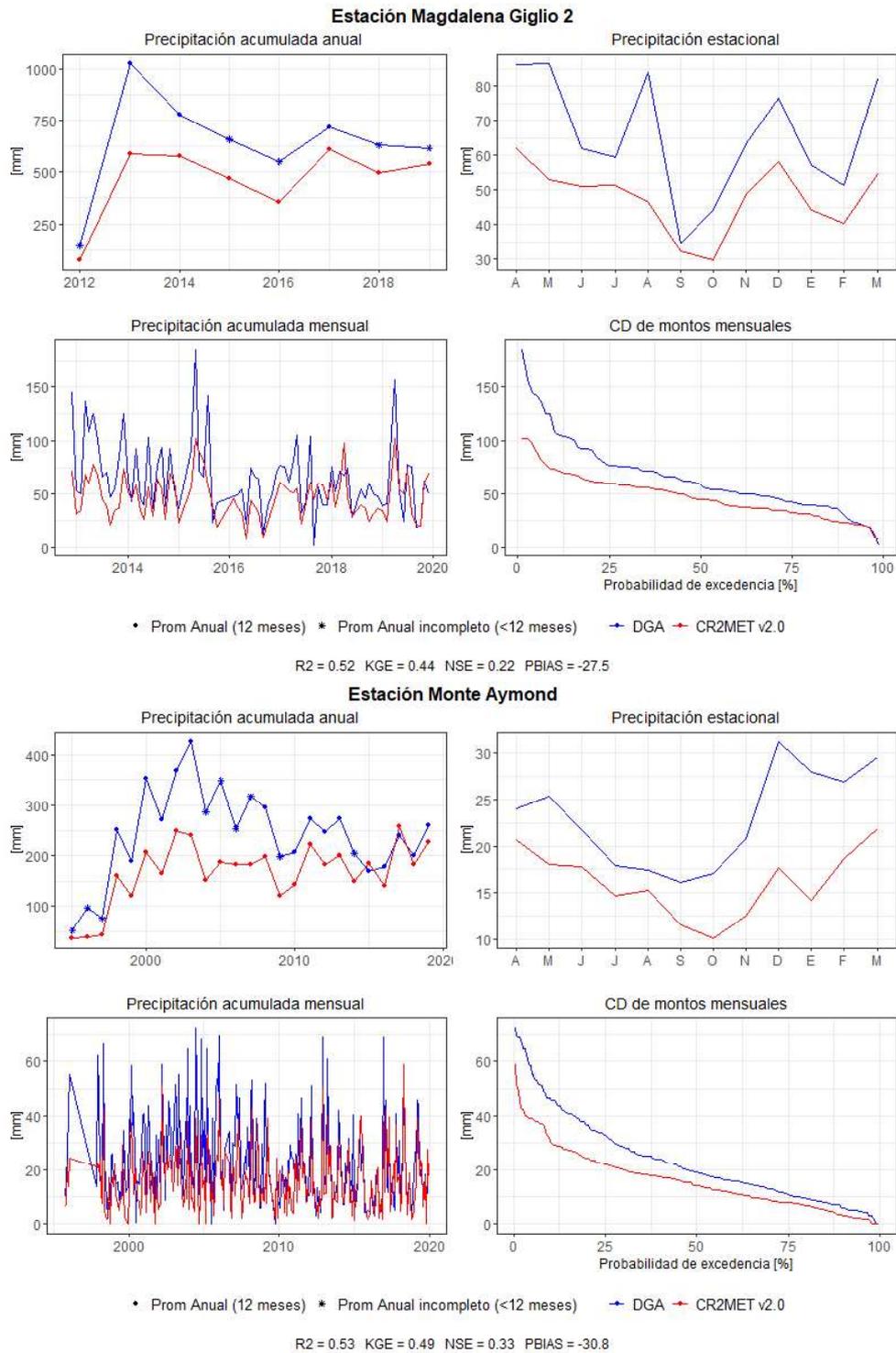


Figura D.5: Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Magdalena Giglio 2 y Monte Aymond.

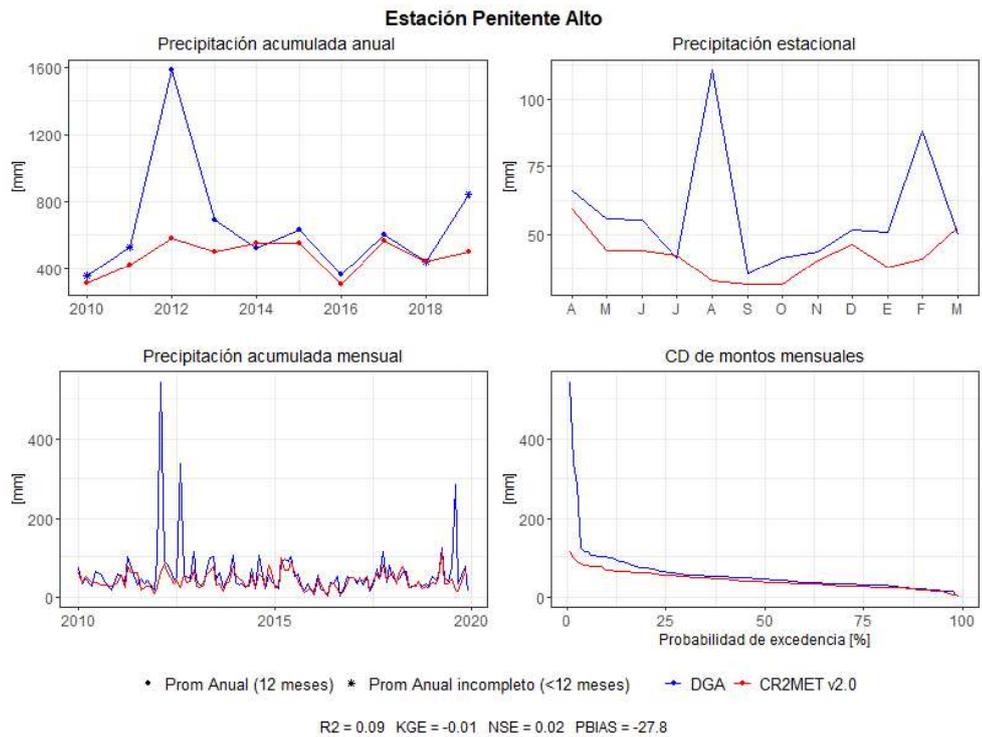
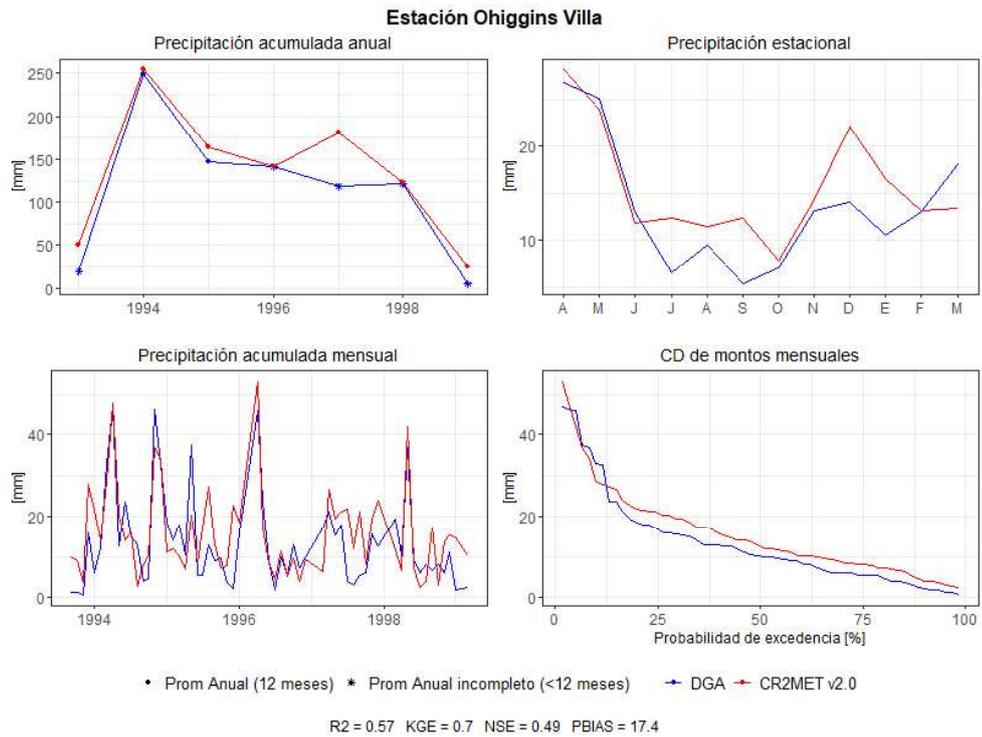


