



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

**EVALUACIÓN DE IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN
EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS EN LA CUENCA DEL RÍO DE
LAS MINAS, REGIÓN DE MAGALLANES Y ANTÁRTICA CHILENA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

JAVIERA IGNACIA CONTRERAS SOTO

PROFESORA GUÍA
XIMENA VARGAS MESA

PROFESOR CO-GUÍA
EDUARDO MUÑOZ CASTRO

MIEMBRO DE LA COMISIÓN
EDUARDO RUBIO ÁLVAREZ

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniera Civil,
Mención Hidráulica, Sanitaria y Ambiental
POR: Javiera Ignacia Contreras Soto
FECHA: 2022
PROFESORA GUÍA: Ximena Vargas Mesa

EVALUACIÓN DE IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS EN LA CUENCA DEL RÍO DE LAS MINAS, REGIÓN DE MAGALLANES Y ANTÁRTICA CHILENA

El cambio climático trae consigo cambios en la recurrencia, persistencia y magnitud de los eventos hidrológicos extremos. En particular, Chile es uno de los países considerado con alta vulnerabilidad ante estos eventos y en específico, la ciudad más austral del país, Punta Arenas, históricamente ha sido víctima de varios eventos hidrológicos extremos. Ejemplo de ellos son el desborde del río de Las Minas y posterior inundación de la ciudad. El que dejó miles de afectados, más de 500 viviendas dañadas y millones de pesos utilizados en operaciones de emergencia y reparación de infraestructura pública.

El presente trabajo busco evaluar los impactos del cambio climático en la cuenca del río de Las Minas, ubicada en Punta Arenas, capital de la región de Magallanes y Antártica Chilena, Chile, en un horizonte futuro hasta finales del siglo XXI. Para ello usando como forzantes las series de precipitación y temperaturas extremas diaria en el periodo 1980-2020 del producto grillado CR2MET v2.0, las distribuciones horarias de precipitación y temperatura derivadas del reanálisis atmosférico ERA5, y los registros fluviométricos disponibles. Se calibraron, usando el algoritmo DDS, los modelos hidrológicos concentrados de precipitación-escorrentía GR4H y GR5H, acoplados al módulo de acumulación/derretimiento nival CemaNeige. Con ello para efectuar las proyecciones climáticas hacia el final del siglo, se consideraron cuatro GCM en escenarios de emisiones RCP 8,5, los cuales corresponden a CCSM4, CSIRO-MK3.6-0, IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM.

Los resultados principales obtenidos, a partir de la modelación en el periodo histórico, indican que, los periodos en donde se evidencia una escorrentía anual acumulada, menor al promedio del periodo, son directa consecuencia del mismo comportamiento evidenciado para las precipitaciones. Además, se observa que son las precipitaciones intensas, las principales responsables de los desbordes evidenciados en la cuenca del río de Las Minas. Por su parte, se observa que la temperatura es la responsable de la distribución del régimen de escorrentía. Posteriormente, a partir de la proyección futura, se observa un aumento promedio de 2°C en la temperatura máxima y mínima, lo que provocara que la cuenca pase de tener un régimen nivo-pluvial, a pluvio-nival para el futuro cercano (2020-2060) y finalmente a pluvial para el futuro lejano (2060-2100). Además, respecto a los caudales máximos, se evidencia un aumento de un 40% de los caudales asociados a los periodos de retorno de 100, 200 y 500 años.

Finalmente, se concluye que los mayores impactos que tendrá el cambio climático sobre el río de Las Minas serán los referidos a los eventos hidrológicos extremos relacionados a los desbordes de río.

*A mis estrellas que me cuidaron y acompañaron durante
todo este proceso, y me ayudaron a enfrentar todas las adversidades*

*Y a quien me cuida y acompaña aquí en la tierra,
Mi magallánica favorita,
Mi Maquita*

Agradecimientos

Quisiera agradecer en primer lugar, a quienes me guiaron durante todo este proceso. A mi profesora guía Ximena Vargas, por toda su preocupación, confianza depositada en mí, infinita comprensión y por todas las enseñanzas que muchas veces fueron más allá de lo académico. A Eduardo Muñoz, mi profe co-guía, por todo el apañe, la infinita paciencia, y sobre todo por su apoyo y entrega.

A mis cabres, quienes me acompañaron desde mechonsita, Maru, Tole, Anto, Nati, Mandi, Cami, Colo, Coto, Oscar, Guaton y Nibaldo. Gracias por el cariño, la contención, los jugos, carretes, almuerzos, tardes de estudio que terminaron siendo carrete, viajes, dramas, acampadas y por sobre todo seguir a mi lado.

A quienes conforman CEUS Chile, el espacio de trabajo más lindo y humano que conocí, y del que pude ser parte desde sus inicios. En particular al equipo del año 2018. Me siento honradísima y agradecida de haber podido trabajar y aprender de cada uno de ustedes, pero más aun de haberles conocido y llamarles a muchos, amigos. En especial a mi ex presi, la Isa, por ser mi madrina extraoficial desde el día 1, llevándome sanita y salva a mi casa después de mi primer carrete en la u. Sos tremenda Isa y agradeceré siempre tu infinita ayuda, empujarme a tomar nuevos desafíos y confiar en mí.

A mis niños civiles. En especial a la Javi M, Dani, Cata y Xavi. Gracias por escucharme, aconsejarme, faltar conmigo a clases, hacer las tareas conmigo y acarrearne muchas veces, aguantarme las mañan y por todo su amor durante estos últimos años.

A mis amigos y amigas de Puqcity. En particular, a mi mejor amiga, por su incondicionalidad desde que tenemos 12 años. Te amo siempre mi Javi.

A mi familión, mis tíos, tías, primes y a mi abuelita, por su cariño y contención única.

A mi mamá y papá, mi Juli y mi Sandri, por apoyarme en todo lo que se me ocurrió hacer, estar siempre en primera fila celebrándome, y por entregarme todos los valores que hoy me definen como persona y de los que estoy profundamente orgullosa.

A mi hermana, mi Maquita, mi compañera de vida y mi pilar fundamental, porque sufrió conmigo cada dada vuelta de ramos, porque me levanto de todas y cada una de mis caídas, me agunto y me sigue aguantando en mis peores momentos, y porque siempre creyó en mí, incluso cuando yo no lo hacía recordándome siempre que yo si me la podía. Hermana sin ti absolutamente nada de esto habría sido posible.

Finalmente, a todas las personas de Punta Arenas que me ayudaron con sus testimonios y sabiduría del río de Las Minas.

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivos Específicos.....	2
1.2	Estructura del documento.....	2
2	Recopilación de Antecedentes.....	3
2.1	Cambio climático y proyecciones futuras.....	3
2.2	Eventos hidrológicos extremos y cambio climático.....	4
2.3	Caracterización de eventos hidrológicos extremos.....	6
2.4	Modelación de sistemas hidrológicos.....	8
3	Zona de Estudio.....	11
3.1	Caracterización de la cuenca del río de Las Minas.....	11
3.2	Antecedentes de eventos hidrometeorológicos extremos.....	12
3.3	Datos hidrometeorológicos.....	15
3.3.1	Estaciones de observación.....	15
3.3.2	Producto grillado CR2MET.....	16
4	Metodología.....	18
4.1	Implementación de los modelos.....	18
4.1.1	Evaluación de desempeño del producto CR2Met para valores de precipitación	19
4.1.2	Propuesta metodológica para estimación de factores de corrección del producto CR2Met22	
4.1.3	Propuesta metodológica para aplicar la corrección de forzantes de precipitación del producto CR2MET concentrado a escala de cuenca.....	23
4.1.4	Evaluación del desempeño del producto de temperatura CR2Met v2.0.....	23
4.1.5	Definición de periodos Calibración y Validación.....	24
4.1.6	Calibración y Validación.....	25
4.1.7	Forzantes Proyectadas.....	27
5	Resultados y Discusión.....	29
5.1	Evaluación del desempeño del producto CR2MET para valores de precipitación y posterior corrección.....	29
5.1.1	Análisis discreto.....	29
5.1.2	Análisis continuo de valores de precipitación.....	31
5.2	Corrección a forzantes de precipitación.....	34
5.3	Evaluación del desempeño del producto CR2MET para valores de temperatura.....	35
5.4	Calibración y validación.....	36
5.5	Desempeño del modelo GR4H y CemaNeige para la estimación de caudales máximos	39

5.6	Análisis Periodo Histórico	40
5.6.1	Anomalías anuales	40
5.6.2	Curvas de variación estacionas definidas por periodos anormales.....	41
5.6.3	Cálculo de Sequia Meteorológica.....	42
5.6.4	Cálculo de sequía hidrológica	43
5.6.5	Análisis de inundaciones por desbordes de río.....	44
5.7	Análisis Periodo Futuro sujeto a Cambio climático	46
5.7.1	Variación hidroclimática respecto al periodo futuro	46
5.7.2	Cálculo de sequía meteorológica proyectada	50
5.7.3	Cálculo de sequía hidrológica proyectada	51
5.7.4	Calculo de cambio en la escorrentía máxima futura.....	53
6	Conclusiones.....	56
7	Bibliografía.....	60
	ANEXOS	66

Índice de tablas

Tabla 2-1: Categorías determinadas por el valor del SPI.	7
Tabla 2-2 Definición de parámetros libres de modelos GR y módulo CemaNeige	9
Tabla 3-1: Catastro de desbordes del río de Las Minas, Fuente: Adaptada de Muñoz et al, 2020.13	
Tabla 3-2Características de las estaciones hidrometeorológicas.....	16
Tabla 4-1: Eventos de precipitación según su intensidad.....	20
Tabla 4-2: Valores óptimos de los índices categóricos.	21
Tabla 4-3: Subperiodos de análisis continuo.....	22
Tabla 5-1: Métricas estadísticas calculadas para el análisis continuo de valores de precipitación del producto CR2MET en el periodo 1981-1983. (SC = producto crudo y C = producto corregido)	32
Tabla 5-2: Métricas estadísticas calculadas para el análisis continuo de valores de precipitación del producto CR2MET en el periodo 1999-2001. (SC = producto crudo y C = producto corregido)	33
Tabla 5-3: Métricas estadísticas calculadas para el análisis continuo de valores de precipitación del producto CR2MET en el periodo 2014-2016. (SC = producto crudo y C = producto corregido)	34
Tabla 5-4: Detalle de los años en que se usaron los registros de las estaciones para.....	34
Tabla 5-5: Resultados de las métricas analizadas entre la serie representativa de la cuenca y la medida por estación (SC = serie a nivel cuenca sin corregir y C = serie a nivel cuenca corregida).	35
Tabla 5-6: Métricas analizadas para evaluación de periodos de validaciones y calibración. modelo GR4H.....	37
Tabla 5-7:Métricas analizadas para evaluación de periodos de validaciones y calibración. modelo GR5H.....	38
Tabla 5-8: parametros finales GR4HCN	39
Tabla 5-9:Resultados del cálculo del SPI para el periodo histórico	42
Tabla 5-10: Resultados del cálculo del SPEI para el periodo histórica.....	43
Tabla 5-11: Resultados del índice de sequía diaria para el periodo histórico.	44
Tabla 5-12: Áreas de inundación asociadas a un periodo de retorno según Muñoz et al. 2020....	45
Tabla 5-13: Resultados del índice SPEI para los periodos histórico, futuro cercano y futro lejano para el modelo CCSM4.	50
Tabla 5-14: Resultados del índice SPEI para los periodos histórico, futuro cercano y futro lejano para el modelo CSIRO.....	50
Tabla 5-15: Resultados del índice SPEI para los periodos histórico, futuro cercano y futro lejano para el modelo MIROC-ESM.....	51
Tabla 5-16: Resultados del índice SPEI para los periodos histórico, futuro cercano y futro lejano para el modelo IPSL-CMA5-LR.	51
Tabla 5-17: Resultados del índice de sequía diaria para los periodos histórico y futuros.....	53
Tabla 5-18: Funciones de distribución de probabilidad asociadas a cada serie evaluada.	54
Tabla 5-19Calculo de periodos de Retorno para los 4 GCM en los 3 periodos de análisis.	54
Tabla 5-20 Cálculo de factores de cambio en periodos de retorno.	55

Índice de figuras

Figura 2-1: Esquema modelo conceptual acoplado GR4H y CemaNeige,.....	10
Figura 3-1: Ubicación de la cuenca del río de Las Minas y su distribución de alturas.	11
Figura 3-2: Climograma cuenca Río de las Minas periodo 1985-2015, construido a partir de los registros de precipitación y temperatura derivados de la estación PA-04.	12
Figura 3-3: a) Curvas de variación estacional; b) Curvas de duración promedio (azul) y anuales (gris) periodo 1985-2015.	12
Figura 3-4: Poblaciones y expansión urbana entorno al río de Las Minas. Fuente: Muñoz et al, 2020.	13
Figura 3-5: Precipitación anual acumulada entre los años 1900-2014. Fuente: Gonzalez-Reyes A. et al, 2017.	15
Figura 3-6: Ubicación estaciones hidrometeorológicas respecto a cuenca y densidad de información estaciones pluviométricas (* mide información meteorológica, ** mide información fluviométrica).	16
Figura 4-1: Delimitación de cuenca Río Las Minas en Bt. Sendos.....	18
Figura 4-2: Ejemplo de tabla de contingencia para cierto evento.	20
Figura 4-3: Cantidad de días con información observada en los años del periodo histórico.	24
Figura 4-4: Anomalías observadas en el periodo histórico 1980-2020 para definir periodos de calibración y validación.	25
Figura 5-1: Resultados de los índices categóricos para la evaluación de los valores de precipitación del producto crudo CR2MET.	30
Figura 5-2: Resultados de los índices categóricos para la evaluación de los valores de precipitación del productor corregido CR2MET.....	31
Figura 5-3: Correlación entre los valores de precipitación diarios del producto CR2MET y los valores medidos por una estación en el periodo 1981-1983, La columna izquierda muestra correlación con producto crudo, y la derecha con el producto corregido.....	32
Figura 5-4: Correlación entre los valores de precipitación diarios del producto CR2MET y los valores medidos por una estación en el periodo 1999-2001, La columna izquierda muestra correlación con producto crudo, y la derecha con el producto corregido.....	33
Figura 5-5: Correlación entre los valores de precipitación diarios del producto CR2MET y los valores medidos por una estación en el periodo 2014-2016, La columna izquierda muestra correlación con producto crudo, y la derecha con el producto corregido.....	33
Figura 5-6: Hidrograma de precipitación diaria que compara la serie de precipitación representativa de la cuenca y a la serie medida por estación. Figura superior muestra la comparación con serie a nivel de cuenca sin corregir, y la figura inferior con la serie a nivel cuenca corregida.	35
Figura 5-7 Estacionariedad de valores de temperatura en el periodo 1979-2020	36
Figura 5-8: Hidrograma a nivel diario de la escorrentía observada versus la modelada por el modelo GR4HCN.	37
Figura 5-9: Resultados modelo GR4HCN, curva de variación estacional de escorrentía observada versus modelada a la izquierda y Curva de duración de escorrentía diaria observada versus modelada a la derecha.....	37
Figura 5-10: Hidrograma a nivel diario de la escorrentía observada versus la modelada por GR5HCN.	38

Figura 5-11: Resultados modelo GR5HCN, curva de variación estacional de escorrentía observada versus modelada a la izquierda y Curva de duración de escorrentía diaria observada versus modelada a la derecha.....	38
Figura 5-12: Comparación de curvas de duración para caudales máximos instantáneos medidos por estación fluviométrica RLM y modelados por GR4HCN.	39
Figura 5-13: Anomalías de, temperatura media anual promedio (a), precipitación anual acumulada (b),y escorrentía anual acumulada (c), respecto a su promedio histórico anual.	41
Figura 5-14: Análisis de las curvas de variación estacional para las 4 combinaciones de anomalías meteorológicas observadas en el análisis de anomalías anuales.	42
Figura 5-15: Diferencia del caudal medio anual respecto al caudal que define la “demanda mínima” hídrica para el periodo histórico.	44
Figura 5-16: Inundaciones por desbordes de río ocurridas en mayo 1990 y en marzo 2012. Fuente: Adaptada de Muñoz et al 2020.	45
Figura 5-17: Modelo HEC-RAS y puntos críticos detectados en la canalización.....	46
Figura 5-18: Curva de variación estacional de Precipitación mensual promedio para los 4 GCM en los 3 periodos de análisis.....	47
Figura 5-19 Curva de variación estacional de Temperatura máxima y mínima mensual promedio para los 4 GCM en los 3 periodos de análisis.	48
Figura 5-20: Curva de variación estacional de escorrentía mensual promedio para los 4 GCM en los tres periodos de análisis.	48
Figura 5-21 Medianas de escorrentías medias diarias en el año calendario, para los 4 GCM, en los 3 periodos analizados.....	49
Figura 5-22: Diferencia de caudal media anual con respecto al caudal de demanda hídrica "mínima" para los periodos históricos y futuros.	52

1 Introducción

Actualmente el país se encuentra viviendo una crisis climática sin precedentes. Según el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2018), los escenarios futuros proyectan extremos cálidos en la mayoría de las regiones habitadas, fuertes precipitaciones y probabilidad de sequía. En particular, Chile es tremendamente frágil ante este fenómeno, debido a que cumple con siete de los nueve criterios de vulnerabilidad definidos por la ONU en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), entre ellas se encuentran las áreas de borde costero de baja altura, y áreas propensas a sequías y desertificación (MMA,2011).

Según el informe especial sobre eventos extremos (SREX IPCC, 2012) del IPCC, el cambio climático será responsable del aumento en la frecuencia, intensidad y magnitud y duración de los eventos climáticos extremos. Asimismo, en la 2da Comunicación de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas, el Ministerio del Medio Ambiente (2011) estima un aumento en la frecuencia de eventos extremos tales como sequías, e inundaciones fluviales y costeras en Chile, debido al cambio climático. De este modo, tanto las sequías hidrológicas, como las inundaciones por desbordes de río son escenarios ante los cuales Chile debe estar preparado.

En particular, y a lo largo de la historia. La capital de la Región más austral del territorio chileno, Punta Arenas. Ha sido víctima de múltiples inundaciones por desbordes del río de Las Minas. Estos eventos, mejor conocidos como desastres naturales, han dejado miles de damnificados, infraestructura hidráulica dañada, como puentes y redes de agua potable, costos de operaciones de emergencias del orden de los mil millones de pesos. Y más aún, han dividido la ciudad, producto de los miles de metros cúbicos de lodo, depositados en sus calles (Muñoz et al ,2020).

Por otro lado, el informe pluviométrico Nacional (DGA,2019), evidencio un superávit del 2% en las precipitaciones medidas por la estación ubicada en la ciudad de Punta Arenas. Siendo esta una de las 4 estaciones en todo el país que no presentaron déficit. Sin embargo y bajo un escenario pesimista de emisión de gases de efecto invernadero (GEI), las simulaciones para el periodo 2010-2050 muestran en Chile, la ocurrencia de una mega sequía cada 20 años (CR2,2015). Fenómeno, que no deja exenta a esta zona de sufrir sequías en el futuro.

En este sentido, resulta fundamental entender los alcances del cambio climático en esta zona. Debido a que, al comprender los posibles impactos que puede genera este fenómeno, sobre todo, los que generaran cambios en el pronóstico de eventos hidrológicos extremos futuros. Es posible comprender la amenaza, exposición, vulnerabilidad y el riesgo asociado a ellos. Y así, establecer medidas de mitigación y adaptación que ayuden a disminuir sus efectos. Sobre todo, aquellos que impactan sobre las vidas humanas.

1.1 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es evaluar los impactos del cambio climático en la magnitud, ocurrencia, recurrencia y persistencia de eventos hidrometeorológicos extremos en la cuenca del río de Las Minas.

1.1.1 Objetivos Específicos

1. Implementar los modelos hidrológicos GR4H y GR5H en la cuenca del río de Las Minas con el fin de obtener la esorrentía generada por las condiciones meteorológicas.
2. Definir la línea base de la recurrencia, magnitud, intensidad y consecuencia de los eventos hidrológicos extremos.
3. Evaluar las proyecciones climáticas con modelos de circulación global y la esorrentía generada bajo las mismas.
4. Cuantificar los impactos en los eventos hidrológicos extremos y sus posibles consecuencias

1.2 Estructura del documento

El siguiente documento, muestra el trabajo realizado, los resultados y las conclusiones obtenidas a partir del estudio desarrollado.

El capítulo 2 aborda la información recopilada atingente al estudio desarrollado. Luego el capítulo 3 muestra la zona de estudio, sus características más importantes, su antecedentes respecto a la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos y las fuentes de información hidrometeorológica existentes para la zona.

Capítulo 4 describe la metodología desarrollada enfocado en la implementación de los modelos hidrológicos. El capítulo 5 muestra los resultados obtenidos, subdivididos en 3 grandes temas, implementación de los modelos, análisis histórico y análisis futuro.

Finalmente, el capítulo 6 aborda las conclusiones principales y específicas obtenidas.

2 Recopilación de Antecedentes

En esta sección se abordan los temas relevantes que ayudan a la comprensión y desarrollo del siguiente trabajo.

En primer lugar, se revisa la metodología de implementación de cambio climático en estudios hidrológicos. Los supuestos que la sustentan, y su aplicación en investigaciones desarrolladas en Chile. Posterior a ello, se estudia la relación de los eventos hidrológicos extremos con otras variables climáticas y fenómenos. Los desastres asociados a estos eventos, y como se aborda el estudio de dichos eventos.

Además, se revisan algunas métricas estadísticas propuestas para la caracterización de los eventos hidrológicos extremos. Finalizando con una investigación de la modelación, como método de representar sistemas hidrológicos.

2.1 Cambio climático y proyecciones futuras

El cambio climático se define según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) como una variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o incluso períodos más largos (IPCC, 2013).

Una metodología común para cuantificar las señales de cambio en variables climáticas producidas por este fenómeno, hace uso de los resultados de modelos de circulación global, o GCM por sus siglas en inglés. Los GCM son la herramienta más avanzada que se tiene actualmente para representar los procesos físicos, químicos y dinámicos que ocurren en la atmósfera, océano, criósfera y superficie terrestre (DGA, 2017). A partir de ellos, se pueden generar proyecciones climáticas de largo plazo, ya que son capaces de simular sobre una base física, la pasada y futura evolución del clima, forzados principalmente por posibles escenarios de emisión de gases de efecto invernadero, aerosoles provenientes de erupciones volcánicas, quema de biomasa, cambio en el uso de suelo y radiación solar ((CR)2, 2018).

Además, los GCM forman parte del Proyecto Internacional de Intercomparación de Modelos (CMIP por sus siglas en inglés), que se desarrolla en el marco de la elaboración de informes del Panel Intergubernamental sobre cambio climático. Actualmente, el proyecto tiene 6 fases, cada una de ellas es una versión mejorada de la anterior, y a su vez, provee de información climática para las actualizaciones de los informes del Panel. Es decir, el último reporte del IPCC o mejor conocido como AR6 por sus siglas en inglés, considera los resultados obtenidos a partir del CMIP6 o sexta fase del proyecto (Eyring, V. et al., 2016)

Cada fase del proyecto CMIP contempla una cantidad considerable de GCM. La 5ta fase por ejemplo, cuenta con alrededor de 60 GCM obtenidos a partir de las múltiples combinaciones de: (i) escenarios, (ii) modelos y (iii) simulaciones. Todos los GCM de esta fase consideran al menos una simulación para un periodo histórico (1850-2005) y otra para un periodo futuro (2005-2100) (Taylor et al, 2012). La primera forzada por emisiones observadas y la segunda bajo posibles

escenarios de emisiones que están sujetos a distintos escenarios estimados de crecimiento económico y social, definidos en el Quinto informe del IPCC.

Estos escenarios se denominan Trayectorias de Concentraciones Representativas o RCP por sus siglas en inglés (Moss et al, 2010) y se caracterizan por su forzamiento radiativo total para el año 2100, que oscila entre los 2.6 y los 8.5 W/m². En relación con lo anterior se definen 4 posibles trayectorias de concentración, que comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo, o de 2.6 W/m² (RCP2.6), dos escenarios de estabilización (RCP 4.5 y RCP 6.0), y un escenario que contempla un nivel muy alto de emisiones asociado a un forzamiento de 8.5 W/m². Este último es el más desfavorable de todos, pero a su vez el más probable (DGA, 2017).

Por otro lado, considerando la cantidad de GCM desarrollados por diversas instituciones, resulta necesario definir cual o cuales modelos representan mejor las condiciones climáticas en la zona de interés. En particular, la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA,2017) realizó un análisis de los GCM disponibles para CMIP5, que concluyo con la selección de 4 modelos para desarrollar sus proyecciones en Chile. Los modelos seleccionados fueron: (i) CSIRO-Mk3-6 (Collier et al, 2011); (ii) CCSM4 (Danabasoglu et al, 2012); (iii) MIROC-ESM (Watanabe et al, 2011); (iv) IPSL-CM5A-LR (Dufresne et al, 2013).

Estos modelos fueron seleccionados debido a tres criterios: (i) su buena representación de modos de variabilidad de gran escala; (ii) abarcar diferentes sensibilidades climáticas; (iii) tener una correlación satisfactoria respecto a simulaciones históricas con las oscilaciones de El Niño-Oscilación del Sur y el Modo Anular del Sur. El último criterio resulta fundamental a la hora de aplicar algún modelo en la zona Austral, ya que este mismo estudio demuestra que existe una alta correlación entre las oscilaciones del Modo Anular del Sur y los patrones de precipitación anual observados en dicha zona entre los años 1985 y 2015. Más aun, esta correlación se exhibe a múltiples escalas temporales en Punta Arenas según un estudio de Anales de Instituto de la Patagonia, que indica relaciones desde escalas interanuales a inter-decadales (Gonzalez-Reyes A. et al, 2017).

2.2 Eventos hidrológicos extremos y cambio climático

El término “evento extremo” está definido por el IPCC para las dimensiones de eventos meteorológicos extremos, como la ocurrencia de que un valor de cierta variable meteorológica sea mayor (o menor) a cierto umbral definido por un extremo superior (o inferior) del rango de valores observados de tal variable (IPCC,2012). Por tanto, eventos hidrológicos extremos estarían definidos por las variaciones extremas de variables hidrológicas, como por ejemplo la escorrentía media diaria de una cuenca. Así, para este mismo ejemplo, extremos hidrológicos por debajo de un umbral inferior podrían provocar sequía, y a su vez por encima de un umbral superior, inundaciones.

Las variaciones hidrológicas extremas se encuentran estrechamente relacionadas con la variación interanual de precipitación. Según Mishra et al (2010) la reducción de precipitaciones durante un periodo de tiempo prolongado está directamente relacionada con la sequía o la disminución

significativa del recurso hídrico. Por su parte, Wang, et al. (2019) asevera que la variabilidad de las precipitaciones es uno de los principales impulsores de las inundaciones.

En evidencia de lo anterior, se concluye que estos fenómenos locales y/o regionales de eventos hidrológicos extremos tienen una estrecha relación con la circulación atmosférica y con sus anomalías, en escala sinóptica y global. Por lo tanto, cambios meteorológicos, de humedad y/o de presión atmosférica, como los que provocara el cambio climático serán de gran impacto en este tipo de eventos extremos. Conclusión que afirma el IPCC, indicando que este conducirá a cambios en la frecuencia, intensidad, espacio, extensión, duración y momento de evento extremos e incluso resultar en extremos sin precedentes (IPCC,2012).

Así, en las últimas décadas se han realizado diversos estudios enfocados al impacto del cambio climático en los sistemas hidrológicos, con especial atención en las consecuencias extremas como lo son las sequías e inundaciones (Nijssen et al., 2001; Hirabayashi et al., 2008; Urrutia and Vuille, 2009; Dirmeyer et al., 2012; MMA, 2019). Ya que estas últimas caben en la categoría de lo que hoy se conoce como desastre natural, que, según Naciones Unidas, son una interrupción grave del funcionamiento de una comunidad o sociedad a cualquier escala debido a eventos peligrosos que interactúan con las condiciones de exposición, vulnerabilidad y capacidad de respuesta, que pueden provocar pérdidas e impactos humanos, daños materiales, económicos y/o ambientales (UNDRR, 2020a). Por lo tanto, se entiende que estos eventos extremos son una amenaza para la humanidad.

Por otro lado, y en particular, Chile es un país que ha sufrido históricamente por las consecuencias de eventos hidrológicos extremos. La base de datos internacional de desastres (EM-DAT por sus siglas en inglés) calculó que los eventos con mayor porcentaje de ocurrencia durante el periodo de 1906-2019 fueron las inundaciones, alcanzando un 25% del total. Por su parte, la sequía, aunque solo llega a un 1,4% de ocurrencia, considera un impacto que puede ser significativamente mayor a otros desastres como se ha observado en los últimos años (EM-DAT, 2020). Además, y como se mencionó anteriormente, el cambio climático tendrá efectos significativos en los eventos extremos, y en particular Chile no contempla lo contrario. De hecho, el Ministerio del Medio Ambiente estima marcados periodos de sequía con una ocurrencia de más de 10 veces en 30 años, y aunque se espera disminución de las precipitaciones, los eventos de lluvias torrenciales con temperaturas elevadas se incrementaran (MMA,2019).

Por las implicancias que consideran los eventos hidrológicos extremos y los antecedentes que presenta Chile frente a ellos, resulta necesario comprender los alcances del cambio climático, ya que, entender la amenaza, exposición, vulnerabilidad y el riesgo que enfrenta el país, ayuda a establecer medidas de adaptación ante estos posibles desastres. Y así, ser capaces mitigar su impacto. Sin embargo, estas medidas no pueden determinarse de forma general debido a que los climas y la topografía que caracterizan a cada macrozona del país son tremendamente diferentes, y por consiguiente no vivirán los efectos del cambio climático de la misma forma.

En este contexto, el proyecto Atlas de Riesgos Climáticos (Arclim) desarrollo el análisis del riesgo que podrían sufrir los sectores sociales, productivos y ambientales, frente a un cambio en las condiciones climáticas en las comunas de todo el territorio chileno (Pica-Téllez et al, 2020). Este indicador se calcula a partir de la exposición, sensibilidad y amenaza respecto al cambio entre un

periodo histórico (1980-2010) y un periodo futuro mediano (2035-2065), bajo un escenario pesimista respecto a emisiones de gases efecto invernadero (RCP8.5). En específico, dentro del sector ambiental, se estudió el riesgo de las inundaciones por desbordes de río y la sequía, sin embargo, para zona Austral, y en particular, para la comuna de Punta Arenas, no existe cálculo de dicho indicador debido a la falta de información de esta zona.

Sin embargo, respecto a lo evidenciado hasta el momento en zona Austral (DGA, 2017), es posible que se observe un aumento en la frecuencia de las inundaciones por desbordes de río y urbanas. Ya que, no se esperan déficit de precipitaciones para esta zona, por el contrario, se espera un aumento de ellas.

2.3 Caracterización de eventos hidrológicos extremos

La caracterización de eventos hidrológicos extremos se puede realizar a partir de diversos índices existentes, que definen duración, intensidad y magnitud. Sin embargo, por lo general estos se han desarrollado para identificar sequías, como el índice de Palmer (Palmer, 1965), el Índice Estandarizado de Precipitación o SPI por sus siglas en inglés (Mckee et al, 1993), el índice definido por la demanda hídrica propuesto por Dracup et al (1980a, 1980b), entre otros. No obstante, extremos contrarios a sequías, como lo son las crecidas, también son posibles de cuantificar a partir de algunos índices desarrollados inicialmente para sequía, así como el SPI.

En relación con los índices que permiten identificar sequías, es necesario determinar en primera instancia el tipo de sequía que se busca identificar. Debido a que existen varias definiciones para ellas, de las cuales se destacan dos para los alcances de este estudio, la sequía meteorológica y la hidrológica. La primera de ellas se relaciona con una disminución en la precipitación respecto al promedio o a cierto umbral inferior en un periodo de tiempo determinado. Por su parte, la sequía hidrológica se percibe o cuantifica como una disminución en los caudales de los sistemas fluviales, respecto a su promedio diario o a cierto caudal umbral límite (Vicario, et al. 2015). Pese a lo anterior, es necesario destacar que ambas son subjetivas y están condicionadas por el clima, la zona geográfica en donde mida, y en algunos casos por la demanda hídrica social o de sistemas productivos (Fernandez, 1997)

Respecto a metodologías propuestas para cuantificar sequías meteorológicas, se encuentra el ya mencionado índice estandarizado de precipitaciones (SPI). A partir de este, es posible cuantificar el déficit de precipitación de diferentes escalas temporales. Esto, ajustando la distribución de frecuencia de la precipitación de la zona de estudio, en la escala de tiempo de interés, a una función teórica de densidad de probabilidad.

Posterior al ajuste, la función de densidad se transforma a una distribución normal estandarizada con media igual a 0 y varianza igual a 1. Siendo el SPI el valor que resulta de esa transformación, que representa la cantidad de desviaciones estándar en que el valor que fue transformado de la precipitación se desvía del valor promedio. Por tanto, valores negativos representan déficit, y por el contrario valores positivos indican periodos más húmedos (Tabla 2-1)

Tabla 2-1: Categorías determinadas por el valor del SPI.

SPI	Categoría
-2 o menos	Extremadamente seco
-1,5 a -1,99	Severamente seco
-1 a 1,49	Moderadamente seco
-0.99 a 0.99	Normal
1 a 1.49	Moderadamente húmedo
1.5 a 1.99	Severamente húmedo
2 o más	Extremadamente húmedo

Otro índice para cuantificar sequías meteorológicas es la extensión del SPI propuesta por Vicente-Serrano et al. (2010) y Beguería, Vicente-Serrano, Reig y Latorre (2014) denominado como Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración o SPEI por sus siglas en inglés. Este índice, a diferencia del SPI, ajusta la distribución de frecuencia del balance climático, que se calcula a partir de la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial. Además, se considera que tiene un mayor potencial como índice de sequías, al ser sensitivo al cambio climático, ya que usa una medida más certera de la disponibilidad hídrica, al incluir la evapotranspiración en cálculo.

En la misma línea de los métodos propuestos para calcular sequías, se encuentra el propuesto por Dracup et al (1980a,1980b), que por su lado evidencia la sequía hidrológica. Este se define a partir de la diferencia entre la “oferta hídrica” y la “demanda hídrica mínima” (ecuación 1). La primera se determina a partir del caudal medio anual una cuenca, mientras que la segunda, con el caudal medio anual correspondiente a cierta probabilidad de excedencia, calculada a partir de la serie de caudales medios anuales en cierta cantidad de años.

$$Dif_i = Q_i - Q_{P\%} \quad (1)$$

Donde $Q_{P\%}$ representa la “demanda mínima” y es el caudal medio anual con probabilidad de P de excedencia. Q_i es la “oferta” y el caudal medio anual en el año i del periodo estudiado. Finalmente, Dif_i es la diferencia entre ambos que indica sequía al ser negativa. En particular el Atlas de Riesgos Climáticos (Arclim), definió la amenaza de sequía hidrológica con este índice y caracterizo una sequía severa como la diferencia negativa entre el caudal de oferta y el caudal asociado a un 85% de probabilidad de excedencia. Asimismo, se caracteriza la sequía muy severa, pero tomando como demanda hídrica un caudal asociado a un 95% de excedencia.

Finalmente, otro índice que permite evaluar la duración e intensidad de las sequias hidrológicas, es el también calculado por Arclim y denominado como “Días de sequía”. Este corresponde a los días del año en que se percibe una condición de sequía, determinada por un umbral comparativo. Este umbral se calcula a partir de una condición normal, la cual obedece a definir un caudal de cierta probabilidad de excedencia para la observación histórica. Así el caudal umbral es diferente para cada día, y para definirlo se usa la siguiente ecuación (2).

$$Q_{Umbral_i} = Q_{P\%}(Q(i - 15; 1 + 15)) \quad (2)$$

Donde Q_{Umbral_i} , es el caudal de probabilidad de excedencia P% del día juliano i, $Q_{P\%}$ es el porcentaje asociado a cierta probabilidad de excedencia, calculado en torno a la serie de compuesta por los caudales observados 15 días antes del juliano i y 15 días después.

Luego, se obtiene una serie de caudales “umbrales” para todo el periodo de análisis a nivel diario, que se compara con los caudales diarios observados de la siguiente forma:

$$\begin{cases} Q_{di} < Q_{Umbral_i} \Rightarrow \text{Con Sequía} \\ Q_{di} > Q_{Umbral_i} \Rightarrow \text{Sin Sequía} \end{cases} \quad (3)$$

En particular, Arclim define para sequía severa un caudal de probabilidad de excedencia asociado a un 85%, mientras que, para sequía muy severa, caudal de 95%.

Por otro lado, para las crecidas o caudales máximos. Arclim propone el cálculo del índice “factor de cambio”. Este se asocia a la variación de los caudales correspondientes a los periodos de retorno de 10, 25, 50, 100, >100 años, entre dos periodos estudiados (ecuación 4).

$$F_c = Q_{P_2}(T = X) / Q_{P_1}(T = X) \quad (4)$$

Donde Q_{P_2} es el caudal del periodo “futuro” asociado al periodo de retorno T de X años, mientras que Q_{P_1} es el caudal histórico asociado al mismo periodo de retorno. Así, F_c es el factor de cambio. Este Factor indica “amenaza” cuando resulta ser mayor a 1.

2.4 Modelación de sistemas hidrológicos

Una herramienta valiosa para representar el comportamiento y los procesos que dominan los sistemas fluviales, así como cuencas hidrográficas, son los modelos hidrológicos. Estos permiten, a partir de diversas variables de entrada tanto físicas como climáticas, modelar la respuesta de un sistema hidrológico dante ciertas condiciones evaluadas. Por lo tanto, resultan de gran utilidad para la gestión de recursos hídricos y para la evaluación potenciales efectos del cambio climático en crecidas y/o disminución de caudales, ya que permiten traducir las variaciones de precipitación y temperatura (ie., variables climáticas) en variaciones hidrológicas (Fowler et al,2016).

Existe una gran variedad modelos hidrológicos, de los cuales destacan los modelos conceptuales, ya que proponen representaciones simplificadas de cómo se transforma la precipitación en escorrentía a escala de cuenca (Coron, 2017). Estos modelos requieren en general pocas variables de entradas, las cuales se reducen a forzantes climáticas y caudales observados para efectuar la calibración del modelo, razón por la cual pueden implementarse con mayor facilidad en comparación a otros modelos estructuralmente más complejos (Lampert y Wu, 2015).

El Instituto Nacional de Investigación para la Agricultura, la Alimentación y el Medio Ambiente de Francia (INRAE) ha desarrollado un conjunto de modelos hidrológicos conceptuales, denominados *Genie Rural* (GR) (Perrin et al., 2009). Estos son modelos conceptuales concentrados que se pueden aplicar en varios pasos de tiempo, desde una hora hasta años, y sus parámetros se

pueden calibrar a partir de observaciones de caudales. Además, su uso y aplicación se facilita en gran medida debido a que se encuentran implementados, a través del paquete airGR (Coron et al, 2020, 2017), en el programa de código libre R (<https://www.r-project.org/>).

Dentro de la familia de modelos de precipitación-escorrentía GR, se encuentran los modelos GR4H y GR5H. Estos cuentan con cuatro o cinco parámetros libres respectivamente y modelan a un paso temporal horario los procesos de generación de escorrentía. Para su funcionamiento requieren de tres forzantes climáticas al mismo paso temporal, las cuales corresponden a precipitación (P), temperatura (T) y evapotranspiración potencial (ETP). Esta última puede omitirse, dado que el paquete airGR cuenta con la opción de estimarla usando la temperatura, el día juliano y la latitud de la zona de estudio a través del método de Oudin et al (2005).

airGR cuenta, a su vez con un módulo de nieve semi-distribuido a través de bandas de elevación denominados CemaNeige, que permite caracterizar los procesos de acumulación y derretimiento de nieves mediante un enfoque de factor grado-día, a partir de dos parámetros libres. Este modelo también necesita como variables de entrada, la precipitación y temperatura y además la curva hipsométrica que define la cuenca en estudio.

Así, los modelos acoplados GR4HCN y GR5HCN, poseen 6 y 7 parámetros libres (Tabla 2-2), los que permiten replicar conceptualmente los procesos de intercambio de aguas esquematizados en la FIGURA 2-1.

Tabla 2-2 Definición de parámetros libres de modelos GR y módulo CemaNeige

Parámetro	Descripción	Unidades
Modelo hidrológico GR4H y GR5H		
X1	Capacidad máxima de estanque de almacenamiento	mm
X2	Coefficiente de intercambio de aguas desde el estanque de transito	mm/d
X3	Capacidad máxima de estanque de tránsito	mm
X4	Tiempo base del hidrograma unitario de ruteo	días
Modelo hidrológico GR5H		
X5	Umbral para que la función de intercambio cambie de signo	-
Módulo de nieves CemaNeige		
CN1	Coefficiente de ponderación para el cálculo del estado térmico del manto nival	-
CN2	Coefficiente de derretimiento grado-día	mm/°C/día

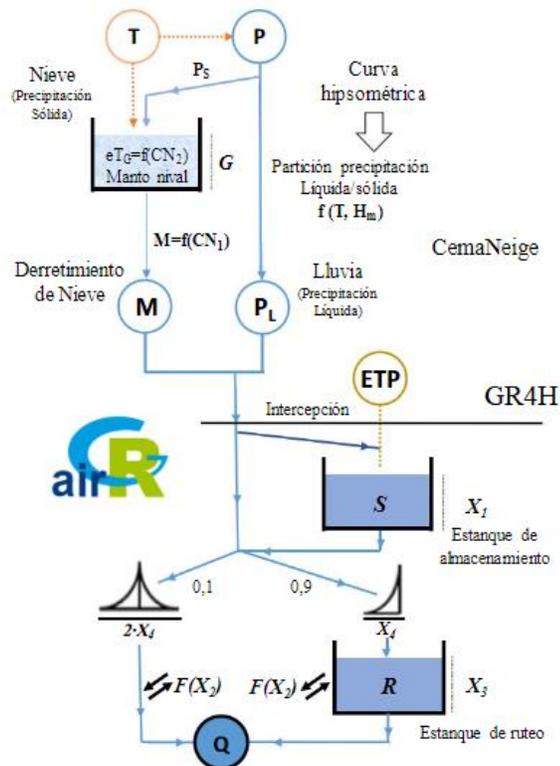


Figura 2-1: Esquema modelo conceptual acoplado GR4H y CemaNeige, Fuente: Adaptado de Muñoz-Castro y Mendoza (2021).