Figura D.6: Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Canal de Ohiggins Villa y Penitente Alto.

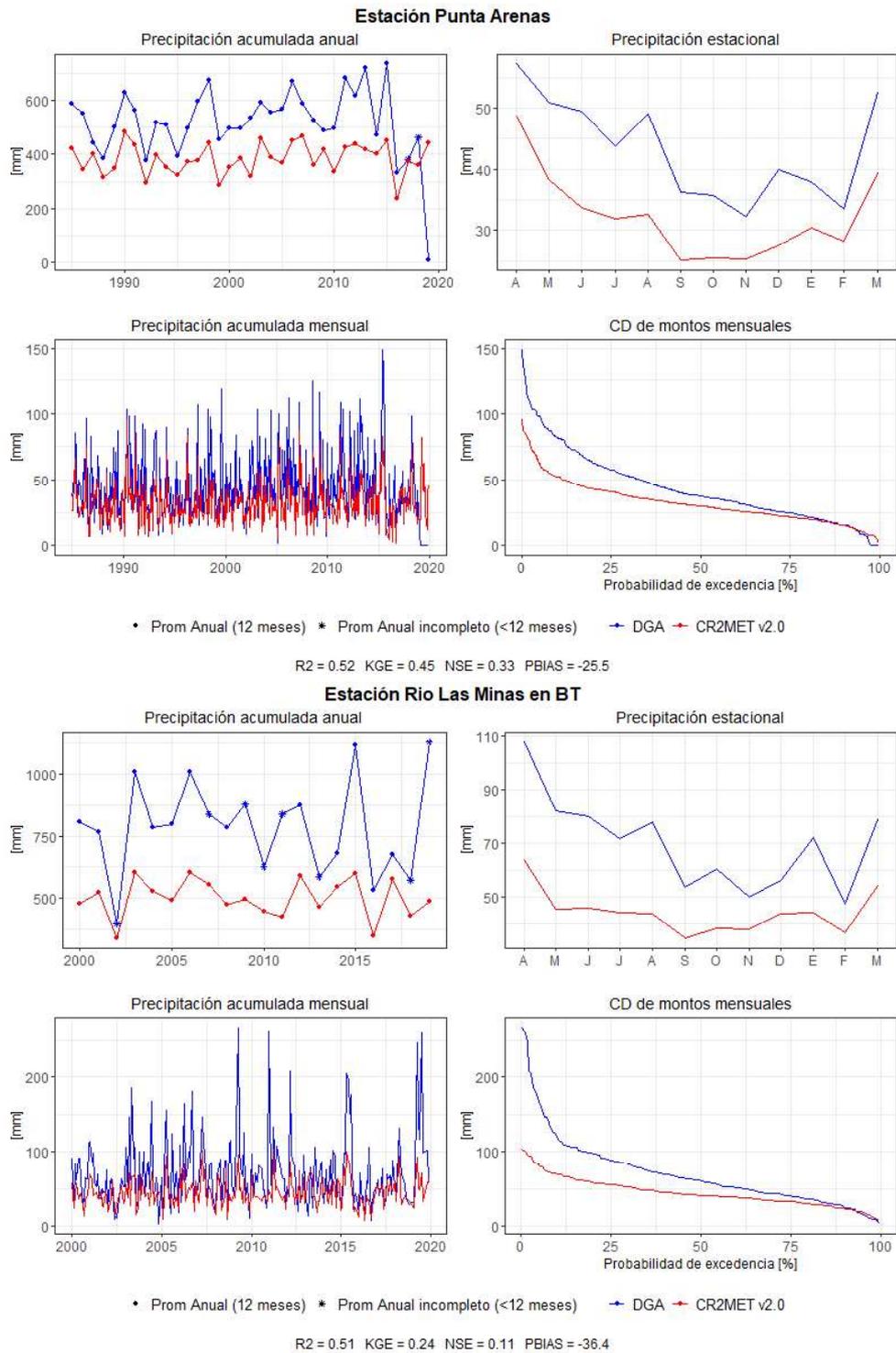


Figura D.7: Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Punta Arenas y Río Las Minas en BT.

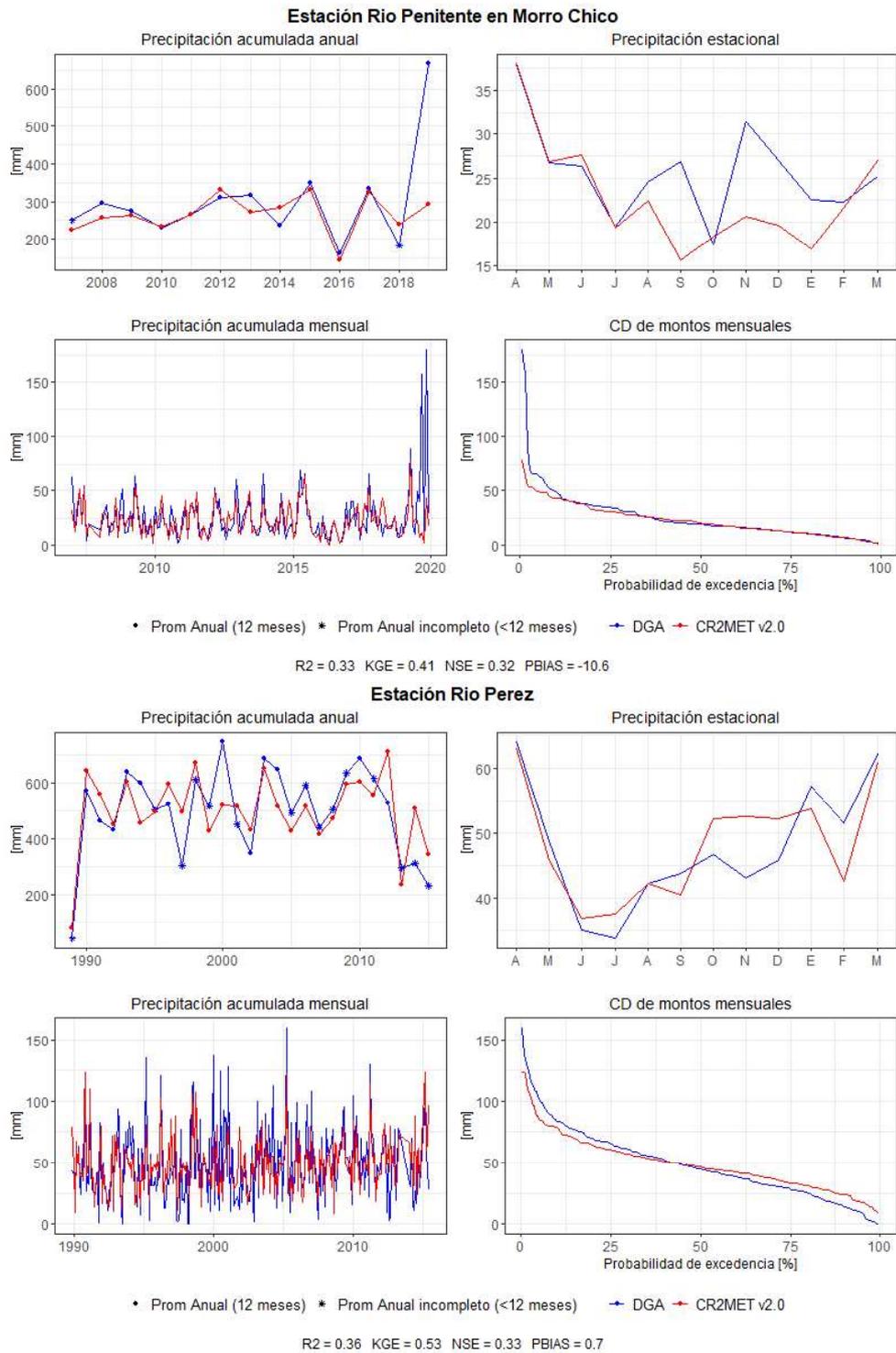


Figura D.8: Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Río Penitente en Morro Chico y Río Perez.

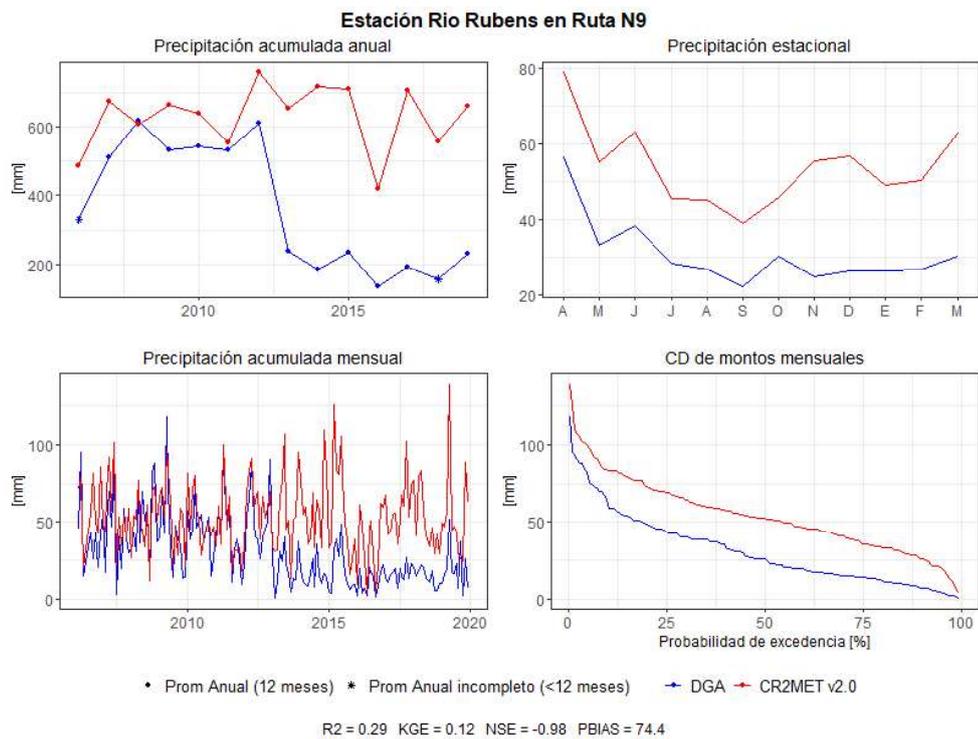
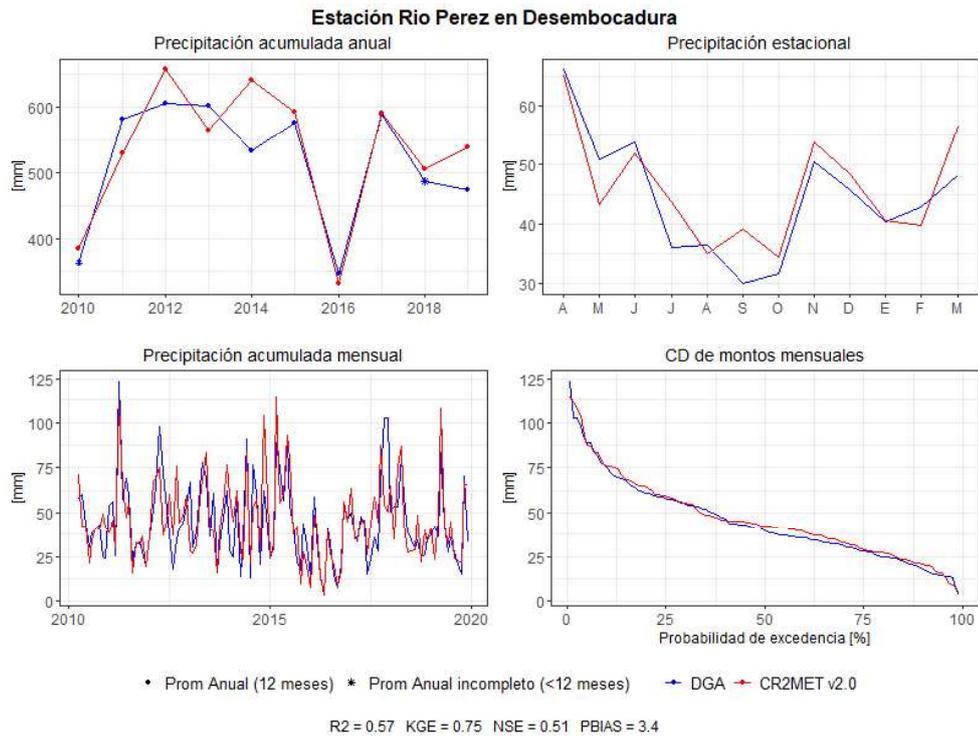


Figura D.9: Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Río Perez en Desembocadura y Río Rubens en Ruta N9.