3 Zona de Estudio

La zona de estudio se delimitó a partir de la división político-administrativa de la comuna donde se localiza la cuenca, que corresponde a la comuna de Punta Arenas, capital regional, ubicada dentro de la provincia de Magallanes, Región de Magallanes y Antártica Chilena, Chile. A continuación, se presenta una caracterización general de la cuenca, los antecedentes de eventos hidrológicos extremos ocurridos en la zona y finalmente los datos hidrometeorológicos disponibles.

3.1 Caracterización de la cuenca del río de Las Minas

La cuenca del río de Las Minas se ubica en la Región de Magallanes y Antártica Chile, región más austral del territorio chileno (Figura 3-1). Esta posee una extensión de 61,1 km², tiene una pendiente media de 12.9% y su rango de elevación va desde 0 m.s.n.m. hasta los 626 m.s.n.m. Su cauce principal, el río de Las Minas, tiene una longitud aproximada de 19,1 km. Este, sigue su curso de oriente a poniente, atravesando la ciudad de Punta Arenas y desembocando en el Estrecho de Magallanes (Figura 3-1).

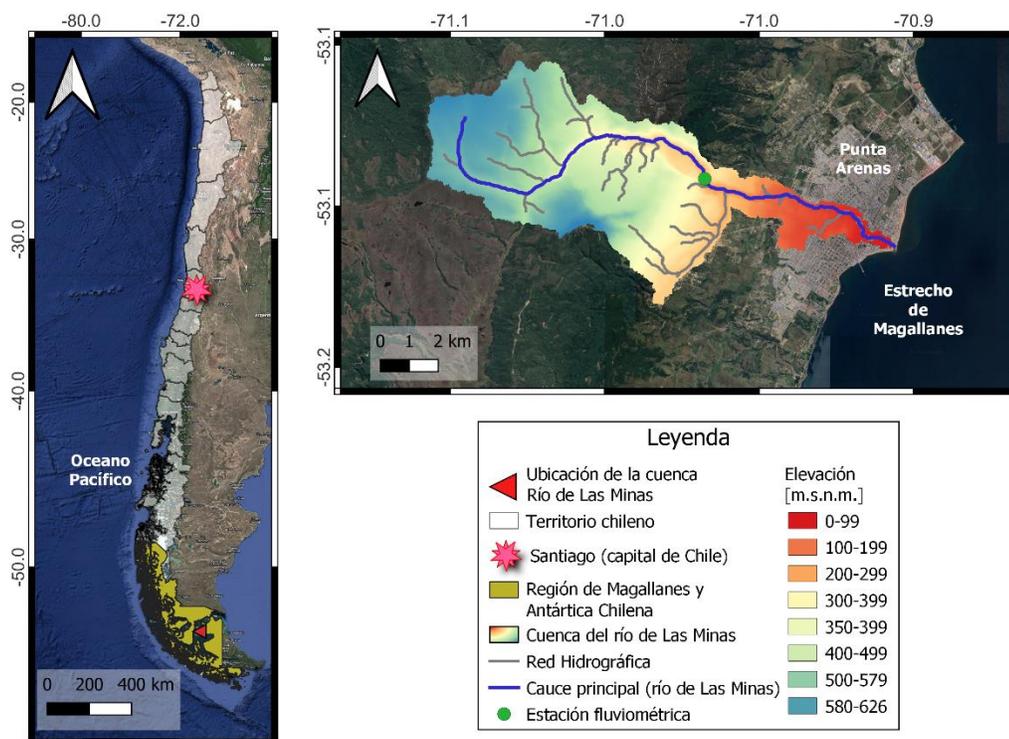


Figura 3-1: Ubicación de la cuenca del río de Las Minas y su distribución de alturas.

La zona donde se ubica la cuenca presenta un clima del tipo estepárico frío (Luebert et al, 2008), caracterizado por una precipitación anual promedio de 537 mm. La que se presenta preferentemente de forma sólida durante los meses correspondientes al periodo de invierno y de forma líquida durante el resto del año (Gonzalez-Reyes A. et al, 2017). La temperatura media mensual promedio oscila entre los 2°C en invierno y los 11 °C en verano (Figura 3-2).

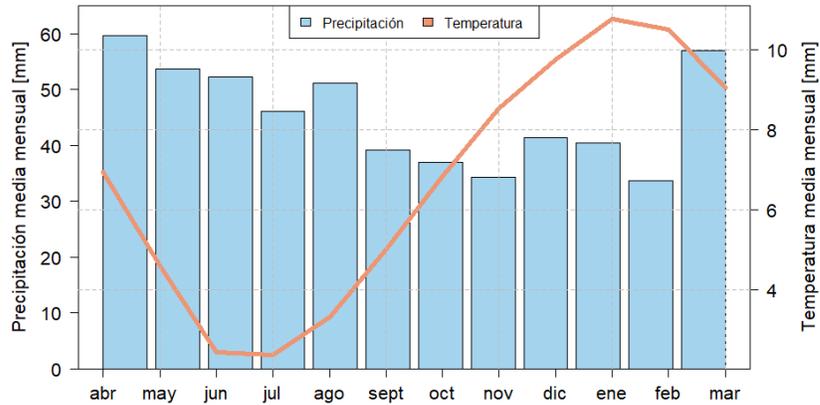


Figura 3-2: Climograma cuenca Río de las Minas periodo 1985-2015, construido a partir de los registros de precipitación y temperatura derivados de la estación PA-04.

A partir de los registros de la estación fluviométrica situada en la parte media del río de Las Minas (BNA12856001-K), se observa que la cuenca presenta un régimen nivo-pluvial (Figura 3-3a), dado que presenta un aumento de la escorrentía mensual promedio durante los meses correspondientes al periodo de deshielo, el que, es mayor al que se observa durante los meses pluviales. Además, se estima que la escorrentía diaria promedio oscila entre los 0.02 mm/día a los 5 mm/día la mayor parte del tiempo (Figura 3-3b).

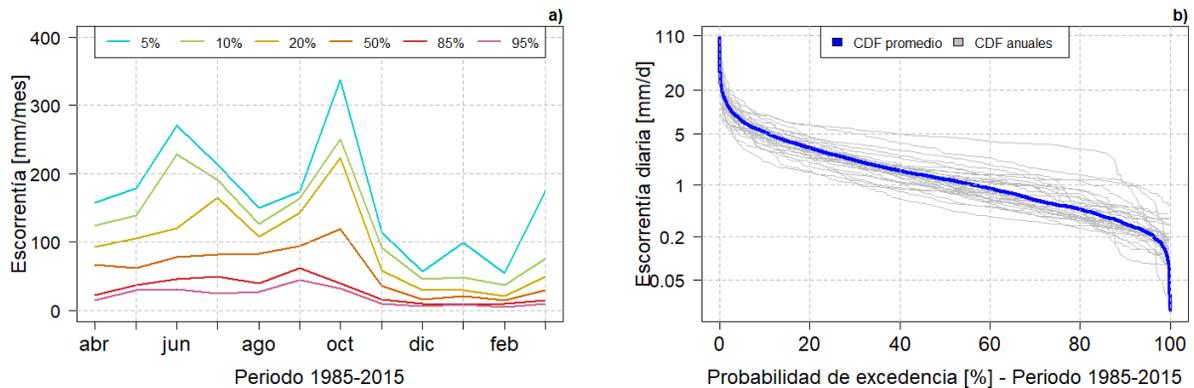


Figura 3-3: a) Curvas de variación estacional; b) Curvas de duración promedio (azul) y anuales (gris) periodo 1985-2015.

3.2 Antecedentes de eventos hidrometeorológicos extremos

Según el registro histórico disponible del siglo XX, el río de las Minas evidencia más de 21 desbordes. Sin embargo, solo se puede constatar la ocurrencia de 10 de ellos, [a partir de los testimonios recopilados en el informe UMAG (2019), registros periodísticos de La Prensa Austral (2018), y de los informes de ONEMI (2001), Carrasco (2005) y ONEMI (2012). Por otro lado, Actas de Sesiones Municipales entre los años 1905-1961 dan cuenta de otros desbordes no declarados y además corroboran los identificados (SERNAGEOMIN, 2020).

El factor desencadenante común de todos los desbordes registrados son las lluvias intensas (Tabla 3-1). Estas en general, se presentan concentradas en un periodo en torno a 2 días aproximadamente (Muñoz et al,2020) y en algunos casos acompañadas de deshielos abruptos y remociones de masa. Por su parte, las consecuencias más comunes identificadas por los desbordes son la depositación de lodo, daños en infraestructuras e inundación y destrucción de barrios residenciales ubicados en las cercanías del río (Figura 3-4).

Por lo anterior y sumado a las operaciones de emergencia que se desarrollan en cada uno de estos eventos, las pérdidas económicas hasta el día de hoy se estiman en 30 mil millones de pesos chilenos. Y, aunque si bien no se han encontrado víctimas fatales debido a estos eventos, según UMAG (2017), la interrupción de la conectividad urbana y consecuente aislamiento de los vecinos de edad avanzada, con posterioridad al evento de 2012, generó que aquellos vecinos se enfermaran y fallecieran.

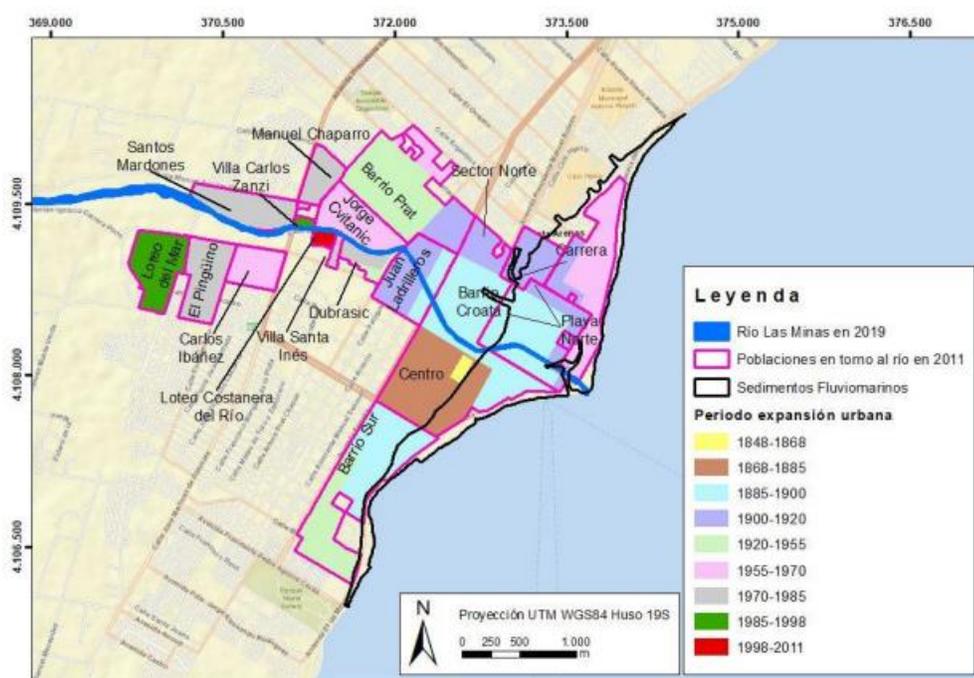


Figura 3-4: Poblaciones y expansión urbana entorno al río de Las Minas. Fuente: Muñoz et al, 2020.

Tabla 3-1: Catastro de desbordes del río de Las Minas, Fuente: Adaptada de Muñoz et al, 2020.

Fecha	Factores desencadenantes	Daños a infraestructuras hidráulicas	Daños en infraestructura urbana y sociales	Costo estimado*
5 y 6 de marzo 1941	Lluvia intensa	-Redes de agua potable, desagües -Puentes	-Inundación de barrios <i>Croata</i> y <i>Playa Norte</i>	80MM CPL
5 y 6 de abril 1945	Lluvia intensa	- Cañerías de captación y filtros - Puentes	-Inundación de barrio <i>Croata</i> , <i>Prat</i> y <i>Centro</i>	-
31 de May y	Lluvia intentas y	- Rotura de defensas fluviales	-0.3m de espesor del lodo en la ciudad	255MM CPL

01 Jun 1949	Deshielo abrupto	- Puentes		
02 de Oct de 1950	Lluvia intensa + remoción de masa	-Embankamiento en bocatoma de agua potable. -Destrucción de defensas fluviales	-Inundación de barrios Croata, Centro y Playa Norte. -Depositación de lodo en calles del Centro histórico.	-
06 y 07 de Ene 1956(*)	Lluvia intensa	Junto a otros 3 desbordes ocurridos ese año destruyeron - Puentes - Obras de agua potable	-Arrastre de viviendas en población <i>Dubrasic</i> . -Inundación barrio <i>Prat, Croata, Centro</i> y Población <i>Juan Ladrilleros</i> . -140 cuadras inundadas con un espesor de 0.5 m de lodo, casi 25.000 m ³ de material extraído.	2.000M CPL + 670M CPL estimado para los otros 3 desbordes
24 y 25 de Nov 1957	Lluvia intensa	-Destrucción defensas fluviales	-Inundación de población Juan Ladrilleros y barrios Croata, Centro y Playa Norte	30M CPL
28 de Sept 1967	Lluvia intensa	-	-Destrozos en 60 manzanas de viviendas	-
1990-May-09 y 10	Lluvia intensa	-	-Viviendas deslizadas por el río del loteo <i>Aylwin</i> . -Inundación de barrios <i>Croata, Centro</i> y <i>Playa Norte</i> -300 viviendas dañadas -2433 damnificados	10.118M CPL
2012-Mar-11 y 12	Lluvia intensa 80mm-120mm	-Erosión de costanera	-4000 afectados -56 damnificados -93 viviendas con daños mayores y 410 con daños menores. -Inundación de barrios <i>Croata, Centro</i> y <i>Playa Norte</i>	17.000M CPL

*El costo estimado se calculó a partir del valor del dólar estadounidense el día 26 de mayo del 2022, actualizando el valor estimado por UMAG 2019. Dado que este último, lo estimo con relación al valor del dólar el día 23 de agosto del 2019.

Por otro lado, en relación con los eventos de sequía, un estudio publicado por Anales del Instituto de la Patagonia, indica que la precipitación anual acumulada en la ciudad de Punta Arenas registra una tendencia negativa en el periodo 1900-2014 (Figura 3-5). Tendencia que se refleja mayormente durante el periodo de primavera-verano, ya que, al contrario durante el periodo de otoño-invierno se observa un aumento de ella desde el año 1990. Finalmente, a partir de este estudio evidenciaron un aumento en la recurrencia de la “sequía severa”, la que fue determinada por precipitaciones anuales acumuladas bajo el percentil 15 de la serie de todo el periodo (Gonzalez-Reyes A. et al, 2017).

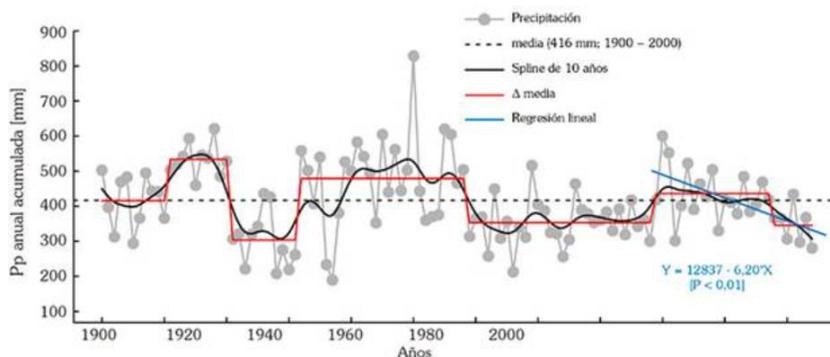


Figura 3-5: Precipitación anual acumulada entre los años 1900-2014.
Fuente: Gonzalez-Reyes A. et al, 2017.

3.3 Datos hidrometeorológicos

La zona de estudio cuenta con dos tipos de fuentes de información hidrometeorológica. Las estaciones de observación distribuidas en el área de interés y el producto climático desarrollado por el centro de la resiliencia del clima y la ciencia CR2, llamado CR2MET (disponible en www.cr2.cl). Los detalles y características de ambas fuentes se describen a continuación.

3.3.1 Estaciones de observación

En un radio de 20 kilómetros desde el centroide de la cuenca de estudio existen 10 estaciones de carácter hidrometeorológico (Figura 3-6), las cuales se encuentran distribuidas en toda el área de interés, con diversos periodos y densidad de información medida, y a distintas elevaciones (Tabla 3-2).

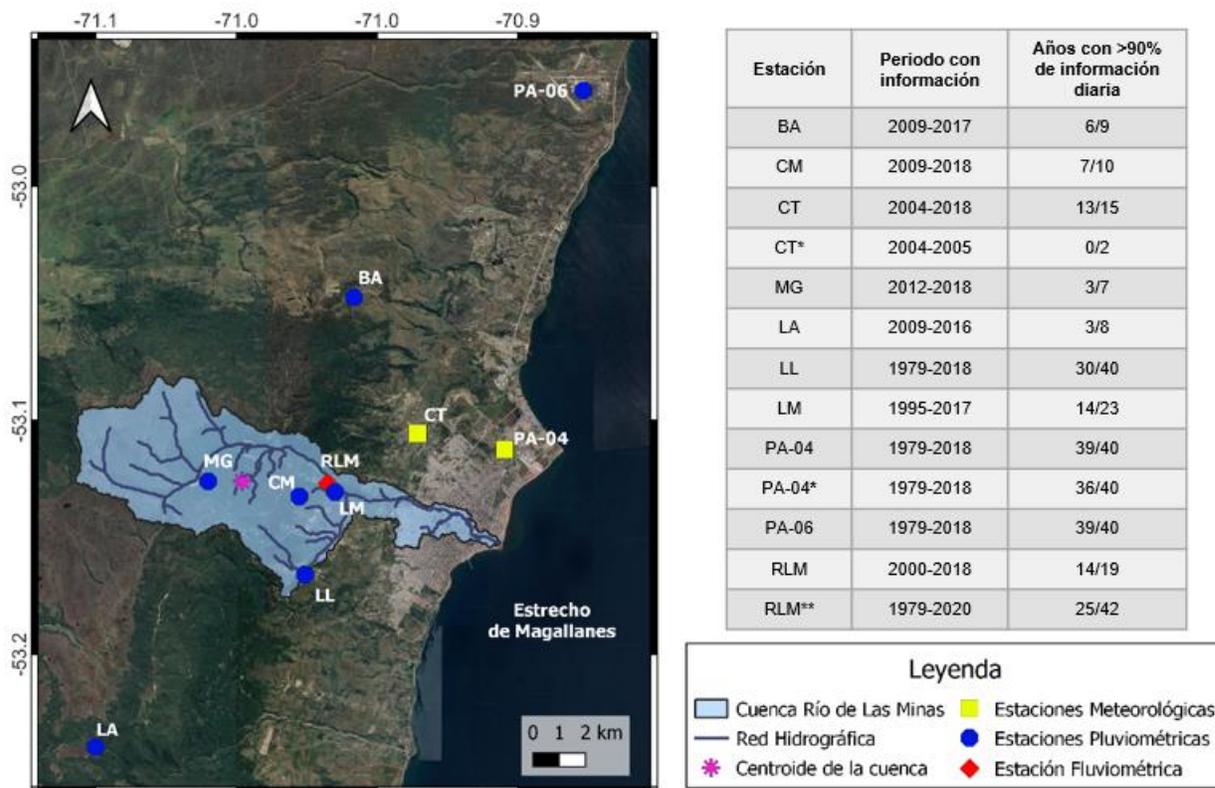


Figura 3-6: Ubicación estaciones hidrometeorológicas respecto a cuenca y densidad de información estaciones pluviométricas (* mide información meteorológica, ** mide información fluviométrica).

Tabla 3-2 Características de las estaciones hidrometeorológicas.

Código	Nombre	UTM [m]	E	UTM N [m]	Altitud [m.s.n.m.]	Abreviación
12587000-7	Bitsch Alto	367823		4117241	328	BA
12586006-0	Cerro Mirador	365051		4109610	580	CM
12586009-5	Canal de Trasvase Estero Llau Llau	370393		4112123	80	CT
12586005-2	Laguna Lynch	366252		4106644	140	LL
12586007-9	Las Minas	367306		4109810	155	LM
12585003-0	Leñadura Alto	358484		4099877	400	LA
12586010-9	Magdalena Giglio 2	362466		4110086	432	MG
12586004-4	Punta Arenas	373715		4111604	5	PA-04
520006	Punta Arenas	376621		4125863	36	PA-06
12586001-K	Rio Las Minas en BT. Sendos	367016		4110136	185	RLM

3.3.2 Producto grillado CR2MET

CR2MET es un producto basado en observaciones climáticas de Chile y en el reanálisis atmosférico ERA-5 ([ECMWF](#)). Este, otorga información de precipitación, temperatura máxima y mínima a

nivel temporal diario entre los años 1979-2020. Como lo indica su nombre, el producto se encuentra grillado en celdas rectangulares de 0.05° latitud-longitud para todo el territorio de chileno.