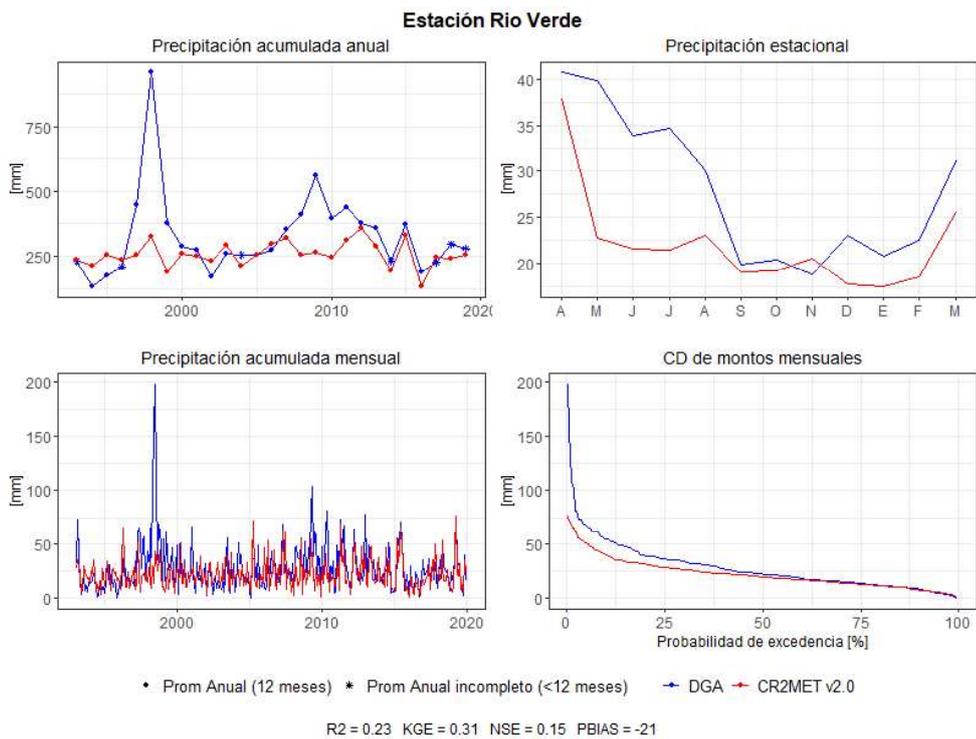
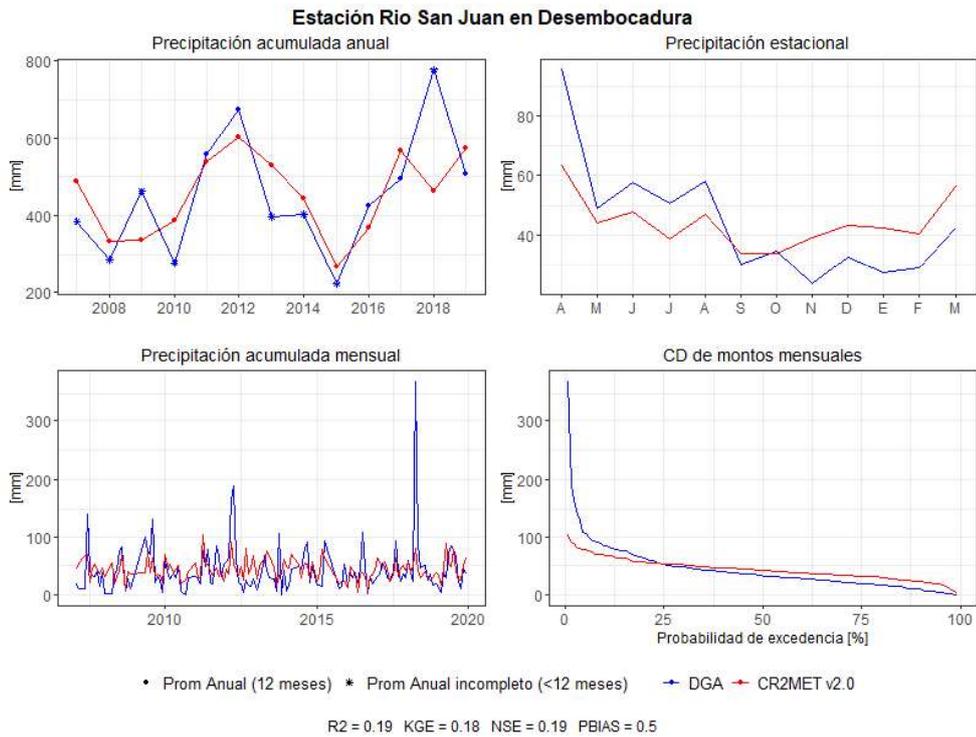


Figura D.10: Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Río San Juan en Desembocadura y Río Verde.