Su última versión CR2MET v2.0, se encuentra validada en gran parte del país, mostrando un desempeño satisfactorio respecto a los valores observados según la Dirección General de Aguas en la Actualización del Balance Hídrico Nacional (2017), por lo que también se considera una fuente confiable de información meteorológica disponible para este estudio.

4 Metodología

El trabajo desarrollado, se subdividió en 2 áreas. La implementación de los modelos hidrológicos y el análisis de los resultados de su implementación, concentrado en la evaluación de eventos hidrológicos extremos en el periodo histórico y en el futuro sujeto al cambio climático, el que no se describe en esta área. Sino que, se desarrolla a medida que analizan los resultados de la implementación del modelo.

Para la implementación de los modelos, se procesaron los datos del producto CR2Met v2.0 para el periodo 1980-2020 en pos de obtener las forzantes meteorológicas históricas. Junto a ello, se evaluó el desempeño del producto respecto a los registros locales de las estaciones de observación de la Dirección General de Aguas (DGA) y de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), y, además, se propuso una metodología de corrección para los valores de precipitación del producto. Luego, se calibraron y validaron los modelos GR4HCN y GR5HCN. Y, finalmente, se procesaron los valores de 4 GCM para obtener las forzantes meteorológicas futuras.

4.1 Implementación de los modelos

En primer lugar, se determinó implementar los modelos hidrológicos GR4H, GR5H y CemaNeige, en torno a la cuenca delimitada por Camels (Alvarez-Garreton et al, 2018) 12586001 - Río Las Minas En Bt. Sendos (Figura 4-1), debido a que esta se encuentra sin intervención antrópica, y controlada por la estación fluviométrica 12586001-K - Río de Las Minas Bt. Sendos, (Lat. -53,14, Lon-70.99, Alt.154 m.s.n.m.).

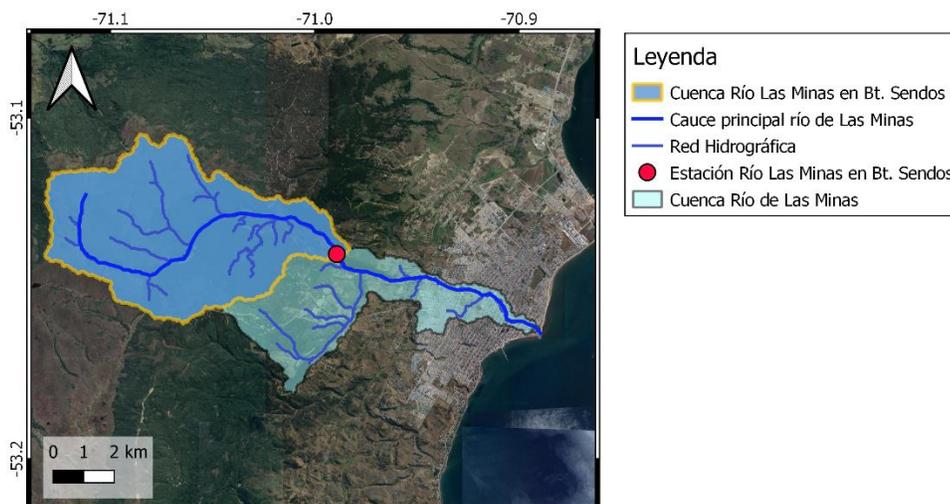


Figura 4-1: Delimitación de cuenca Río Las Minas en Bt. Sendos

En segundo lugar, para poder implementar el módulo acoplado CemaNeige, se calculó la curva hipsométrica de la cuenca, que fue caracterizada en el software GRASS (<https://grass.osgeo.org/>). Esta caracterización se desarrolló usando los modelos digitales de elevación (DEM), de la misión topográfica Shuttle Radar (<https://earthdata.nasa.gov/>) a una resolución espacial de 30x30 metros.

Luego, para la obtención de las forzantes meteorológicas históricas. Se desagregan los valores diarios del producto CR2Metv2.0 a valores horarios, usando la distribución horaria del reanálisis atmosférico ERA5, a una resolución espacial de grilla. Posteriormente, se agregaron a nivel cuenca, de manera tal de obtener una sola serie temporal, espacialmente concentrada, de precipitación y otra de temperatura, representativas de la cuenca para el periodo histórico definido entre los años 1980 y 2020. Finalmente, con serie la temporal de temperatura, se obtiene la evapotranspiración horaria usando el enfoque de Oudin (Oudin, et al, 2005), que viene implementada en el mismo paquete airGR.

En paralelo a lo anterior, se desarrolló una evaluación de desempeño del producto CR2Met frente a los valores medidos por estaciones de observación de la DGA y de la Dirección Meteorológica de Chile DMC (subsección 4.1.1 y 4.1.4). Además, se propuso una metodología de corrección para los valores de precipitación del producto CR2Met, a nivel espacial de grilla y otra a escala de cuenca (subsección 4.1.2 y 4.1.3).

Posteriormente, se calibraron y validaron los modelos hidrológicos para ser implementados en el periodo histórico (subsección 4.1.5 y 4.1.6).

Finalmente, para poder implementar los modelos en el periodo proyectado, se procesaron los valores de 4 GCM, para obtener las forzantes meteorológicas futuras (4.1.7).

4.1.1 Evaluación de desempeño del producto CR2Met para valores de precipitación

Debido a la diversidad y discontinuidad de periodos en que las estaciones meteorológicas contaban con valores medidos de precipitación, sobre todo las que se localizaban dentro de la cuenca en estudio. Se determinó usar como fuente de información para las forzantes de precipitación y temperatura, el producto grillado CR2Metv2.0. Sin embargo, y previo a su uso, se desarrolló una evaluación del desempeño del producto para los valores de precipitación frente a los valores medidos de estaciones de observación DGA y DMC.

A continuación, se describe la evaluación del producto CR2Met para los valores de precipitación. Evaluación que se desarrolló a partir de un análisis discreto y otro continuo a nivel diario de punto a pixel, es decir, comparando la medición de una estación meteorológica con el valor correspondiente al de la grilla del producto en la que se ubica la misma. Lo anterior bajo el supuesto de que las mediciones hechas por una estación son representativas de su respectiva celda.

4.1.1.1 Análisis discreto de valores de precipitación

El análisis discreto se realizó a partir de tablas de contingencia (WMO,2000). Estas, se definen a través de “eventos”, y evalúan un producto o modelo con respecto a datos observados. De ellas se pueden calcular índices categóricos que indican el rendimiento del modelo respecto lo observado.

En la figura 4-2, se observa un ejemplo de tabla de contingencia determinada para cierto “evento”. Las letras A y D indica los “aciertos”, es decir, ocurre el evento y el producto logra evidenciarlo o, por el contrario, el evento no ocurre y el producto indica lo mismo. Por su parte, B y C indican las “fallas”, es decir, las veces que no ocurre el evento y el producto evidencia que si o, en caso

contrario, ocurre el evento, pero el producto no lo detecta. Con esta información se calculan 4 índices categóricos: probabilidad de detección (POD); sesgo de frecuencia (fBIAS); tasa de falsa alarmas (FAR); índice de existo crítico (CSI) (Baez-Villanueva et al, 2020). El cálculo de cada uno se detalla en las ecuaciones 5,6,7 y 8.

		Observado	
		Si	No
Valor CR2MET	Si	<i>A</i>	<i>B</i>
	No	<i>C</i>	<i>D</i>

Figura 4-2: Ejemplo de tabla de contingencia para cierto evento.

$$POD = \frac{A}{A + C} \quad (5)$$

$$fbias = \frac{A + B}{A + C} \quad (6)$$

$$FAR = \frac{B}{A + B} \quad (7)$$

$$CSI = [(POD)^{-1} + (1 - FAR)^{-1} - 1]^{-1} \quad (8)$$

Para este análisis, se tomaron las 10 estaciones detalladas en sección 3.3.1, con la cantidad de datos disponibles entre los años 1979-2018. Los eventos escogidos se basaron en la clasificación de eventos de precipitación en Chile, en función de la intensidad diaria según Zambrano-Bigiarini et al. (2017) (Tabla 4-1). Por tanto, se calcularon los 4 índices descritos previamente para cada evento.

Donde el POD calculo la frecuencia con la que el producto estimo correctamente la intensidad de precipitación observada en el pluviómetro. El fBIAS calculo si el producto subestima o sobrestima, en este caso la intensidad de precipitación de cada evento. El FAR midió la fracción de eventos que no fueron correctamente identificados por el producto. Finalmente, el CSI combino POD y FAR para describir la capacidad general del producto en el evento evaluado. Los valores óptimos para cada índice se indica en la tabla 4-2.

Tabla 4-1: Eventos de precipitación según su intensidad.

Evento de Precipitación	Intensidad [mm/d]
------------------------------------	--------------------------

Sin Lluvia	[1,0)
Lluvia ligera	[1,5)
Lluvia moderada	[5,20)
Lluvia pesada	[20,40)
Lluvia violenta	≥ 40

Tabla 4-2: Valores óptimos de los índices categóricos.

Índice	Valor óptimo
POD	1
fBIAS	1 <1 subestima >1 sobrestima
FAR	0
CSI	1

4.1.1.2 Análisis continuo de valores de precipitación

Para entender el comportamiento inter-anual que presentaba el producto CR2Met, se realizó en paralelo un análisis continuo usando 3 métricas estadísticas a estudiar. El coeficiente de determinación (R^2) para establecer la relación lineal entre el producto y las mediciones (ecuación 9) (Krause et al., 2005), la raíz del error medio cuadrático (RMSE) para medir la diferencia promedio entre las variables (ecuación 10) (van Werkhoven et al., 2009), y el sesgo estadístico (BIAS) para estimar el porcentaje de subestimación o sobrestimación entre las variables (ecuación 11) (Sorooshian et al, 1993).

Mientras que para el coeficiente de determinación se considera óptimo el valor 1, para RMSE y BIAS se considera el valor 0. En particular, este último indica sobrestimación de parte del producto cuando el valor es mayor a 0 y subestimación por parte del producto cuando este valor es menor a 0.

$$R^2 = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (P_{Obs_n} - P_{CR2_n})^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (P_{Obs_n} - \bar{P}_{Obs})^2} \quad (9)$$

$$BIAS = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (P_{CR2_n} - P_{Obs_n})^2}{\sum_{n=1}^N P_{Obs_n}} * 100 \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (P_{CR2_n} - P_{Obs_n})^2} \quad (11)$$

Debido a la discontinuidad y poca información de algunas estaciones, para este análisis se decidió tomar tan solo 5 de las 10 estaciones disponibles, *Laguna Lynch* (LL), *Las Minas* (LM), *Rio de Las Minas en Bt. Sendos* (RLM), *Punta Arenas 4* (PA-04) y *Punta Arenas 6* (PA-06). Las estaciones LL, LM y RLM fueron escogidas debido a su densidad de datos con respecto a los periodos de medición que consideran y a que se encuentran ubicadas dentro de la cuenca en estudio como se observa en la figura 3-5. En tanto PA-04 y PA-06 se escogieron debido a que cuentan con toda la data a nivel diario entre los años 1979 y 2020.

Por otro lado, y debido a que las estaciones LL, LM y RLM eran de gran relevancia, pero a su vez, contaban con información discontinua en el periodo a evaluar. Las métricas estadísticas fueron aplicadas en 3 subperiodos (Tabla 4-3), seleccionados por el criterio de contar con un 95% de los valores diarios en años continuos, es decir, que la estación contara con un mínimo de 347 valores al año por al menos tres años seguidos.

Tabla 4-3: Subperiodos de análisis continuo.

1981- 1983	1999- 2001	2014- 2016
LL	LM	LL
PA-04	PA-04	PA-04
PA-06	PA-06	PA-06
-	-	RLM

4.1.2 Propuesta metodológica para estimación de factores de corrección del producto CR2Met

Debido a que este estudio busca evaluar eventos extremos, resulta necesario que las forzantes de precipitación representen de buena manera las intensidades de precipitaciones extremas. En este sentido, se desarrolló una propuesta para ajustar las estimaciones del producto CR2Met a los registros locales in-situ de precipitación. Propuesta que se basó en la suma simple de un delta de corrección específico a nivel diario.

Esta propuesta calcula deltas de corrección diarios (Δ_{cd}) a través de un modelo de regresión lineal simple (ecuación 12). Este modelo se obtiene a partir de la correlación entre registros diarios de una estación pluviométrica, y la diferencia absoluta entre estos y los valores estimados por el producto en la cuadrícula que delimita la zona donde se ubica dicha estación.

$$\Delta_{cd} = m * P_{Ed} + n \quad (12)$$

Donde P_{Ed} representa la precipitación medida por una estación para el día d en mm. Por su parte m y n son los coeficientes del modelo.

Así, se obtiene un delta de corrección para cada día del periodo evaluado. Luego, se aplican a partir de la suma simple al valor estimado por el producto. Sin embargo, esta suma se condiciona respecto a su coherencia y a los valores registrados in-situ, como se muestra a continuación en la ecuación 13.

$$P_{Cd} = \begin{cases} 0, & P_{Ed} = 0 \\ 0, & P_{Sd} + \Delta_{Cd} < 0 \\ P_{Sd} + \Delta_{Cd}, & P_{Sd} + \Delta_{Cd} > 0 \end{cases} \quad (13)$$

Donde P_{Sd} representa la precipitación del día d sin corregir de la grilla en mm y P_{Cd} la precipitación del día d corregida en milímetros.

4.1.3 Propuesta metodológica para aplicar la corrección de forzantes de precipitación del producto CR2MET concentrado a escala de cuenca

Dado que la propuesta metodológica descrita en la subsección anterior corresponde a la determinación de factores de corrección a nivel puntual o de grilla, resulta necesario definir una estrategia que permita traducir lo anterior a nivel espacial de cuenca. Por tanto, se propone tomar un supuesto de “error igualitario” por parte del producto. Es decir, que el delta de corrección obtenido para un día d en una estación localizada dentro del área de la cuenca, debe ser el mismo para cada grilla que la compone ese mismo día, por lo tanto, es aplicable a su serie representativa.

En adición a lo anterior, se propone que, en el caso de necesitar corregir un periodo más extenso al disponible en una estación localizada dentro de la cuenca. Se sugiere complementar con otra estación que, si disponga de los años faltantes, pero que, a su vez, se encuentre dentro de la cuenca. Ahora, para los años en que no se cuente con ninguna estación dentro del área, que disponga de los datos, se propone usar alguna estación cercana a la zona de interés con buena correlación. De no existir buena correlación, o una subestimación o sobrestimación de los datos considerable, entonces considerarla como error de arrastre.

Así, al igual que para propuesta a nivel puntual. Los deltas calculados para cada día del periodo se aplican a partir de la suma, condicionados de igual manera como se detalla a continuación en la ecuación 14.

$$P_{Csd} = \begin{cases} 0, & P_{EVd} = 0 \\ 0, & P_{SSd} + \Delta_{CEVd} < 0 \\ P_{SSd} + \Delta_{CEVd}, & P_{SSd} + \Delta_{CEVd} > 0 \end{cases} \quad (14)$$

Donde P_{SSd} representa la precipitación del día d a nivel cuenca sin corregir, Δ_{CEVd} el delta de corrección del día d obtenido a partir del de modelo generado entre una estación ubicada dentro de la cuenca y su respectiva grilla, y P_{Csd} la precipitación del día d a nivel cuenca corregida

4.1.4 Evaluación del desempeño del producto de temperatura CR2Met v2.0

Para el caso de los valores de temperatura, debido a que solo se contaba con información medida de la estación *Punta Arenas 4* (PA-04) durante el periodo 1979-2018. Se decidió comparar los

valores obtenidos del producto a escala de cuenca con los valores medidos por la estación. Sin embargo, estos últimos interpolados a la altura del centroide de la cuenca a partir de un gradiente adiabático, que consideraba una disminución de 6.5°C/km de diferencia de altitud (ecuación 15).

$$T_i = T_e - 0.65 * d \quad (15)$$

Donde T_i representa la temperatura medida interpolada a la altura del centroide de la cuenca en grados, T_e temperatura medida por la estación en grados y d la distancia en m.s.n.m. entre el centroide y la estación.

Finalmente, para validar el producto se usaron las mismas métricas que para el análisis continuo de precipitación, es decir R^2 , RMSE y BIAS.

4.1.5 Definición de periodos Calibración y Validación

Los periodos de calibración y validación se definieron con respecto a la cantidad de datos medidos en cada año por la estación RLM (Figura 3-6) y las anomalías observadas de escorrentía, precipitación y temperatura respecto a su promedio anual, es decir respecto al promedio de acumulación anual durante el periodo histórico para precipitación y escorrentía, y al promedio de temperatura media anual para el caso de la temperatura (Figuras 4-3 y 4-4), de tal forma que el periodo de calibración contenga un subperiodo seco y otro húmedo. Lo anterior, a modo de calibrar un conjunto parámetros capaz de representar la respuesta hidrológica asociada diferentes condiciones climáticas.

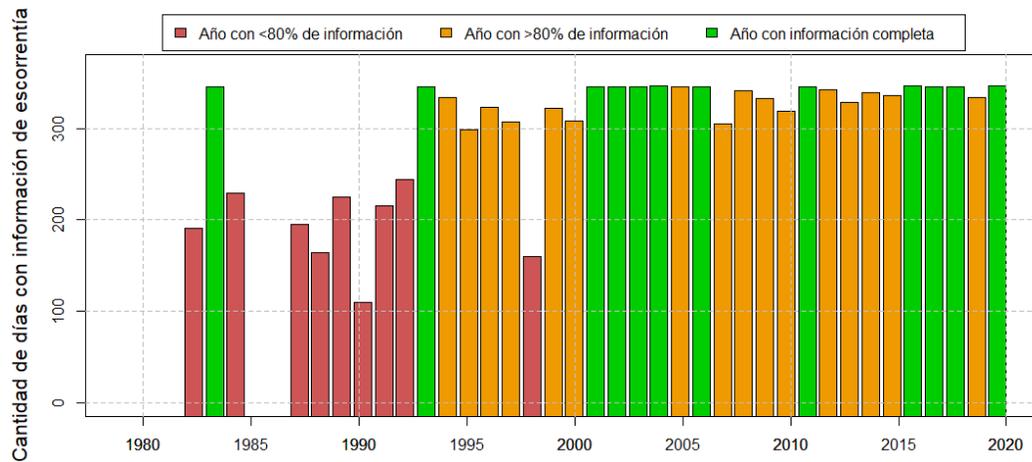


Figura 4-3: Cantidad de días con información observada en los años del periodo histórico.

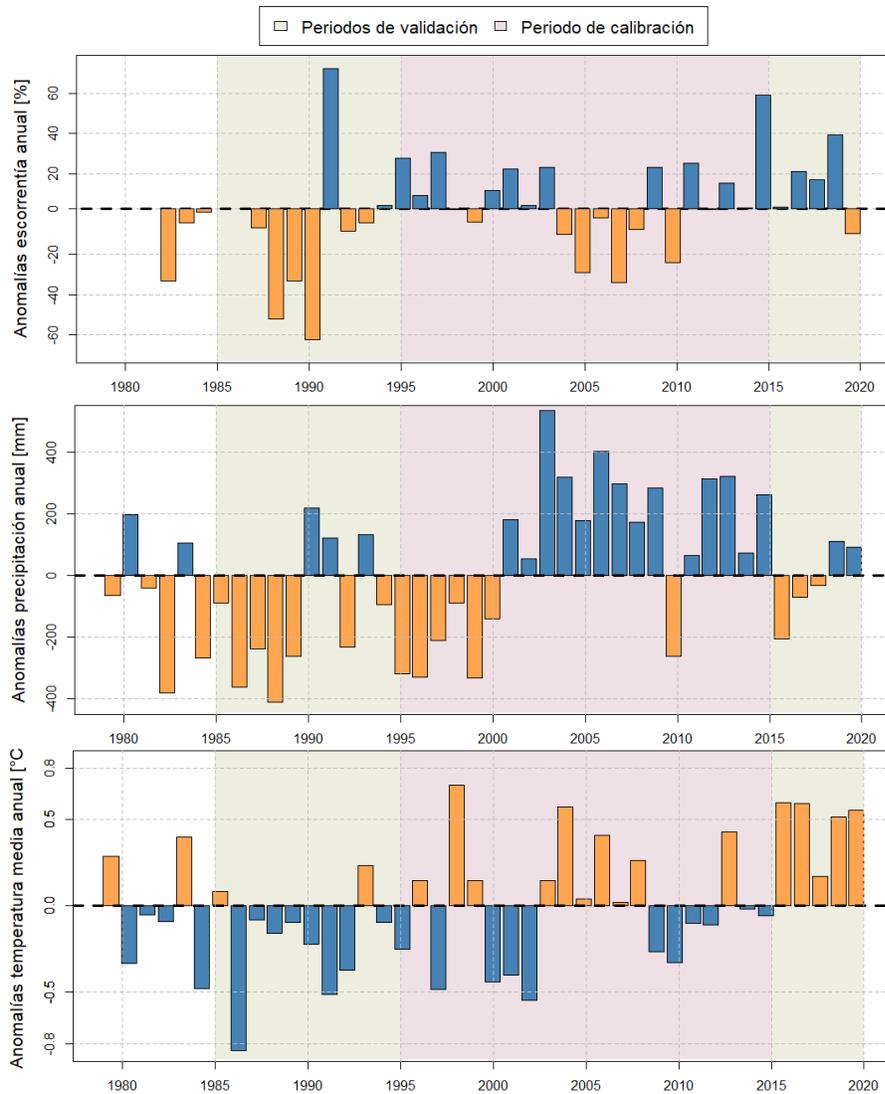


Figura 4-4: Anomalías observadas en el periodo histórico 1980-2020 para definir periodos de calibración y validación.