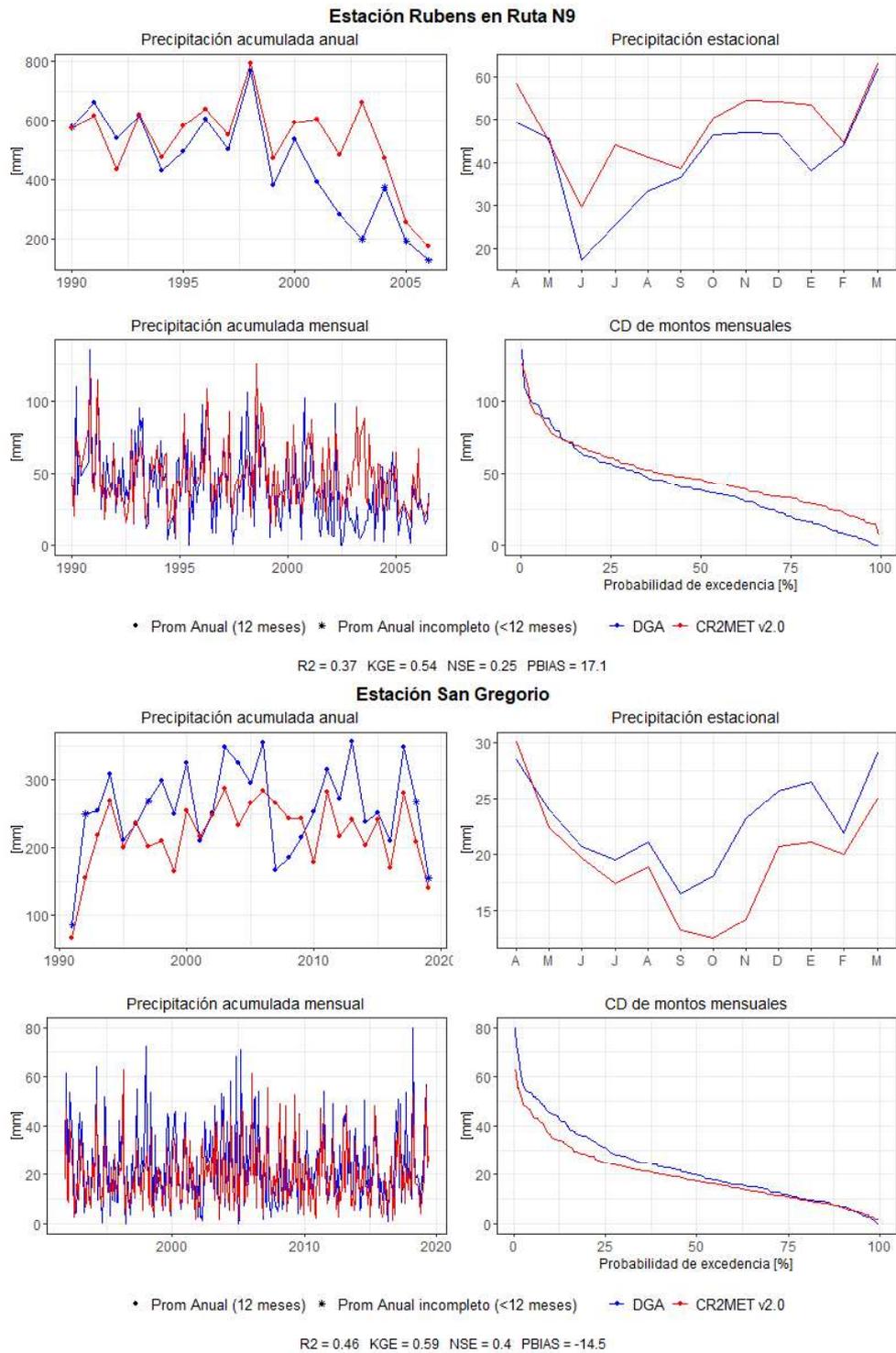


Figura D.11: Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Rubens en Ruta N9 y San Gregorio.

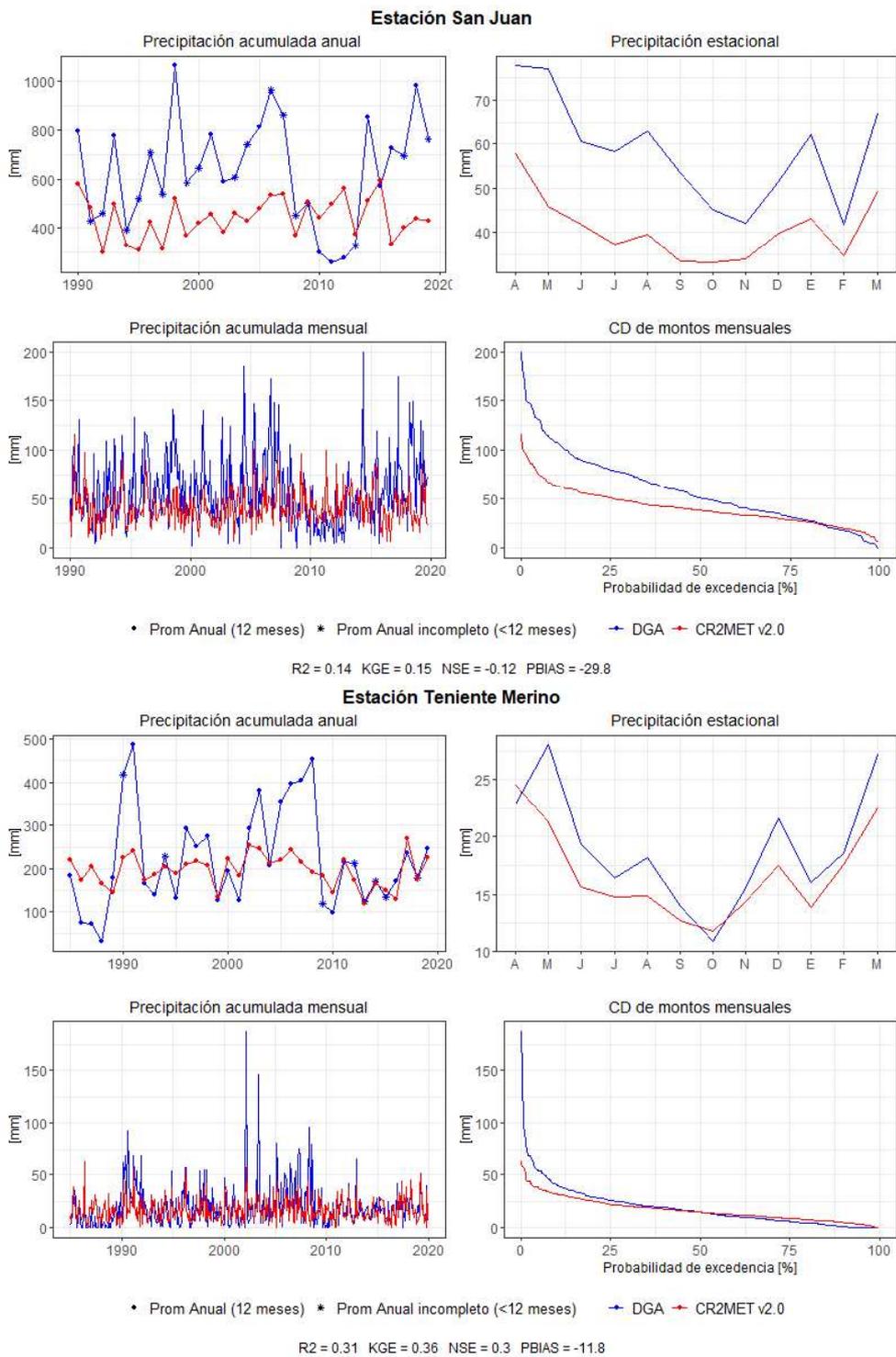


Figura D.12: Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación San Juan y Teniente Merino.