Finalmente, se determinó como periodo de calibración, el comprendido entre los años hidrológicos 1995 y 2015, y para validación los periodos entre los años hidrológicos 1985-1995 y 2015-2020.

4.1.6 Calibración y Validación

Para calibrar los parámetros de los modelos, se determinó usar el algoritmo de calibración Dynamically Dimensioned Search (DDS; Tolson & Shoemaker, 2007). Este es un algoritmo de búsqueda global, diseñado para problemas de calibración con varios parámetros. Dentro de sus ventajas, se encuentra el hecho de permitir al usuario determinar la cantidad de evaluaciones a desarrollar, dado que posibilita gestionar el costo computacional que requiere la calibración. A su vez, esta característica entrega la posibilidad de desarrollar el proceso de forma iterativa, tomando el mejor set de parámetros obtenido en cada iteración y realizar un posterior análisis de su desempeño. Además, al igual que los modelos GR, DDS esta implementado en R, dentro del paquete DWBmodelUN, lo que facilita su manipulación y acople a los modelos hidrológicos.

Su aplicación se hizo con un budget de 1000 iteraciones, usando los límites para cada parámetro definidos por Muñoz-Castro y Mendoza (2021). Y, aplicando la función objetivo KGE (Gupta et al, 2009), para evaluar la escorrentía simulada y observada a nivel diario. Finalmente, a modo de asegurar la representación de la curva de variación estacional promedio de la escorrentía, se realizó un proceso de calibración iterativo, ajustando la magnitud de la precipitación mensual. Este proceso se detalla en el ANEXO B.

Por otro lado, para evaluar el desempeño de los modelos respecto de la escorrentía observada por la estación RLM, se analizó el hidrograma a partir de 4 métricas estadísticas BIAS (ecuación XX), KGE, NSE (Nash and Sutcliffe, 1970), e iNSE (ecuación) (Pushpalatha et al, 2012), la curva de duración de escorrentía, a través de las métricas se sesgo %BiasFMS, %BiasFHV y %BiasFLV propuestas por Yilmaz et al. (2018), y la curva de variación estación a partir del RMSE (ecuación 11) y R^2 (ecuación 9).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (15)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_S}{\sigma_O} - 1\right)^2 + \left(\frac{\bar{S}}{\bar{O}} - 1\right)^2} \quad (15)$$

$$iNSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{S_i + \varepsilon} - \frac{1}{O_i + \varepsilon}\right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{O_i + \varepsilon} - \frac{1}{\bar{O} + \varepsilon}\right)^2} \quad (15)$$

Donde:

- S_i : Valor simulado en el tiempo $t = i$.
- O_i : Valor observado en el tiempo $t = i$.
- \bar{O} : Valor observado promedio entre los N valores comprendidos en el periodo de interés.
- \bar{S} : Valor simulado promedio entre los N valores comprendidos en el periodo de interés.
- σ_O : Desviación estándar de los valores observados.
- σ_S : Desviación estándar de los valores simulados.
- ε : 1% del caudal medio observado.

4.1.7 Forzantes Proyectadas

Para aplicar los modelos hidrológicos en el periodo 2020-2100, se usaron los resultados de precipitación y temperatura máxima y mínima de los GCM CCSM4, CSIRO-MK3.6-0, IPSL-CMA5-LR y MIROC-ESM. Sin embargo, estos debieron ser procesados previos a su aplicación, ya que, i) se encuentran a una resolución espacial gruesa, ii) contienen sesgos significativos, y iii) se encuentran a resolución temporal diaria, por lo deben ser desagregados a nivel horario. A continuación, se detalla el paso a paso realizado para procesar estos datos de cada GCM.

Paso 1: Escalamiento estadístico

Se genera un escalamiento estadístico entre las grillas del GCM y las de CR2MET, a partir de una interpolación bilineal. Así, se adquieren los resultados del modelo a una resolución espacial análoga a la de CR2Met.

Paso 2: Agregación espacial a escala de cuenca

Se agregan espacialmente a escala de cuenca las series de precipitación y temperaturas extremas diarias, derivadas de los cuatro GCM utilizados. De manera tal de obtener una sola serie temporal, espacialmente concentrada, de precipitación y otras 2 de temperatura, representativas de la cuenca para el periodo futuro.

Paso 3: Corrección de sesgo

Debido a que el escalamiento estadístico preserva sesgos, estos se corrigen a partir del método multivariate bias correction algorithm (MBCn, Cannon 2018). Usando las series de temperatura mínima, amplitud térmica y precipitación. Y, considerando dos periodos de corrección 2020-2060 y 2060-2100.

Paso 4: Desagregación a nivel horario

Con las series futuras corregidas, se desagregan las variables a un paso temporal horario. Esta desagregación se hizo a partir de la distribución horaria del periodo observado. Buscando para cada día del periodo futuro, un día “similar” en el periodo observado, y así distribuirlo de la misma forma.

Para encontrar el día “similar” de un día d en el futuro, se calcula la distancia euclidiana (ecuación XX) entre, las variables del día d futuro (precipitación, temperatura máxima y mínima), y las variables de todos los días correspondiente al mismo mes del día d, pero en el periodo histórico. Finalmente se desagrega el día d futuro respecto al día del periodo histórico observado que genera la distancia euclidiana mínima.

$$D_s = \sqrt{\left(\frac{(P_{df} - P_o)^2}{P_{df}} + \frac{(Tmax_{df} - Tmax_o)^2}{Tmax_{df}} + \frac{(Tmin_{df} - Tmin_o)^2}{Tmin_{df}}\right)} \quad (16)$$

Donde P_{df} es la precipitación del día d futuro, T_{maxdf} y T_{mindf} son las temperatura máximas y mínimas del día d futuro, mientras que, P_o, T_{maxo} y T_{mino} son las series del periodo histórico observado.

5 Resultados y Discusión

El siguiente acápite aborda los resultados asociados a los hitos más importantes estudiados, en este el presente estudio. En primer, lugar se presentan los resultados obtenidos por la evaluación de desempeño del producto del producto CR2MET para valores de precipitación. Los que vislumbran un rendimiento deficiente por parte del producto y debido a esto, se procede a su corrección por la metodología propuesta en la subsección 4.1.2.

Posterior a ello y debido a que se observan buenos resultados a partir de la corrección del producto, se evidencia el desempeño de la serie de precipitación corregida con la metodología propuesta en la subsección 4.1.3.

En tercer lugar, se muestran los resultados obtenidos a partir de la evaluación de desempeño del producto CR2MET para valores de temperatura. Los que desestiman la necesidad de corrección. Luego, se muestra los análisis enfocados, a la evaluación del desempeño del producto en los periodos de calibración y validación frente a la escorrentía medida por la estación RLM. De los que se concluye, la implementación de un solo modelo hidrológico.

Sumado al análisis del desempeño de los modelos. Se evalúa el desempeño del modelo escogido, con respecto a los valores máximos de escorrentía modelados frente a los observados a nivel histórico (1982-2020). Considerando la relevancia de su buena representación para posteriores análisis ligados a los eventos hidrológicos extremos.

En particular, la verificación de las forzantes obtenidas por los GCM, respecto de las observadas (Producto CR2MET), se detalla en ANEXO C.

Finalmente se muestran y discuten los resultados obtenidos para el análisis histórico y futuro.

5.1 Evaluación del desempeño del producto CR2MET para valores de precipitación y posterior corrección

A partir de los resultados obtenidos por la evaluación de desempeño del producto CR2Met para los valores de precipitación, se determinó corregirlo a partir de la metodología propuesta en el acápite 4.1.2. Es decir, la propuesta determinada a nivel espacial de grilla. Los resultados de dicha evaluación y posterior corrección se detallan a continuación.

5.1.1 Análisis discreto

En la figura 5-1 se observan los resultados del análisis discreto realizado a partir de las tablas de contingencia del producto CR2MET crudo. Del anterior, se concluye que el producto tiene un bajo rendimiento respecto a la caracterización de eventos muy intensos. Dado que, se observa que 3 de los 4 índices muestran un comportamiento generalizado, que tiende a empeorar con respecto al aumento de las intensidades de precipitación de los eventos, mostrando valores nulos de POD y CSI, para 8 de 10 estaciones analizadas. A su vez, el fBIAS, muestra un comportamiento favorable solamente para el evento “sin lluvia”, es decir no hay sobrestimación ni subestimación. Sin

embargo, para eventos caracterizados por intensidades de [5,20) milímetros en adelante, demuestran una subestimación promedio por parte del producto de un 60%.

En este sentido, y con la intención de probar validar la propuesta de corrección detallada en la subsección 4.1.2. Se corrigieron los valores de las 10 estaciones con el método propuesto. Luego se calcularon nuevamente los 4 índices categóricos (Figura 5-2).

El producto corregido, muestra una mejora sustancial del rendimiento general del producto. Aumentando en promedio un 50% el índice de capacidad de detección del producto (POD), para los 3 eventos más intensos ([5,20) mm/día, [20,40) mm/día y [40,) mm/día), mientras que para los eventos menos intensos demuestra un aumento promedio de un 10%. Por otra parte, tan solo dos estaciones muestran una sobrestimación mayor a un 40% (BA y MG), y a su vez, una subestimación máxima de un 36% en la estación BA. Finalmente, tanto el FAR como CSI, muestran una mejora del rendimiento de un 25%.

El detalle de los índices obtenidos para cada estación, evaluados con el producto crudo y corregido, se encuentra en el ANEXO A.

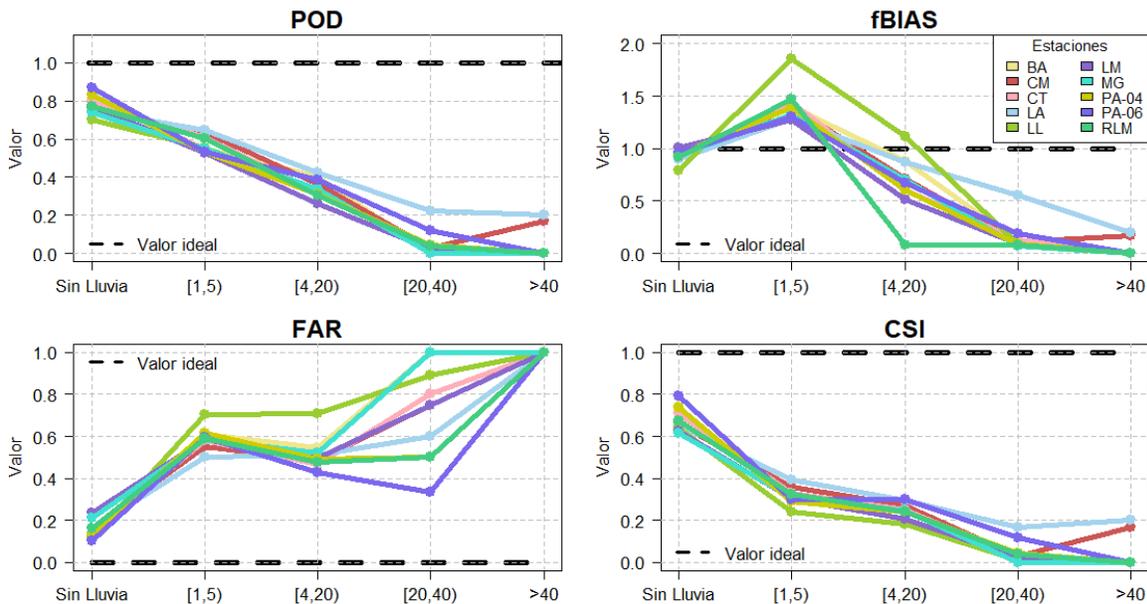


Figura 5-1: Resultados de los índices categóricos para la evaluación de los valores de precipitación del producto crudo CR2MET.

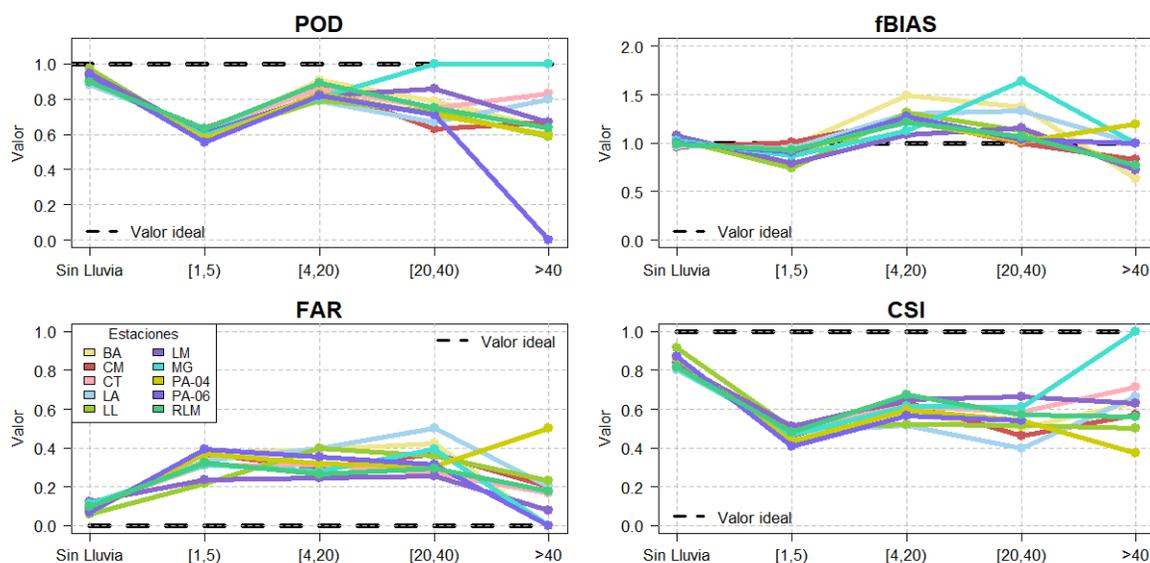


Figura 5-2: Resultados de los índices categóricos para la evaluación de los valores de precipitación del productor corregido CR2MET.

5.1.2 Análisis continuo de valores de precipitación

En relación con el análisis continuo, nuevamente se observa una subestimación por parte de todas las grillas analizadas en todos los subperiodos, como se observa en la columna 3 de las tablas 5-1, 5-2 y 5-3. Subestimación acentuada, en las estaciones ubicadas dentro de la cuenca. Luego, el RMSE en promedio para los tres periodos alcanza una diferencia de 2,7 mm. Y, finalmente, la relación lineal, solo supera un valor aceptable (0,5) en el periodo 1981-1983 para la estación PA-06.

Con los valores del producto corregido, si bien, se observa una sobrestimación de los valores del producto, esta es menor a promedio a la subestimación evidenciada con los valores del producto sin corregir. Por su lado, el RMSE disminuyó con la corrección en más de un 50%, promediando para todos los periodos una diferencia de 1.3 mm. Finalmente, la relación lineal mejora sustancialmente para todas las estaciones, mostrando un buen desempeño (Figuras 5-3, 5-4 y 5-5).

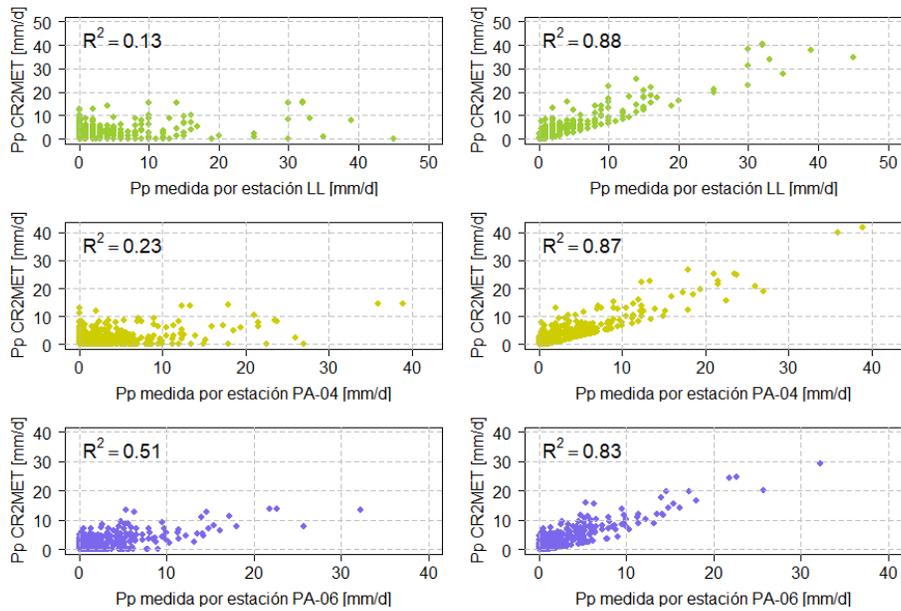


Figura 5-3: Correlación entre los valores de precipitación diarios del producto CR2MET y los valores medidos por una estación en el periodo 1981-1983, La columna izquierda muestra correlación con producto crudo, y la derecha con el producto corregido.

Tabla 5-1: Métricas estadísticas calculadas para el análisis continuo de valores de precipitación del producto CR2MET en el periodo 1981-1983. (SC = producto crudo y C = producto corregido)

Estación	RMSE [mm]		BIAS [%]	
	SC	C	SC	C
LL	3.98	1.52	-10.2	5.4
PA-04	3.15	1.39	-23.6	6.4
PA-06	1.91	1.23	-16.6	-10.7

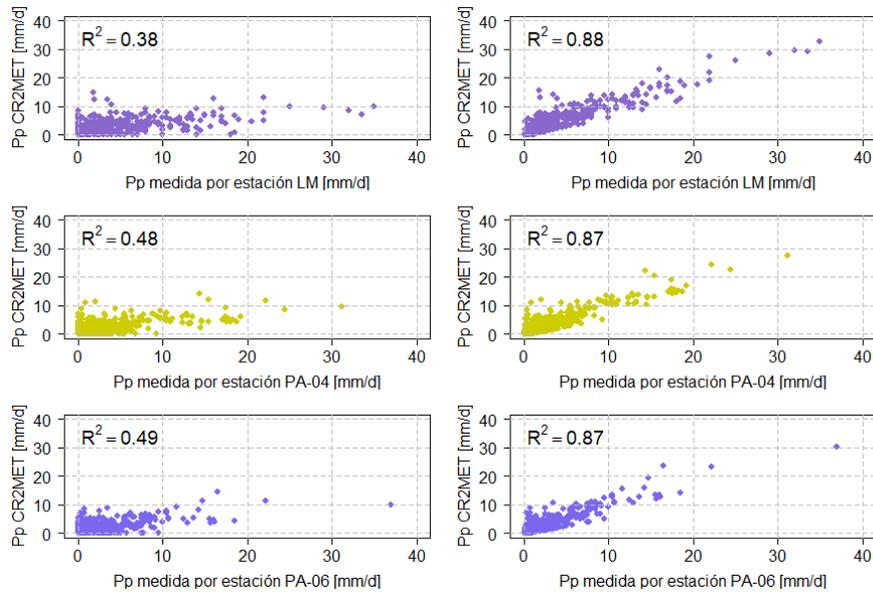


Figura 5-4: Correlación entre los valores de precipitación diarios del producto CR2MET y los valores medidos por una estación en el periodo 1999-2001, La columna izquierda muestra correlación con producto crudo, y la derecha con el producto corregido.

Tabla 5-2: Métricas estadísticas calculadas para el análisis continuo de valores de precipitación del producto CR2MET en el periodo 1999-2001. (SC = producto crudo y C = producto corregido)

Estación	RMSE [mm]		BIAS [%]	
	SC	C	SC	C
LM	3.21	1.43	-36.8	4.5
PA-04	2.27	1.19	-29.2	9.7
PA-06	1.93	1.08	-27.7	8.3

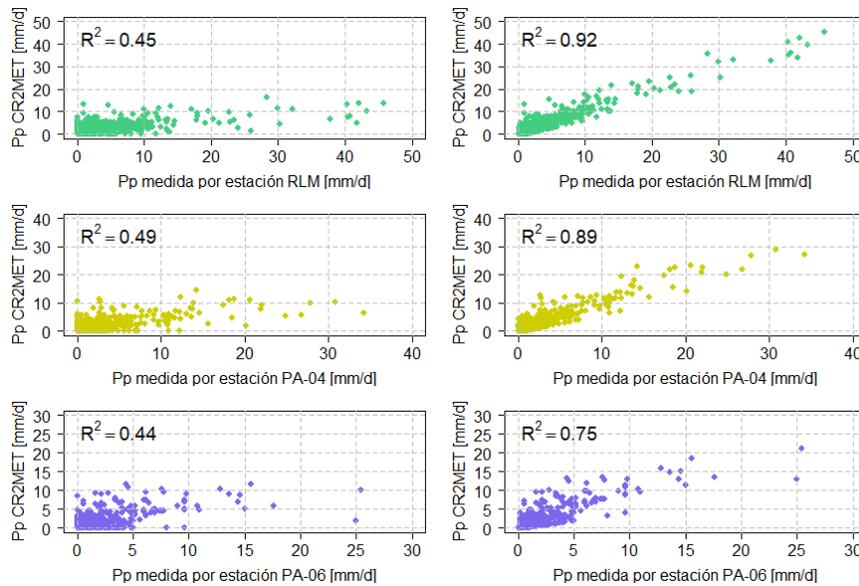


Figura 5-5: Correlación entre los valores de precipitación diarios del producto CR2MET y los valores medidos por una estación en el periodo 2014-2016, La columna izquierda muestra correlación con producto crudo, y la derecha con el producto corregido.