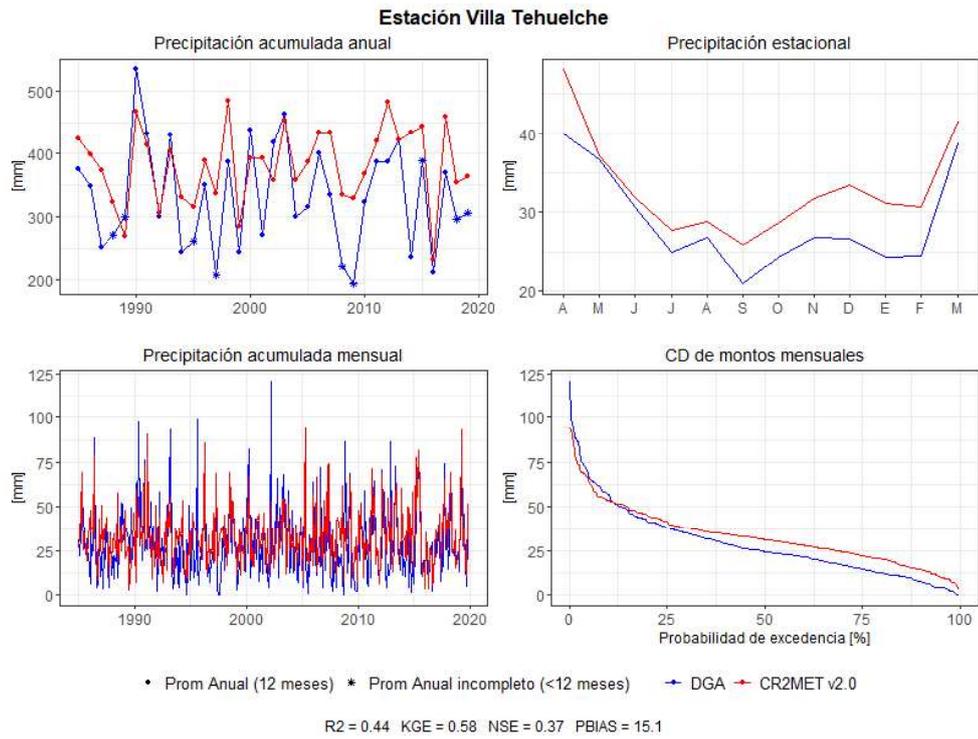


Figura D.13: Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Villa Tehuelche.

Anexo E. Análisis de temperatura

El resumen de los estadígrafos obtenidos para las series de temperatura en los puntos observados se presentan en la Tabla E.1.

Tabla E.1: Resumen indicadores obtenidos producto grillado CR2MET (v2.0). Temperatura media mensual.

Estación DGA	r^2	KGE	NSE	PBIAS
Monte Aymond	0,97	0,90	0,96	4,10
Ohiggins Villa	0,93	0,89	0,92	4,00
Punta Arenas	0,98	0,96	0,97	2,10
Río Perez	0,90	0,87	0,87	6,20
Río Perez en Desembocadura	0,98	0,77	0,92	6,20
Villa Tehuelche	0,96	0,95	0,96	2,40
PROMEDIO	0,95	0,89	0,93	4,17

El análisis gráfico realizado a cada una de las estaciones de temperatura con respecto al producto grillado CR2MET se presenta en las figuras a continuación.

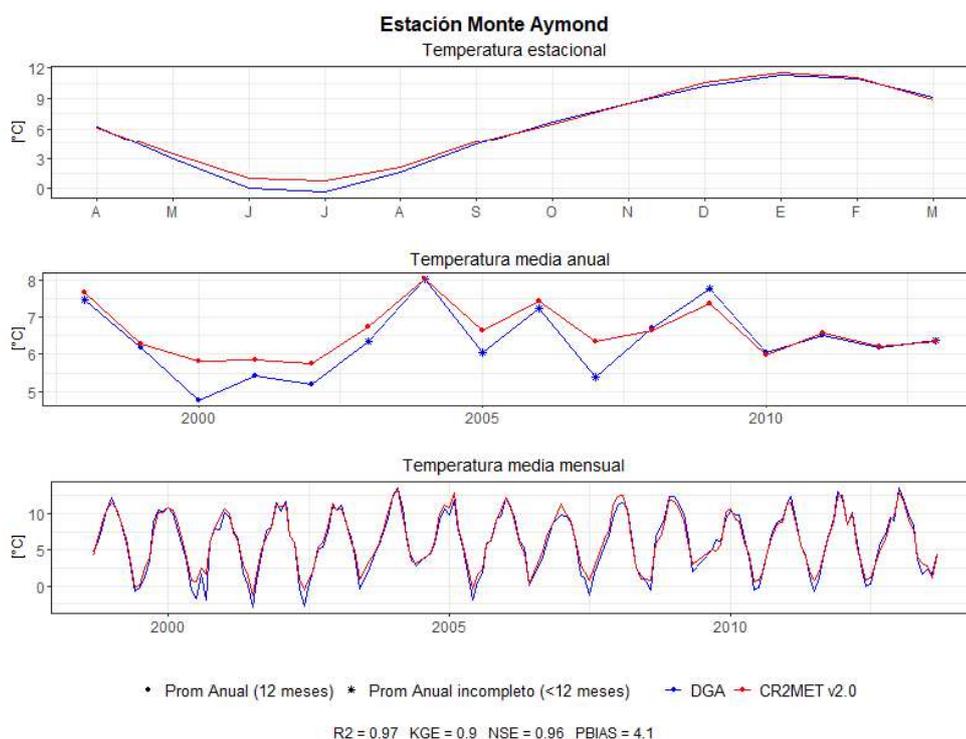


Figura E.1: Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Monte Aymond.