Tabla 5-3: Métricas estadísticas calculadas para el análisis continuo de valores de precipitación del producto CR2MET en el periodo 2014-2016. (SC = producto crudo y C = producto corregido)

Estación	RMSE [mm]		BIAS [%]	
	SC	C	SC	C
RLM	4.06	1.5	-35.9	10.7
PA-04	2.69	1.25	-29	10.7
PA-06	1.67	1.24	-4.7	17.9

Respecto a este acápite, el producto CR2Met presenta una subestimación generalizada, un bajo rendimiento respecto a la detección de eventos separados por intensidad, y en casi todas las estaciones una correlación lineal deficiente.

Por su parte, se evidencia que, la corrección del producto tiene un impacto directo en esta subestimación. Logrando incluso representar algunos eventos de precipitación violenta, definidos por una intensidad mayor a 40 mm/día. Y, aunque si bien se mantienen ciertos sesgos asociados a una sobrestimación y a diferencias de promedios. Se concluye que la propuesta metodológica resulta positiva y necesaria. Dado que mejora la representatividad de las precipitaciones extremas altas y a su vez mantiene la representatividad de las precipitaciones bajas.

5.2 Corrección a forzantes de precipitación

Finalmente, y en relación con los resultados previamente expuestos en el acápite 5.1. La serie de precipitación representativa de la cuenca, que será usada como forzante meteorológica histórica para la implementación de los modelos. Se corrige a partir del método propuesto en la sección 4.1.3.

Para realizar esta corrección, ya que no se disponía con una estación pluviométrica que contara con un registro continuo en todo el periodo necesario a corregir (1980-2020). Se generó una serie denominada “Medida por estación”, la cual se conformó por registros de 3 estaciones pluviométricas (LL, LM y RLM) en distintos años (Tabla5-6). Tomando en cuenta todas las restricciones impuestas por la metodología de corrección propuesta, y con el objetivo de completar el periodo a corregir.

Tabla 5-4: Detalle de los años en que se usaron los registros de las estaciones para corregir en la serie de precipitación representativa de la cuenca.

Estación	Años
LL	1980-2000;2010-2011; 2013-2016;2018-2019
LM	2003-2004;2007;2009
RLM	2001-2002;2005-2006; 2008;2012;2017;2020

Posterior a la corrección, se desarrolló una comparación del hidrograma de precipitación diaria entre la serie de precipitaciones representativa de la cuenca corregida y sin corregir, respecto a la serie “medida por estación”. Para esto, se calcularon las métricas RMSE, BIAS, NSE y KGE

Como se puede observar en la figura 5-2 inferior y en los resultados de la tabla 5-5, la corrección aplicada a las forzantes mejora sustancialmente la magnitud de los valores a nivel diarios. Disminuyendo en un más de un 50% el error cuadrático medio entre valores medidos y los obtenidos por el producto o modelados. Por su parte el índice de eficiencia indica un buen desempeño entre modelación/observaciones, ya que este es mayor a 0.8, al igual que el índice NSE, que a su vez nos indica una buena representación de los valores extremos superiores. Finalmente se obtiene una sobrestimación de un 10% por parte de las forzantes, el que debe estar influyendo en las precipitaciones medias de la serie, dado que al observar los “peaks” en la serie (Figura 5-6 inferior) se demuestra un buen ajuste.

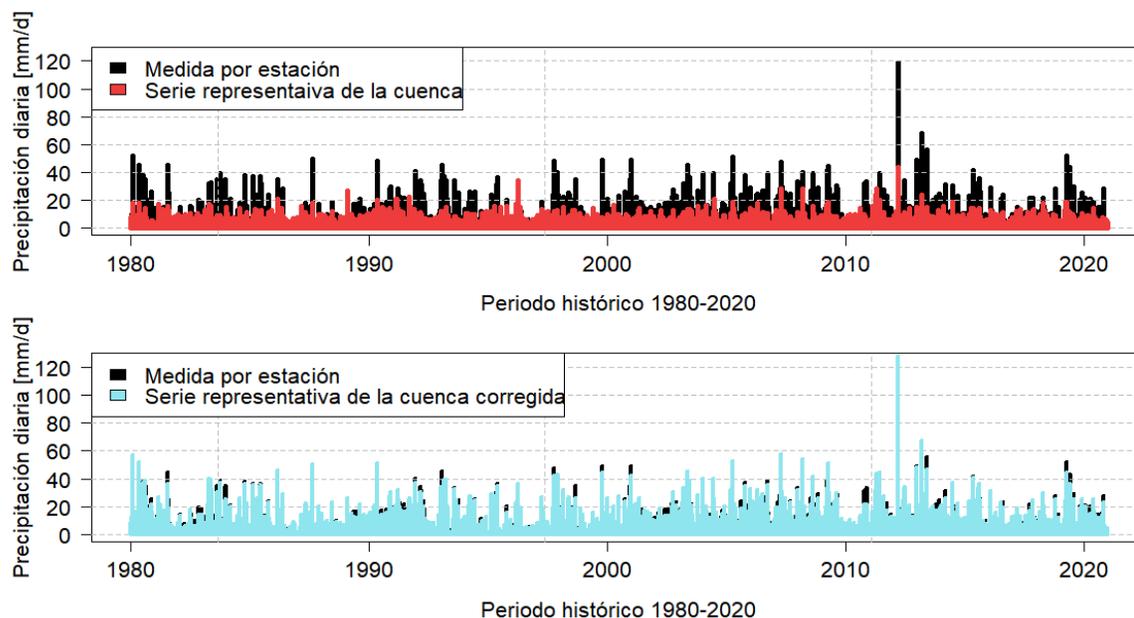


Figura 5-6: Hidrograma de precipitación diaria que compara la serie de precipitación representativa de la cuenca y a la serie medida por estación. Figura superior muestra la comparación con serie a nivel de cuenca sin corregir, y la figura inferior con la serie a nivel cuenca corregida.

Tabla 5-5: Resultados de las métricas analizadas entre la serie representativa de la cuenca y la medida por estación (SC = serie a nivel cuenca sin corregir y C = serie a nivel cuenca corregida).

Métrica	SC C	
RMSE [mm]	3.7	1.6
NSE	0.31	0.88
BIAS [%]	-18%	10%
KGE	0.36	0.88

5.3 Evaluación del desempeño del producto CR2MET para valores de temperatura

Los resultados del análisis continuo desarrollado entre los valores de temperatura de la serie a nivel cuenca, con respecto a los valores medidos por la estación PA-04 e interpolados al centroide de esta, se observan en la figura 5-7. En relación con ellos (figura 5-7), se observa que el porcentaje de subestimación es menor a un 10% y la correlación temporal es mayor a 0.8. Por su lado, la raíz

del error cuadrático medio indica solo 1°C de diferencia. Por tanto, se evalúa el desempeño de los valores de temperatura de CR2MET como aceptable y se determina no corregir.

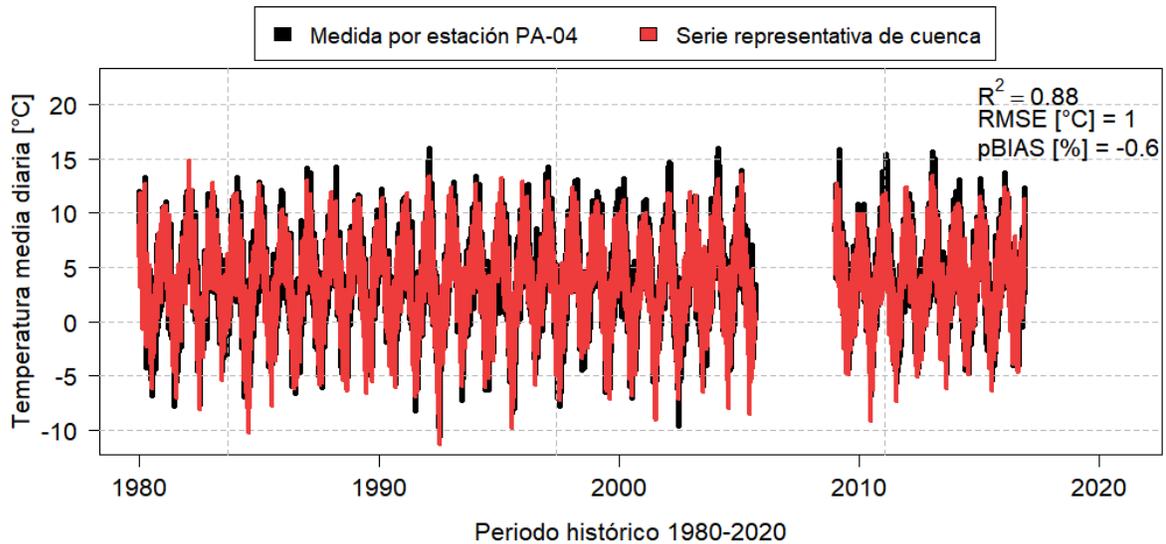


Figura 5-7 Estacionariedad de valores de temperatura en el periodo 1979-2020

5.4 Calibración y validación

A continuación, en las Figuras 5-8, 5-9, 5-10 y 5-11 se observan los resultados de las métricas calculadas, durante el periodo 1985-2020, que considera validación y calibración y además una comparación gráfica de la escorrentía modelada por GR4HCN y GR5HCN. Por su parte las tablas 5-6 y 5-7 de observa el detalle por periodo de evaluación, de las métricas aplicadas al hidrograma.

A partir de la figura 5-9, se evidencia un buen ajuste gráfico de los resultados del modelo GR4HCN tanto para la curva de duración como para la de variación estacional. Sin embargo, se observa en el hidrograma (Figura 5-8) que el modelo no logra representar bien los “peaks” de la serie observada. Comportamiento que se corrobora a partir del resultado por parte índice NSE. Por otro lado, se obtiene un $KGE = 0.5$ para el periodo analizado, lo que no indica un buen desempeño, pero si al menos uno aceptable. Finalmente, en relación con el modelo GR4HCN, se aprecia que el iNSE indica un buen desempeño por parte del modelo, por lo que asegura un ajuste confiable en la modelación de caudales medios bajos.

Por su lado, con el modelo GR5HCN, se observa un comportamiento a nivel diario bastante similar al del modelo previamente analizado. Se obtuvo un índice de eficiencia aceptable, al igual que para el modelo GR4HCN, y así también, los índices NSE y el RMSE calculado para el hidrograma, no distan mucho los valores calculados para el GR4HCN. Pese a ellos, el inverso de NSE demuestra un pésimo ajuste del modelo para caudales bajos, comportamiento, que se observa de forma gráfica en la curva de duración del modelo (Figura 5-12).

Ahora, considerando los resultados obtenidos para ambos modelos, se determina usar para el análisis histórico y futuro de los eventos hidrológicos extremos solo el modelo GR4HCN, pues permite representar de buena manera los caudales bajos, importantes para el análisis de las sequías y de manera aceptable los caudales máximos. Finalmente, los parámetros calibrados se detallaban en la tabla 5-8

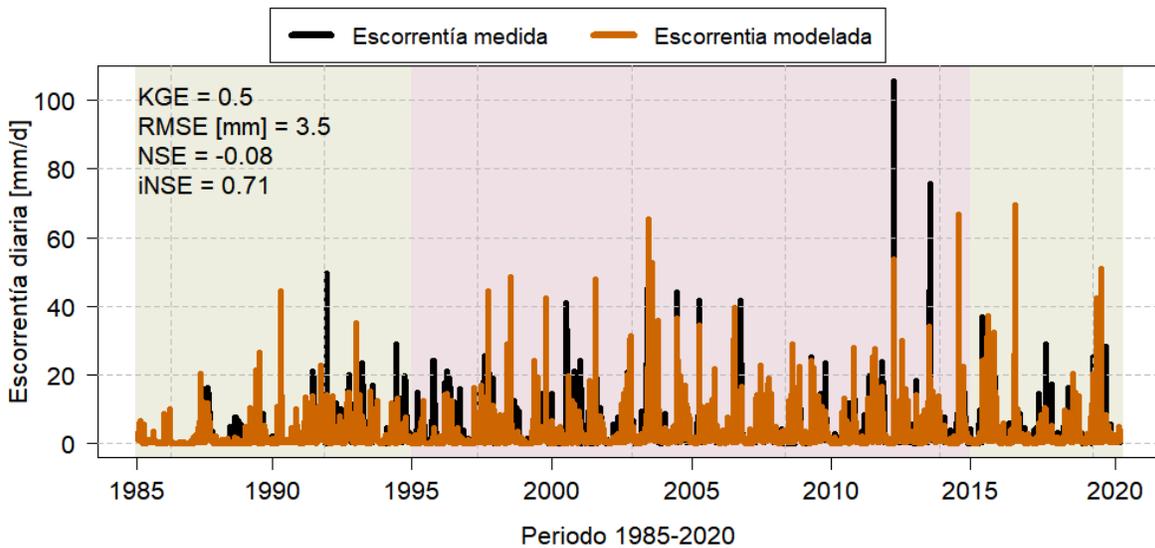


Figura 5-8: Hidrograma a nivel diario de la escorrentía observada versus la modelada por el modelo GR4HCN.

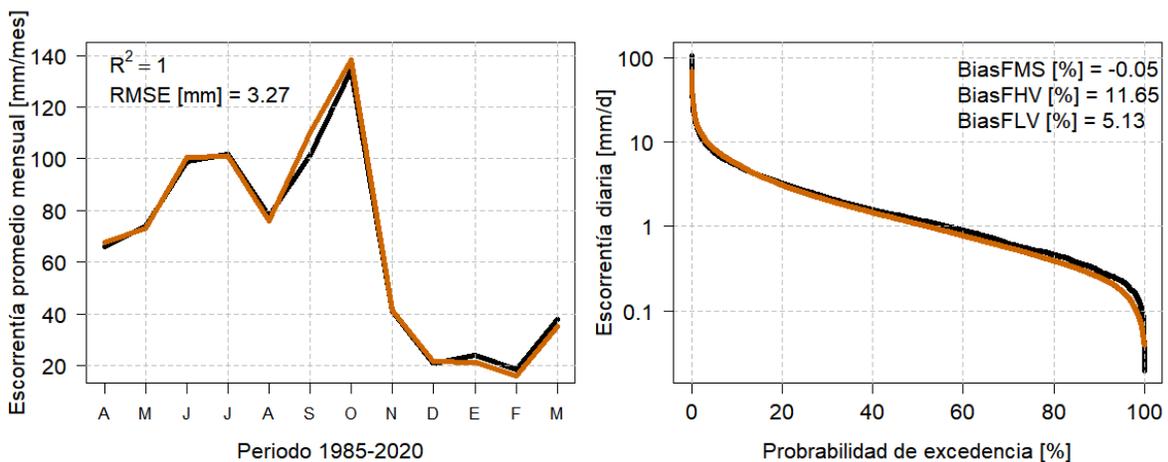


Figura 5-9: Resultados modelo GR4HCN, curva de variación estacional de escorrentía observada versus modelada a la izquierda y Curva de duración de escorrentía diaria observada versus modelada a la derecha.

Tabla 5-6: Métricas analizadas para evaluación de periodos de validaciones y calibración. modelo GR4H

Métrica	Periodo Validación 1985-1995	Periodo Calibración 1995-2015	Periodo Validación 2015-2020
KGE	0.44	0.49	0.39
RMSE [mm]	2.97	3.8	3.26

NSE	0.02	-0.06	-0.37
iNSE	0.53	0.73	0.85

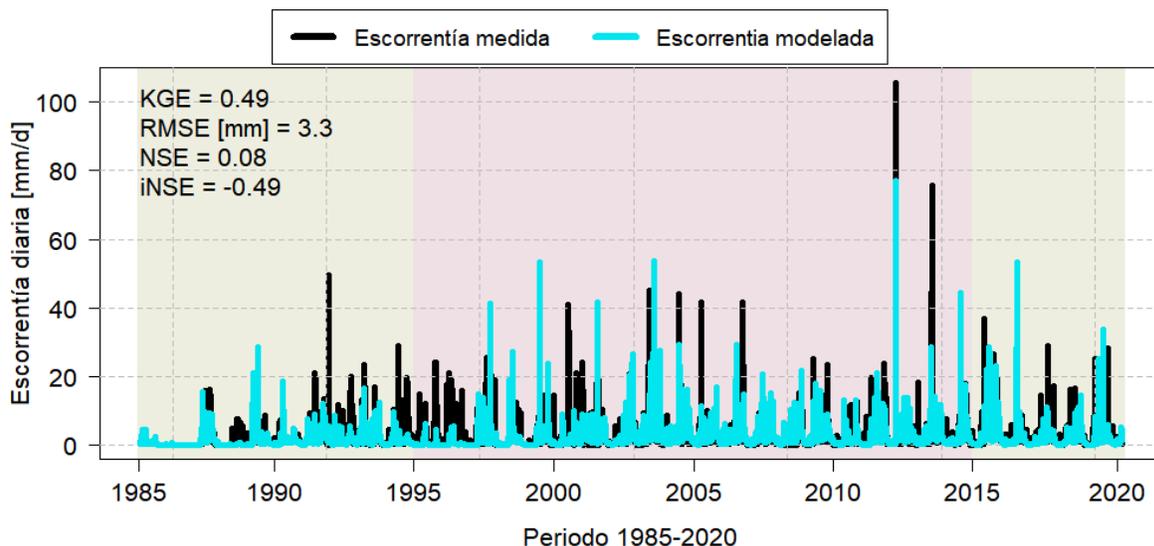


Figura 5-10: Hidrograma a nivel diario de la escorrentía observada versus la modelada por GR5HCN.

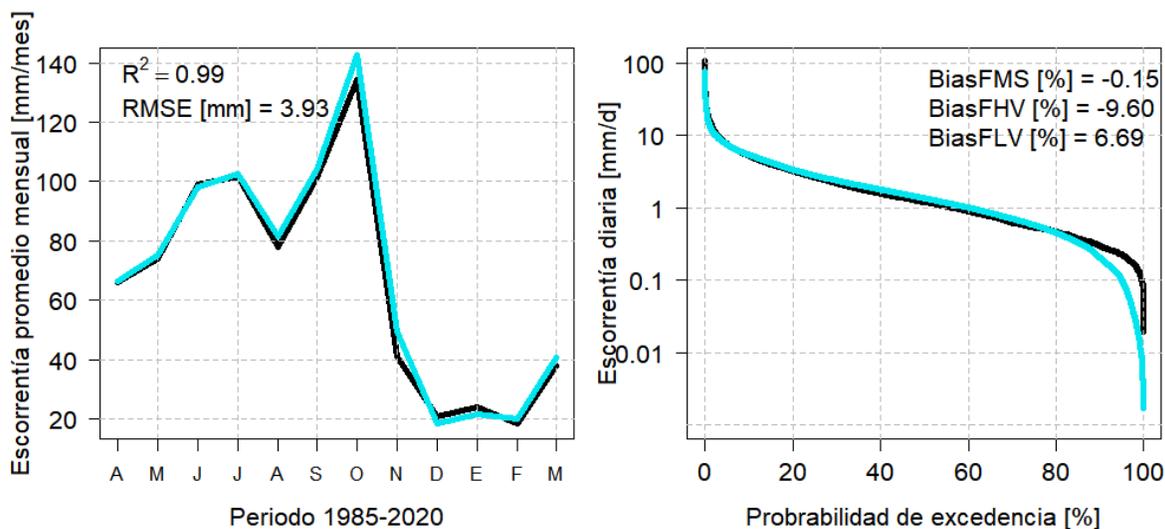


Figura 5-11: Resultados modelo GR5HCN, curva de variación estacional de escorrentía observada versus modelada a la izquierda y Curva de duración de escorrentía diaria observada versus modelada a la derecha.

Tabla 5-7: Métricas analizadas para evaluación de periodos de validaciones y calibración. modelo GR5H

Métrica	Periodo Validación 1985-1995	Periodo Calibración 1995-2015	Periodo Validación 2015-2020
KGE	0.35	0.47	0.53
RMSE [mm]	2.79	3.54	2.85
NSE	0.14	0.08	-0.05
iNSE	-0.35	-0.84	0.63

Tabla 5-8: parametros finales GR4HCN

X1	X2	X3	X4	CN1	CN2
4.1430670	-1.488022	169.0378	15.36277	0.9947459	0.1765853

5.5 Desempeño del modelo GR4H y CemaNeige para la estimación de caudales máximos

En relación con los resultados obtenidos en la sección anterior (sección 5.4). Se desarrolla un análisis más exhaustivo respecto a la modelación de los caudales máximos por parte del modelo. Debido a que resulta fundamental representarlos de buena manera o al menos estimar algún porcentaje de sesgo promedio entre los medidos y los modelados.

Lo anterior, debido a los objetivos de este estudio. Y, a los antecedentes que se presentaron, respecto a los eventos hidrológicos extremos relacionados a crecidas o caudales máximos en la zona de estudio.

En este sentido, se analizan las métricas que indican el porcentaje de sesgo de los caudales máximos modelados, frente a los caudales máximos medidos por la estación fluviométría RLM, en los segmentos, alto, medio y bajo de la curva de duración (Figura 5-12). A partir de ellos, se observa que, existe una subestimación marcada por el modelo para caudales máximos más altos (probabilidad de excedencia < 20%), que alcanza casi un 80%. Al igual que para los caudales máximos más bajos (probabilidad de excedencia >70%), sin embargo, la subestimación es mucho mayor para estos último. Pese a ello, para lo valores medios de la curva, se observa un sesgo casi nulo.

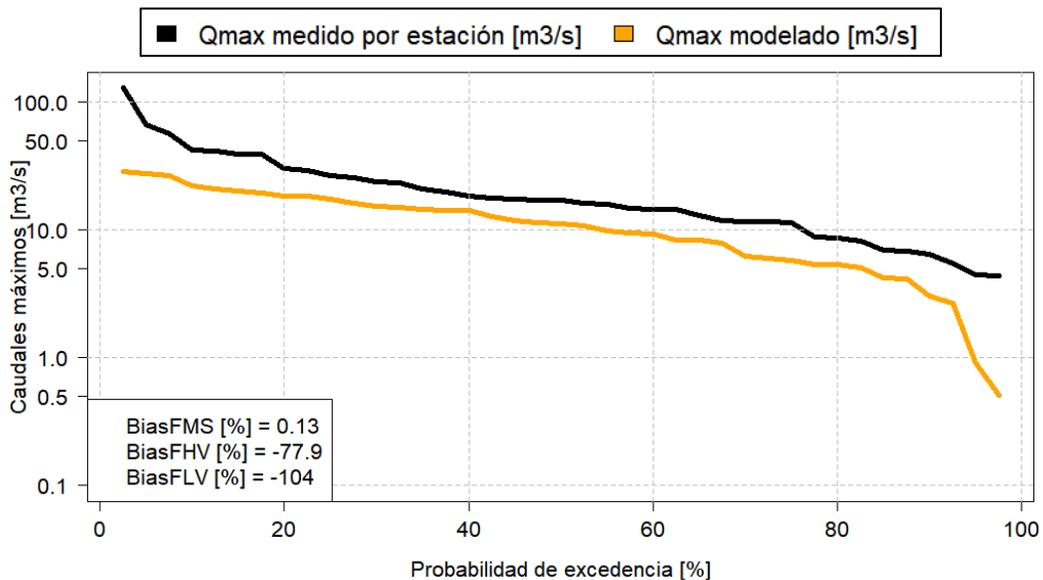


Figura 5-12: Comparación de curvas de duración para caudales máximos instantáneos medidos por estación fluviométría RLM y modelados por GR4HCN.

En relación con los resultados obtenidos, considerando que la mayor parte de la muestra se concentra dentro de los valores medios (20 datos de 39 analizados). Se estima un sesgo de subestimación promedio de un 42%, calculado por la ecuación 17

$$\text{Sesgo}_{\text{prom}} = \frac{\text{BiasFMS}}{2} + \frac{\text{BiasFHV}}{4} + \frac{\text{BiasFLV}}{4} \quad (17)$$

5.6 Análisis Periodo Histórico

Al implementar el modelo GR4HCN, usando las forzantes meteorológicas históricas. Se logra modelar la escorrentía horaria generada por la cuenca durante el periodo 1980-2020. A continuación, se detalla el análisis hecho respecto a los resultados obtenidos.

En primer lugar, para sentar las bases de ocurrencia de periodos secos/húmedos, fríos/cálidos. Se analizaron las anomalías anuales que presentaron la temperatura media, la precipitación y la escorrentía de la cuenca, respecto a sus promedios históricos (subsección 5.5.1). Luego se analizó en detalle las curvas de variación estacional de estas variables, para los 4 casos de combinaciones de anomalías meteorológicas (subsección 5.5.2).

Por su parte, para analizar los eventos hidrológicos extremos, se calcularon los índices de sequía meteorológica e hidrológica (5.5.4), detallados en el acápite 2.3. Y, el análisis de las inundaciones por desbordes de río se detalla (5.5.5).

5.6.1 Anomalías anuales

Para poder identificar la relación de los periodos meteorológicos secos/húmedos, fríos/cálidos, con los periodos hidrológicos secos/húmedos, se desarrolló el cálculo de las anomalías anuales de la precipitación, temperatura media y escorrentía, respecto a su promedio histórico. En la figura 5-13, se observan los resultados de este análisis.

De la figura 5-13, se observa que, la escorrentía anual acumulada, se encuentra directamente relacionada con la precipitación anual. Ya que, para los años en que la precipitación se encuentra por debajo del promedio histórico o define un año seco meteorológico (Figura 5-13b). La escorrentía también evidencia un año seco a nivel hidrológicos (Figura 5-13c).

Esta relación directa, no se puede observar de igual forma con la temperatura. Dado que, no se muestra un periodo frío o cálido específico relacionado a un periodo seco o húmedo hidrológico. Lo que podría indicar que, la temperatura no se considera como factor determinante para la variación de la escorrentía.

Además, a partir de la figura 5-13, en particular la figura 5-13a y 5-13b, se observa que los periodos secos a nivel meteorológicos e hidrológicos predominan durante el periodo 1980-2000. Mientras que, para los años posteriores al 2000, se observa un aumento en la frecuencia de periodos

húmedos. Y, a su vez, a partir del año 2003, se observa un aumento de la temperatura media anual promedio, dado que, se observa un aumento de los periodos cálidos en relación con el periodo 1980.2002.

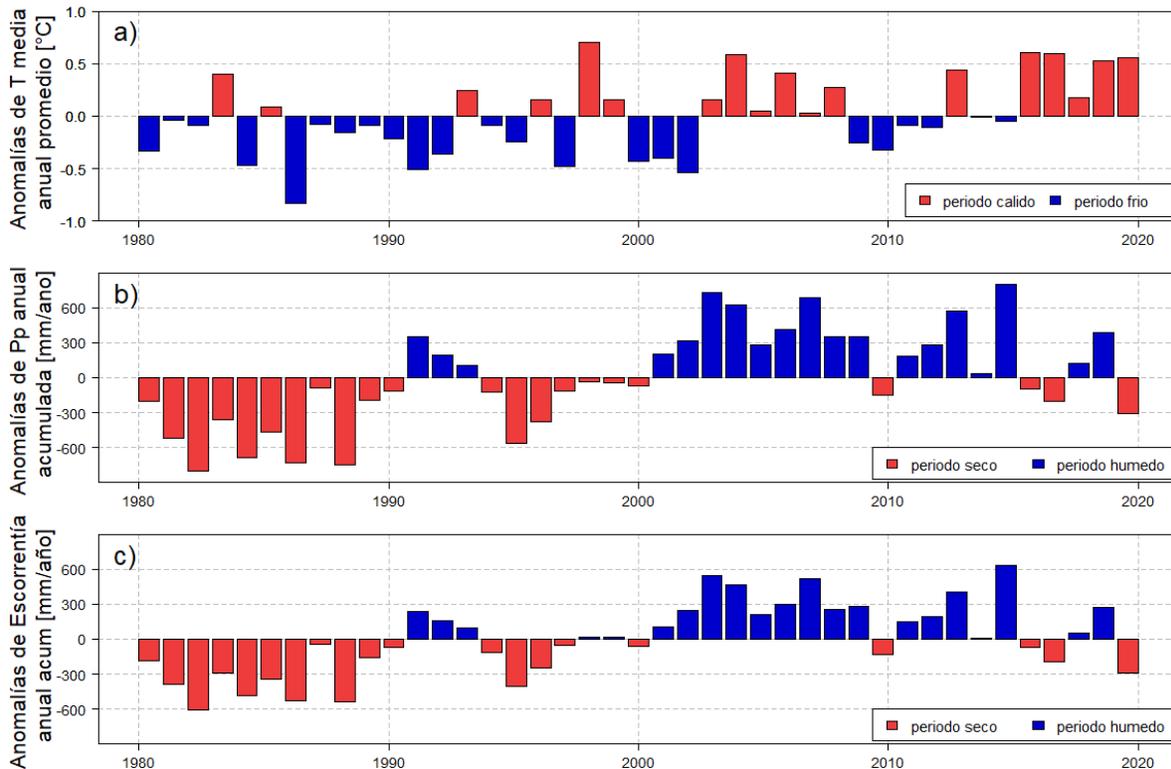


Figura 5-13: Anomalías de, temperatura media anual promedio (a), precipitación anual acumulada (b), y escorrentía anual acumulada (c), respecto a su promedio histórico anual.

5.6.2 Curvas de variación estaciones definidas por periodos anormales

Con el objetivo de entender la relación existente entre las variables de temperatura/precipitación con la escorrentía de la cuenca. Se desarrollo un análisis de las 4 posibles combinaciones de anomalías meteorológicas, es decir años fríos y secos (Figura 5-14a), años cálidos y secos (Figura 5-14b), años calidos y húmedos (Figura 5-14c) y años fríos y húmedos (Figura 5-14d). Para esto, se tomaron los años que presentaban cierta combinación de anomalías respecto al promedio. Y, con ellas se realizó un análisis para entender su relación con la escorrentía mensual promedio.

De la figura 5-14, se evidencia la relación directa entre la magnitud de escorrentía, respecto a la magnitud de precipitación, sobre todo durante los meses de pluviales. Ya que al comparar años húmedos-cálidos versus años secos-cálidos, se calcula una diferencia de escorrentía del orden de 50 mm al mes. A su vez, al hacer este mismo ejercicio con años húmedos-fríos y secos-fríos, se calcula una diferencia bastante parecida.

Por otro lado, se observa que, el régimen de la cuenca se relaciona con la temperatura, dado que, en años secos y fríos, al igual que en años húmedos y fríos (figura 5-14 a y d). El régimen nivopluvial es más evidente, en comparación a los casos cálidos (figura 5-14 b y c). Este fenómeno puede ocurrir debido a una disminución en la acumulación de nieve, ya que, se observa que la gran

diferencia de un año frío versus el cálido, son las temperaturas medias de periodo pluvial. Considerando que ese periodo, es en donde la precipitación se presenta en mayor porcentaje respecto al total como sólida.

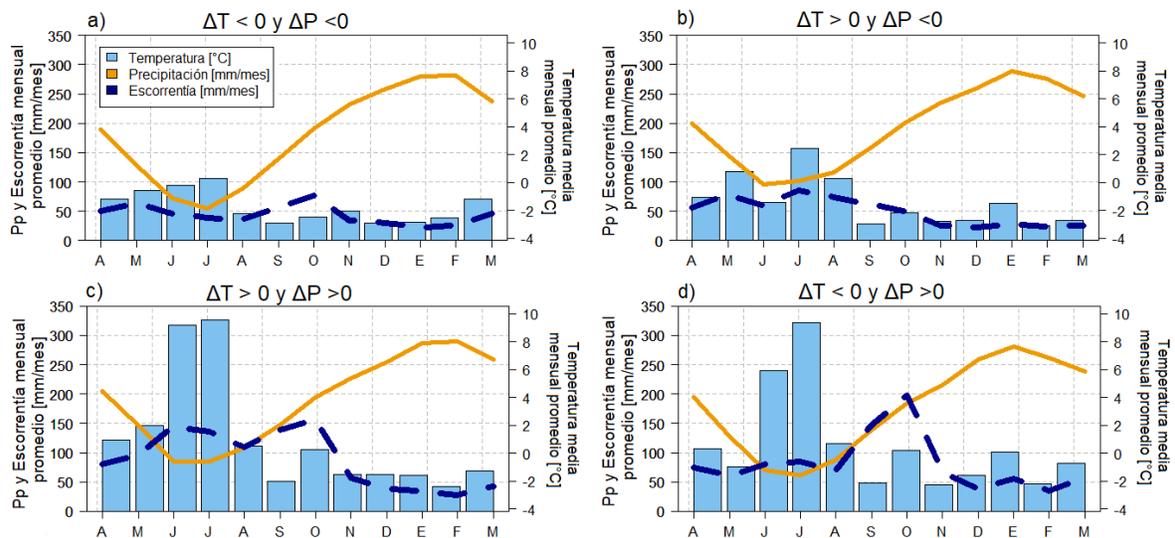


Figura 5-14: Análisis de las curvas de variación estacional para las 4 combinaciones de anomalías meteorológicas observadas en el análisis de anomalías anuales.

5.6.3 Cálculo de Sequía Meteorológica

A partir de los índices detallados en el acápite 2.3, se calculan el índice SPI o índice estandarizado de precipitación, y el SPEI o índices estandarizado de precipitación-evapotranspiración, ambos en periodos de 3 meses. A continuación, se observan los resultados obtenidos para cada uno (tablas 5-9 y 5-10).

Los resultados del SPI, evidencian una “normalidad” la mayor parte del tiempo alcanzando un 80% del total de periodos. Pese a ellos, 12.6% de los periodos analizados se presentó una tendencia húmeda, mientras que los periodos secos, solo se observaron un 5% del tiempo total.

El SPEI muestra un comportamiento muy similar al que evidencio el SPI, ya que, casi un 70% de los periodos estudiados presentaron normalidad respecto al promedio de las precipitaciones. Sin embargo, los periodos moderada o severamente secos dominaron por un 2,6%, respecto a los periodos moderada o severamente húmedo.

Tabla 5-9: Resultados del cálculo del SPI para el periodo histórico

Categoría	SPI [%]
Extremadamente Seco	0
Severamente Seco	0
Moderadamente Seco	5.3
Normal o Aproximadamente Normal	81.3

Moderadamente Húmedo	4.8
Severamente Húmedo	2.7
Extremadamente Húmedo	4.8

Tabla 5-10: Resultados del cálculo del SPEI para el periodo histórica

Categoría	SPEI [%]
Extremadamente Seco	0
Severamente Seco	13.1
Moderadamente Seco	2.9
Normal o Aproximadamente Normal	68.1
Moderadamente Húmedo	8.9
Severamente Húmedo	4.5
Extremadamente Húmedo	2.3

5.6.4 Cálculo de sequía hidrológica

A continuación, en la figura 5-17 y en la tabla 5-11 se observan los resultados de los índices que definen sequía hidrológica. El primero, evalúa los caudales medios anuales respecto a un caudal que representa la demanda hídrica mínima o define una sequía severa según Arclim. En este caso, ese caudal “mínimo” se define como el caudal asociado a una probabilidad de excedencia de un 85% de la serie histórica de caudales medios anuales.

Por tanto, como se puede observar en la figura 5-17. Se evidencia casi una década de sequía hidrológica comprendida entre los años 1980-1990. Este cálculo resulta ser consistente con el acápite 5.6.1, que también indica un periodo hidrológicamente seco. Y, también podemos notar que, aunque la figura 5-14c muestra otros periodos de sequía durante el resto del periodo, respecto a su anomalía, estos no se traducen en sequía para los alcances de este índice.

Por su parte la sequía hidrológica a nivel diario (tabla 5-6), responde a una ocurrencia de 3% del periodo total evaluado, y a su vez a una duración máxima de 54 días, ocurrida en el periodo de máxima temperatura. Pero con una duración promedio de 14 días con ocurrencia en los todos los periodos estacionales.

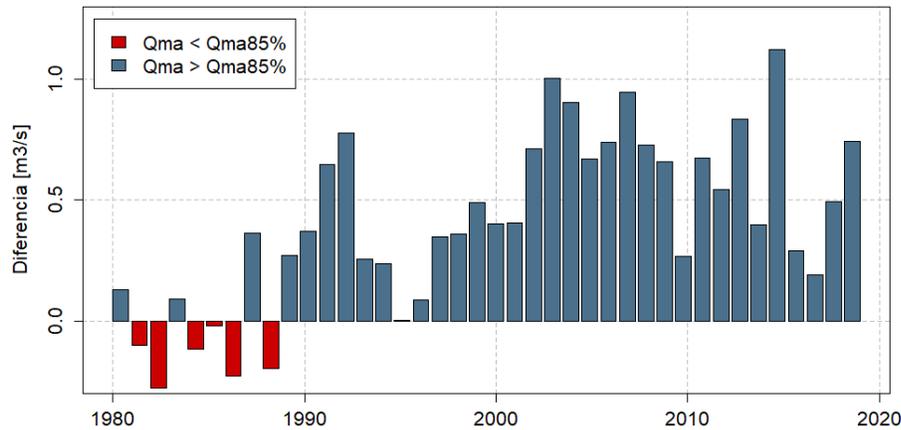


Figura 5-15: Diferencia del caudal medio anual respecto al caudal que define la “demanda mínima” hídrica para el periodo histórico.

Tabla 5-11: Resultados del índice de sequía diaria para el periodo histórico.

Sequía hidrológica diaria	
Total [días]	470
Total c/r al periodo [%]	3,2
Duración máxima [días]	54
Duración promedio [días]	14

5.6.5 Análisis de inundaciones por desbordes de río

Para poder entender la relación escorrentía-inundación de la cuenca del río de las minas e impactos asociados. Se realiza un análisis respecto a las últimas dos inundaciones por desbordes de río ocurridas, en el mes mayo del año 1990 y en marzo del año 2012. Este análisis se hace a partir de un modelo HEC-RAS de la canalización de río, hecho a partir de un levantamiento topográfico desarrollado por la Dirección de Obras Hidráulicas (UMAG, 2014) y con ajustes manuales para poder representar los desbordes ocurridos. Y respecto a las áreas de inundación asociadas a caudales máximos observados.

Como se observa en la figura 5-18, el área de inundación correspondiente al desborde ocurrido, el año 1990, es menor al área de inundación observada para el desborde del año 2012. Sin embargo, los caudales máximos asociados fueron de 130 m³/s y 66.6 m³/s, respectivamente.

El comportamiento anterior, se explica según los estudios revisados (Muñoz et al, 2020 y UMAG, 2014), por la diferencia de alturas que presentaba la costanera en una inundación y otra. Ya que, para el año 2012, debido a una previa remodelación de la costanera que aumento su nivel con respecto al nivel del mar. Genero que actuara como dique, impidiendo la descarga de los caudales que fluían por las calles en dirección al estrecho. Por tanto, debido a este embanque, se amplifico el área de inundación de inundación.

Sin embargo, una característica que comparten ambas inundaciones es el origen del desborde, ubicado justo aguas abajo del puente de la calle Armando Sanhueza (identificado con rojo en la figura 5-18). A su vez según testimonios y registros fotográficos de la inundación del año 2012. Se indica que, el desborde del río se concentró dentro del área de la canalización que limitan los tres puentes críticos identificado con amarillo en a figura 5-18.

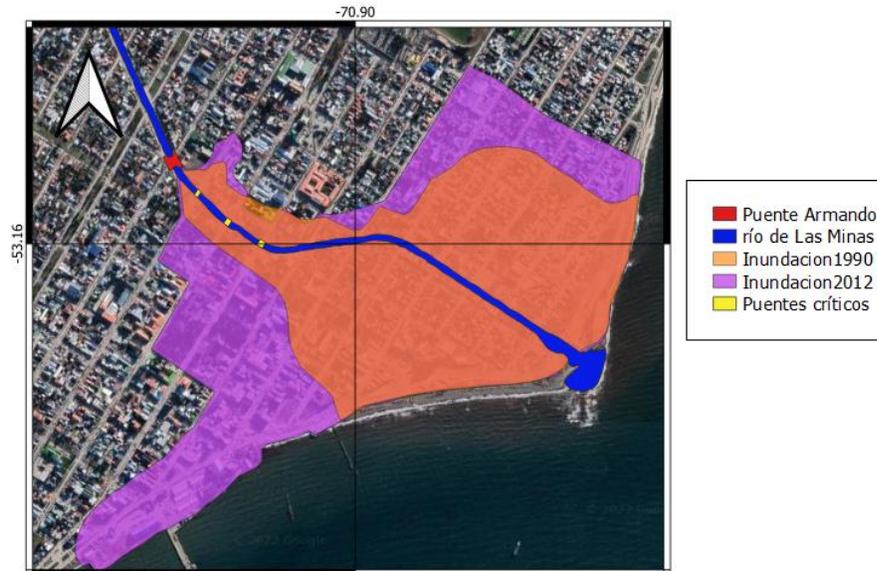


Figura 5-16: Inundaciones por desbordamientos de río ocurridas en mayo 1990 y en marzo 2012. Fuente: Adaptada de Muñoz et al 2020.

Tabla 5-12: Áreas de inundación asociadas a un periodo de retorno según Muñoz et al. 2020

T	Q[m ³ /s]	Fecha
100	130	05/1990
500	66.6	03/2012

A partir de lo previamente expuesto, se construye un modelo HEC-RAS, con el objetivo de evaluar la capacidad hidráulica del canal sin puentes (debido a que no se contaba con sus medidas específicas). Para este, se tomaron diversos supuestos para poder representar el desborde ocurrido el año 2012. Y así, luego de varias pruebas de distintas combinaciones de caudales se obtienen los perfiles transversales de las secciones críticas de la canalización mostradas en la figura 5-19.