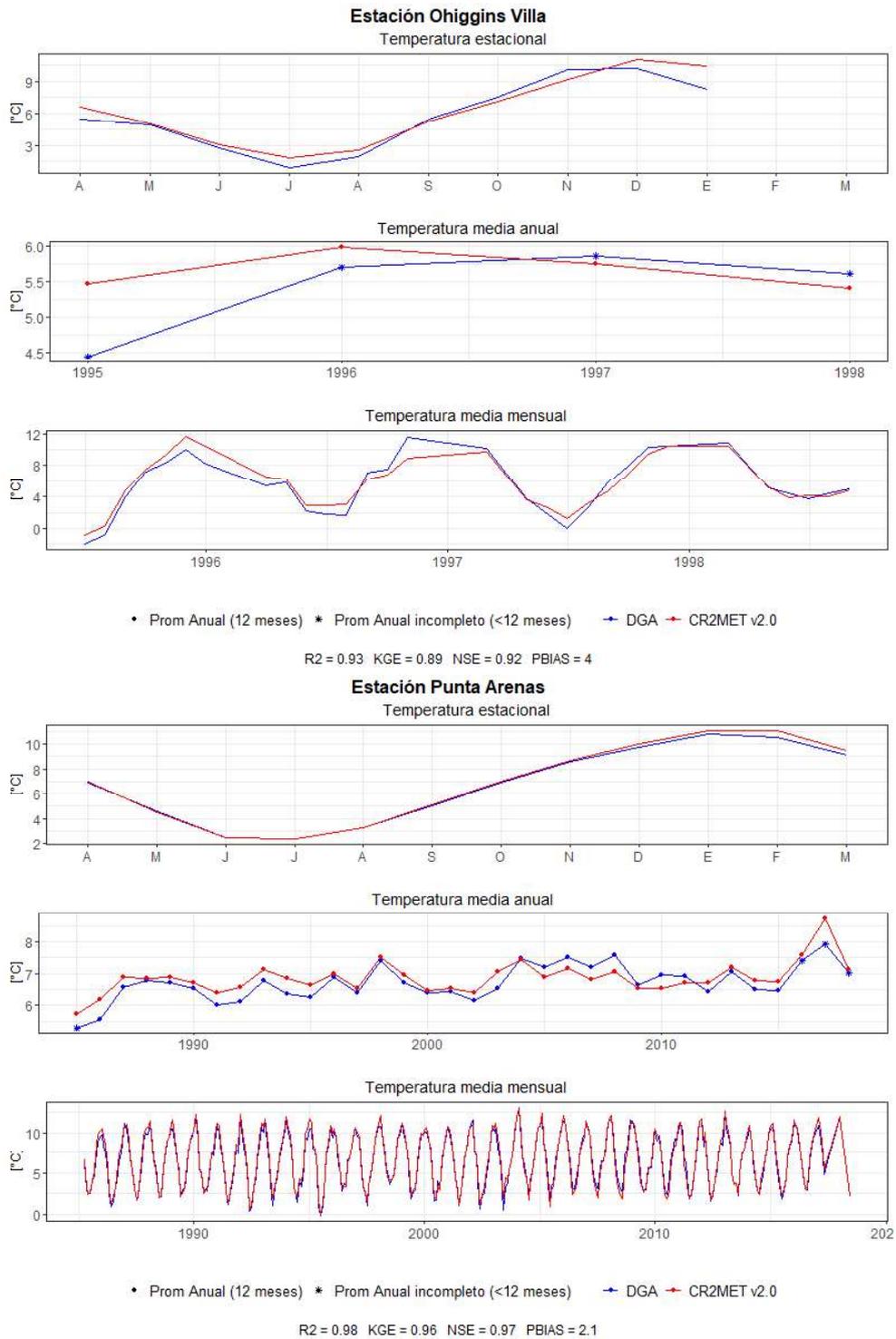


Figura E.2: Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Ohiggins Villa y Punta Arenas.

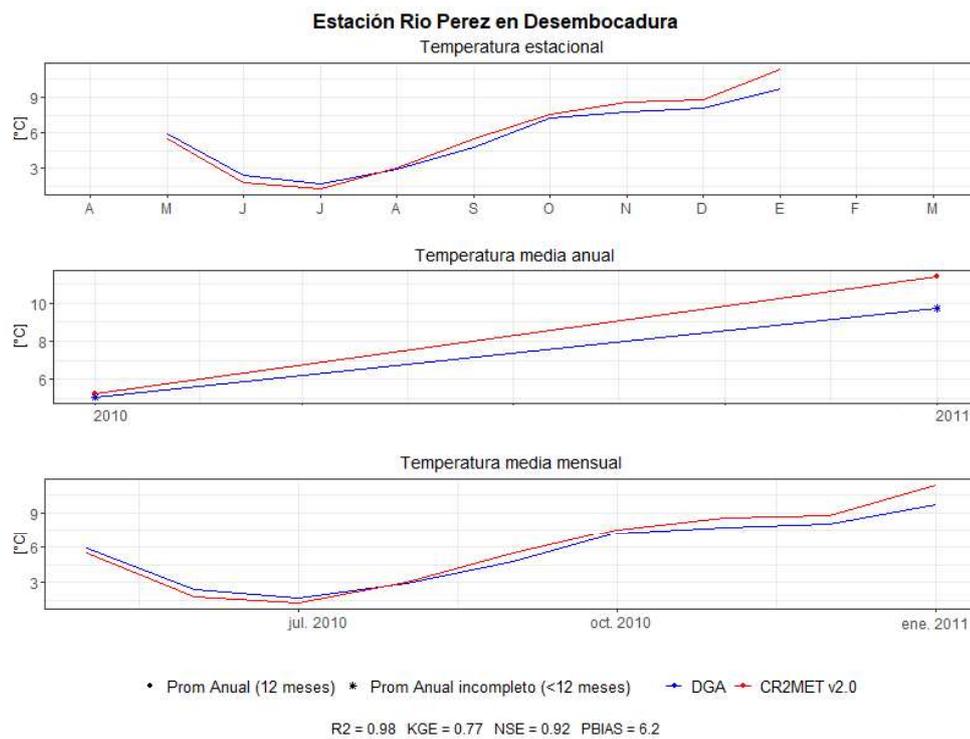
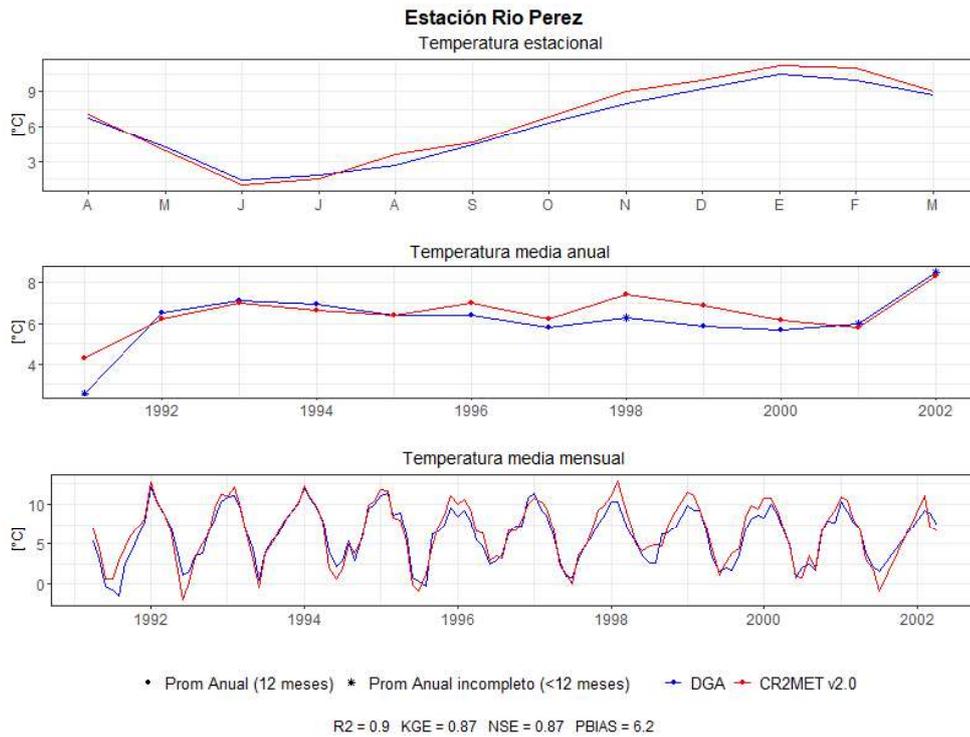


Figura E.3: Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Río Perez y Río Perez en Desembocadura.

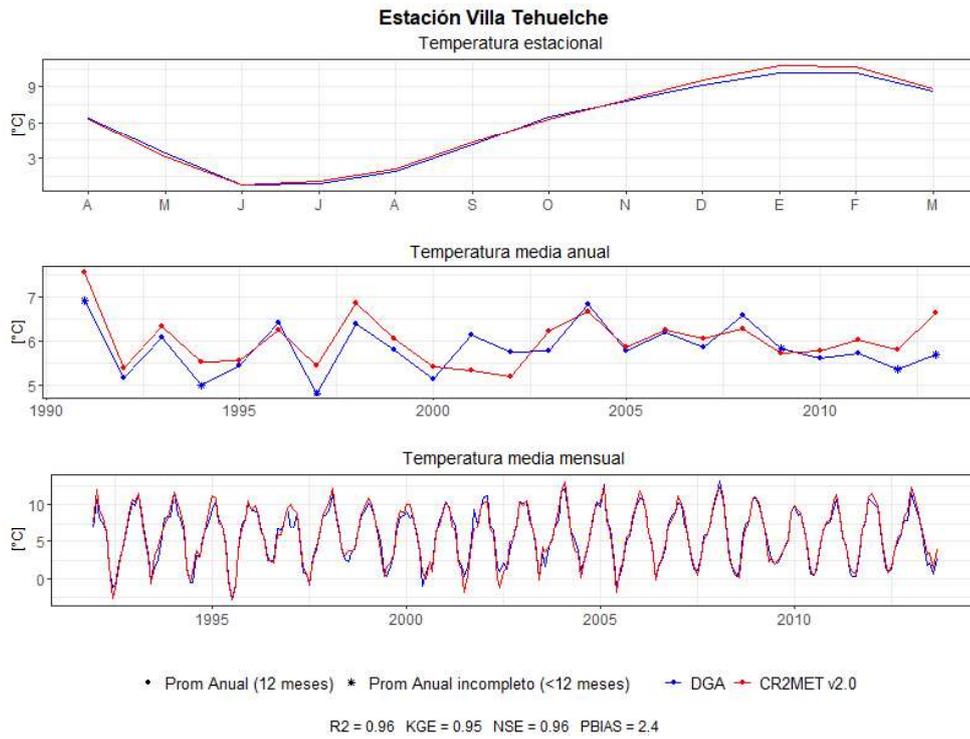


Figura E.4: Análisis comparativo entre producto grillado CR2MET y datos observados. Estación Villa Tehuelche.

Anexo F. Resultados Modelo WEAP-MODFLOW

Los resultados del modelo WEAP-MODFLOW entregados para cada catchment generado se presentan en las Tablas F.1 y F.2.

Tabla F.1: Precipitación anual promedio histórico (1991-2020) y futuro (2021-2050) para los diferentes escenarios de proyección.

Catchment	HISTORICO	CSIRO 8,5	CSIRO 6,0	CCSM4 8,5	CCSM4 6,0
E. Chabunco	378,9	392,4	403,3	406,0	451,2
Estero del Medio y otros	363,8	356,0	370,7	383,0	403,4
Las Minas	787,8	800,4	799,5	852,5	856,3
Las Minas Bajo	787,8	800,4	799,5	852,5	856,3
Q1_LagBlanca	175,0	187,4	183,1	181,7	197,0
Q2_LagBlanca	175,0	187,4	183,1	181,7	197,0
R SN_PA3	252,7	255,8	262,9	249,5	283,6
R SN_PA4	295,0	287,0	303,4	306,2	329,5
R. Agua Fresca	709,6	721,0	717,9	763,4	762,7
R. Colorado y otros	709,6	721,0	717,9	763,4	762,7
R. El Ganso	607,2	612,9	614,5	653,9	656,5
R. Los Patos	363,8	356,0	370,7	383,0	403,4
R. Pescado	378,9	392,4	403,3	406,0	451,2
R. San Juan	862,3	865,9	860,5	906,1	910,3
R. San Pedro	862,3	865,9	860,5	906,1	910,3
R. Santa Maria	515,1	519,4	520,7	543,7	544,5
R. Santa Susana	250,5	268,2	262,2	242,9	279,3
R. SN_PA2	222,6	232,1	239,1	217,9	245,5
R. Tres Brazos	889,0	903,7	894,3	950,1	950,5
R_El Canelo	607,2	612,9	614,5	653,9	656,5
R_Grande	571,8	569,8	576,2	601,5	609,0
R_La Caleta	1099,4	1100,3	1092,0	1143,7	1149,5
R_Legnadura	713,5	717,8	717,3	754,0	754,1
SN_PACmar	232,0	233,0	241,8	247,1	267,4

Tabla F.1: Precipitación anual promedio histórico (1991-2020) y futuro (2021-2050) para los diferentes escenarios de proyección.

Catchment	HISTORICO	CSIRO 8,5	CSIRO 6,0	CCSM4 8,5	CCSM4 6,0
Canadon Seco	220,2	235,7	241,7	218,8	256,5
Chaike	224,3	248,4	240,7	220,9	263,3
E. Esperanza	872,2	876,5	868,2	883,4	891,1
Gallego	197,8	225,2	211,1	198,2	231,0
Penitente	502,9	512,5	503,9	511,0	518,2
R_AC3adicional	175,0	187,4	183,1	181,7	197,0
Rubens	729,5	736,4	734,7	740,2	746,7
Zurdo	197,7	227,4	212,3	198,2	220,4

Tabla F.2: Escorrentía anual promedio histórico (1991-2020) y futuro (2021-2050) para los diferentes escenarios de proyección.

Catchment	HISTORICO	CSIRO 8,5	CSIRO 6,0	CCSM4 8,5	CCSM4 6,0
E. Chabunco	203,9	226,5	229,4	245,6	264,0
Estero del Medio y otros	185,3	184,4	192,1	207,8	215,2
Las Minas	530,2	554,4	548,5	608,9	603,0
Las Minas Bajo	530,2	554,4	548,5	608,9	603,0
Q1_LagBlanca	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Q2_LagBlanca	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
R SN_PA3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
R SN_PA4	1,5	0,8	1,1	3,0	2,6
R. Agua Fresca	368,6	407,1	396,0	451,8	444,3
R. Colorado y otros	377,4	413,7	403,2	458,5	451,3
R. El Ganso	399,3	403,5	403,6	442,8	441,1
R. Los Patos	178,5	177,8	185,1	201,0	207,7
R. Pescado	203,9	226,5	229,4	245,6	264,0
R. San Juan	588,9	593,8	587,3	631,4	633,7
R. San Pedro	588,9	593,8	587,3	631,4	633,7

Tabla F.2: Escorrentía anual promedio histórico (1991-2020) y futuro (2021-2050) para los diferentes escenarios de proyección.

Catchment	HISTORICO	CSIRO 8,5	CSIRO 6,0	CCSM4 8,5	CCSM4 6,0
R. Santa Maria	228,6	253,2	246,6	280,4	273,3
R. Santa Susana	0,0	0,8	0,2	0,0	0,2
R. SN_PA2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
R. Tres Brazos	527,3	562,9	547,3	613,7	605,2
R_El Canelo	271,9	282,9	282,9	319,0	315,4
R_Grande	387,7	386,5	391,1	417,5	420,4
R_La Caleta	707,9	707,2	700,8	749,8	752,5
R_Legnadura	395,3	417,3	409,9	455,9	445,5
SN_PACmar	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Canadon Seco	0,0	0,2	0,1	0,0	0,1
Chaike	0,0	1,2	0,2	0,1	0,6
E. Esperanza	629,9	626,0	619,0	632,9	639,6
Gallego	0,1	1,7	0,2	0,1	0,8
Penitente	264,8	268,8	261,3	269,2	273,4
R_AC3adicional	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Rubens	412,4	411,8	410,9	415,9	419,9
Zurdo	42,1	48,7	43,4	37,5	41,8