De la figura 5-19, se puede observar, que, incluso si bien las áreas críticas no logran inundarse del todo, muestran el canal usando su máxima capacidad. Lo que podría demostrar un comportamiento aceptable respecto a su

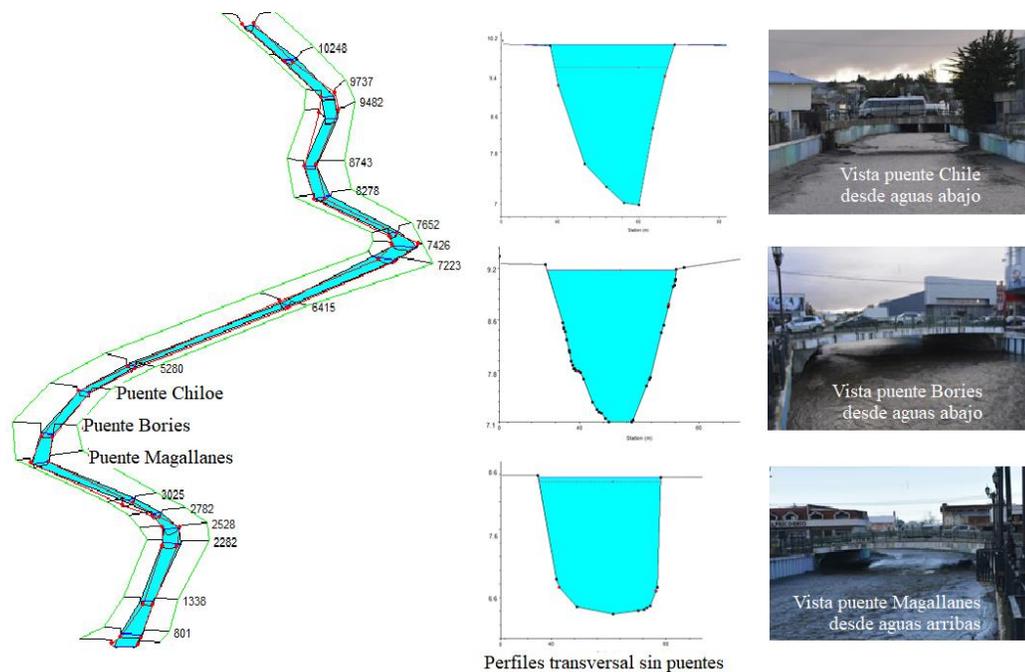


Figura 5-17: Modelo HEC-RAS y puntos críticos detectados en la canalización.

5.7 Análisis Periodo Futuro sujeto a Cambio climático

A continuación, se muestran los resultados de la implementación del modelo GR4HCN para el periodo histórico (1980-2020), futuro cercano (2020-2060) y futuro lejano (2060-2100) con las forzantes de los cuatro GCM (CCSM4, CSIRO-MK3.6-0, IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM). El que, en primer lugar, se analiza a partir de la variación de las curvas de variación estacional, curvas de duración y de escorrentía mediana anual.

Posteriormente, se analizan los impactos del cambio climático en los eventos hidrológicos extremos, usando los índices establecidos en el acápite 2.3 de la revisión bibliográfica (subsección 5.7.2, 5.7.3 y 5.7.4).

5.7.1 Variación hidroclimática respecto al periodo futuro

A modo de sentar las bases del impacto del cambio climático en las variables meteorológicas y climáticas, se analiza la variación de las curvas de variación estacional de precipitación, temperatura y escorrentía. Además de las curvas de curvas de duración de escorrentía media diaria y la variación de la escorrentía mediana anual.

Todos estos análisis se desarrollaron respecto al periodo histórico 1980-2020, periodo futuro cercano 2020-2060 y periodo futuro lejano 2060-2100.

Respecto a las curvas de variación estacional de las variables meteorológicas, se observa que, tanto para precipitaciones como para las temperaturas máximas y mínimas (Figuras 5-20 y 5-21), se mantiene la estacionalidad, no así sus montos mensuales. Aumentando tanto las temperaturas mínimas como las máximas de manera proporcional, es decir, sin variar la amplitud térmica y de

forma creciente con respecto al avance de periodo evaluado. Para el caso de las precipitaciones, también se observa un leve aumento, en los modelos CCSM4, MIROC e IPSL. El modelo CSIRO por su lado, evidencia una leve disminución. Sin embargo, este pequeño aumento/disminución mostrada por los periodos futuros cercano y lejano, se focaliza en el periodo pluvial de la curva, dado que el resto de la curva se mantiene casi igual para todos los GCM.

Por su parte, para el caso de la escorrentía (Figura 5-22), se evidencia un cambio en el régimen de la cuenca, pasando de ser nivo-pluvial a pluvio-nival. Mostrando un cambio “transitorio” para el periodo futuro cercano, respecto al periodo histórico. Mientras que para el futuro lejano se observa una variación drástica respecto al periodo histórico. Este comportamiento, se aprecia de forma generalizada para los 4 GCM. Sin embargo, los modelos MIROC e IPSL muestran cambios más pronunciados en las magnitudes, respecto a los modelos CCSM4 y CSIRO.

La figura 5-21, que muestra la variación de las curvas de duración en los tres periodos de análisis. Demuestra que la distribución de escorrentía en los periodos evaluados no evidenciara grandes cambios. A excepción del modelo MIROC, del que se desprende un aumento de la escorrentía máxima.

En relación con la variación de la escorrentía mediana anual (Figura 5-23). Se observa un comportamiento consistente y similar a lo que se observado en las curvas de variación de escorrentía. Ya que, se observa que, escorrentías medianas anuales máximas comienzan a adelantarse, respecto al periodo histórico. Al igual que las CVE de escorrentías. El periodo futuro cercano muestra un cambio transitorio, mientras que para el periodo futuro se evidencian la escorrentía mediana anual máximas durante el periodo pluvial.

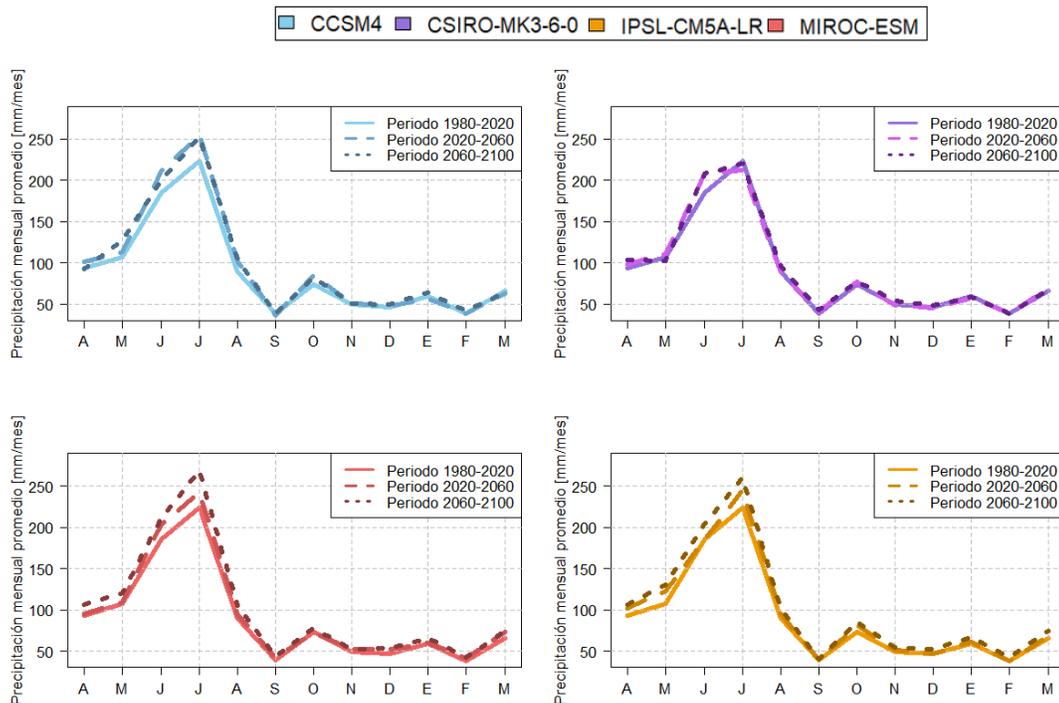


Figura 5-18: Curva de variación estacional de Precipitación mensual promedio para los 4 GCM en los 3 periodos de análisis.

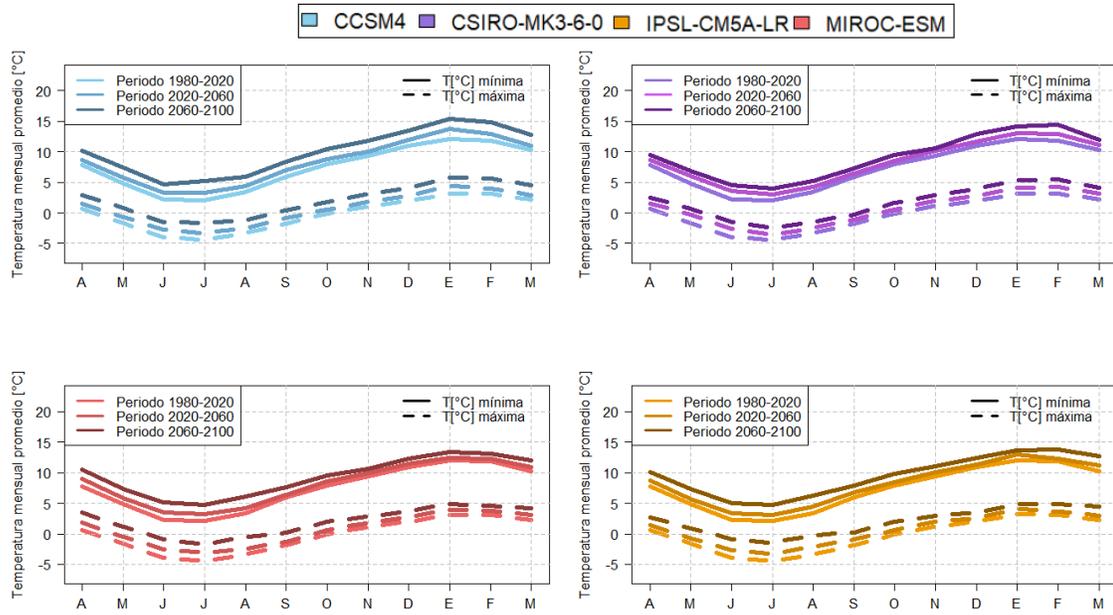


Figura 5-19 Curva de variación estacional de Temperatura máxima y mínima mensual promedio para los 4 GCM en los 3 periodos de análisis.

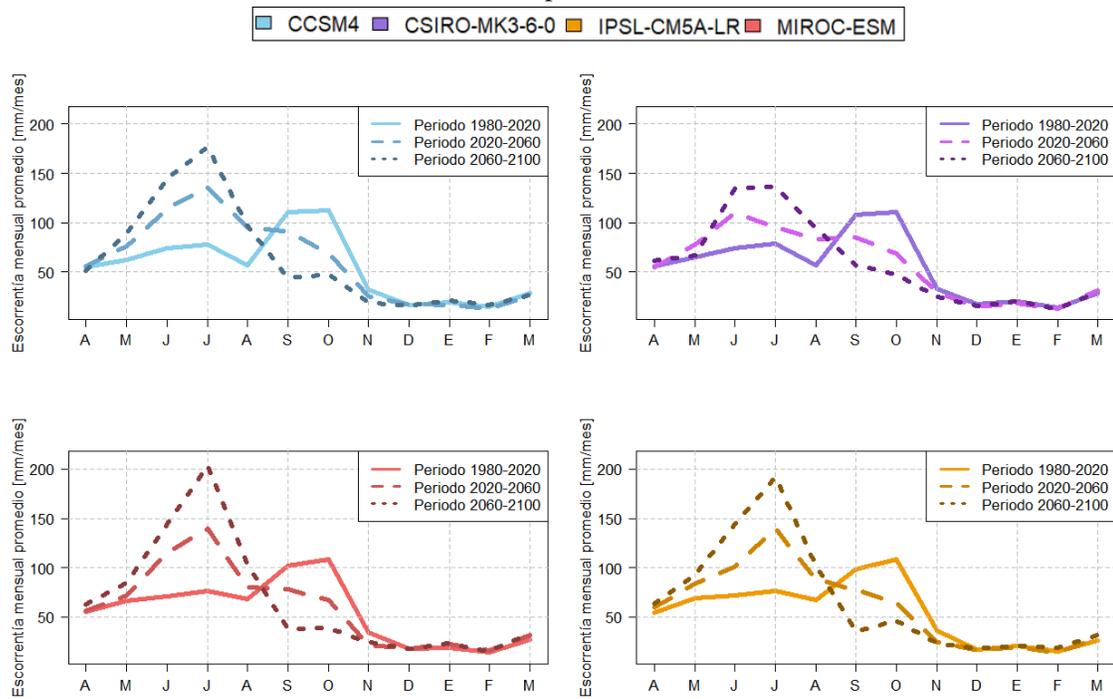


Figura 5-20: Curva de variación estacional de escorrentía mensual promedio para los 4 GCM en los tres periodos de análisis.

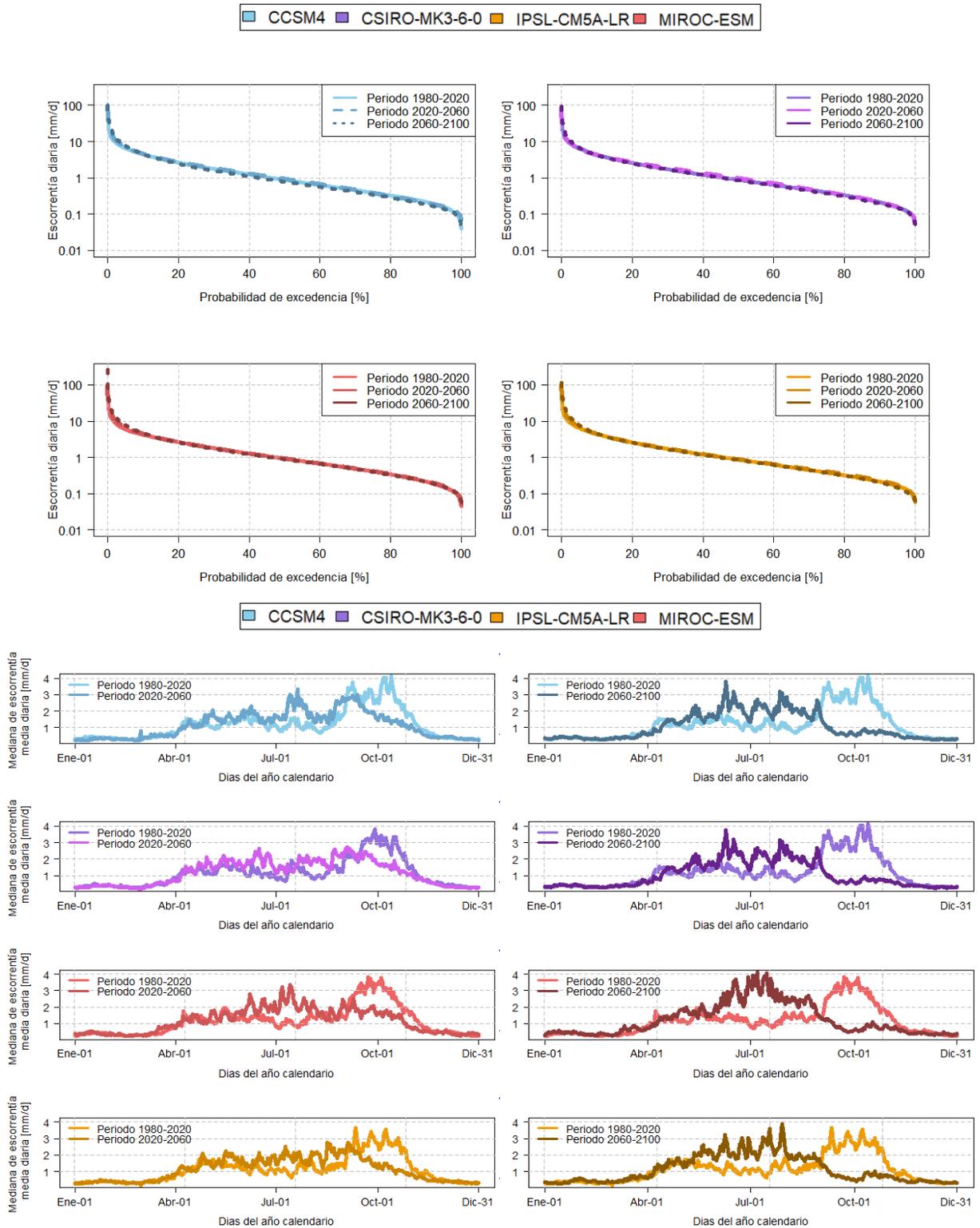


Figura 5-21 Medianas de escorrentías medias diarias en el año calendario, para los 4 GCM, en los 3 periodos analizados.

5.7.2 Cálculo de sequía meteorológica proyectada

Para el cálculo de la sequía meteorológica, se determinó usar solo índice SPEI, debido que, al incluir la variable de evapotranspiración en su cálculo. Se considera indirectamente la componente de temperatura en la evaluación del índice, y así, permite evaluar ambas variables meteorológicas a la vez. Resultando ser un indicador mucho más realista que el índice estandarizado de precipitaciones.

Ahora, al analizar los resultados del índice estandarizado de precipitación-evapotranspiración. Se observan comportamientos totalmente distintos para cada modelo. Mientras que para el modelo CCSM4 se observa que en ambos futuros aumentarán los periodos moderadamente secos, disminuirán los periodos de normalidad y así también los periodos de extrema humedad, respecto a lo evidenciado en el histórico (Tabla 5-13). El modelo CSIRO muestra un comportamiento similar respecto a periodos secos, normales y húmedos, entre el periodo histórico y el futuro cercano. Pero a su vez para el futuro lejano se estima una disminución de los periodos moderadamente secos, aumento en los periodos normales y una probabilidad similar entre las diversas intensidades de humedad (Tabla 5-14).

Tabla 5-13: Resultados del índice SPEI para los periodos histórico, futuro cercano y futuro lejano para el modelo CCSM4.

CCSM	Histórico	Futuro cercano	Futuro lejano
Extremadamente Seco	0	0	0
Severamente Seco	0	0	0
Moderadamente Seco	6,6	15,7	15,8
Normal o Aproximadamente Normal	80,9	68,2	68,1
Moderadamente Húmedo	4,9	9,3	8,9
Severamente Húmedo	3,1	4,1	4,8
Extremadamente Húmedo	3,6	2,5	2,3

Tabla 5-14: Resultados del índice SPEI para los periodos histórico, futuro cercano y futuro lejano para el modelo CSIRO.

CSIRO	Histórico	Futuro cercano	Futuro lejano
Extremadamente Seco	0	0	0
Severamente Seco	0	0	0
Moderadamente Seco	15,8	15,3	9,5
Normal o Aproximadamente Normal	68,1	68,8	79,1
Moderadamente Húmedo	9,3	9,8	4,7
Severamente Húmedo	4,4	3,7	2,7
Extremadamente Húmedo	2,2	2,2	3,4

Los resultados obtenidos a partir del modelo MIROC (tabla 5-15), evidencian una posible disminución en la ocurrencia de periodo normales, tanto para el periodo futuro cercano, como para el lejano. A su vez, muestra un aumento en la ocurrencia de periodos moderadamente secos y húmedos y también un pequeño aumento en los periodos severamente húmedos. Finalmente, el

IPSL muestra un comportamiento complemente desfavorable para el futuro cercano (tabla 5-16), disminuyendo periodos normales y aumentando los secos y húmedos. Mientras que para un futuro lejano, se observa un comportamiento casi idéntico al histórico.

Tabla 5-15: Resultados del índice SPEI para los periodos histórico, futuro cercano y futuro lejano para el modelo MIROC-ESM.

MIROC	Histórico	Futuro cercano	Futuro lejano
Extremadamente Seco	0	0	0
Severamente Seco	0	0	0
Moderadamente Seco	6,8	16,1	15,9
Normal o Aproximadamente Normal	80,8	67	68,3
Moderadamente Húmedo	5,4	10,1	8,9
Severamente Húmedo	2,9	4,1	4,5
Extremadamente Húmedo	3,5	2,6	2,3

Tabla 5-16: Resultados del índice SPEI para los periodos histórico, futuro cercano y futuro lejano para el modelo IPSL-CMA5-LR.

IPSL	Histórico	Futuro cercano	Futuro lejano
Extremadamente Seco	0	0	0
Severamente Seco	0	0	0
Moderadamente Seco	6,1	15,7	5,4
Normal o Aproximadamente Normal	81,9	68,1	82,5
Moderadamente Húmedo	5,4	9,2	5,1
Severamente Húmedo	2,8	4,6	2,9
Extremadamente Húmedo	3,6	2,2	3,7

5.7.3 Cálculo de sequía hidrológica proyectada

El índice que define caudal de demanda hídrica mínimo, evidencia para el modelo CCSM4 un aumento de las magnitudes de sequía para el futuro lejano, no así para el futuro cercano. Para el caso del modelo CSIRO, no se observan importantes variaciones en los periodos de sequía severas. En relación con los resultados del modelo IPSL, se aprecian aumentos en las magnitud y frecuencia de las sequías hidrológicas, para ambos futuros analizado, más pronunciados para el periodo futuro cercano. Finalmente, para el modelo MIROC se observa un comportamiento futuro bastante similar al del IPSL, ya que aumentan las magnitudes de las sequias. Pero no así su frecuencia (figura 5-24).

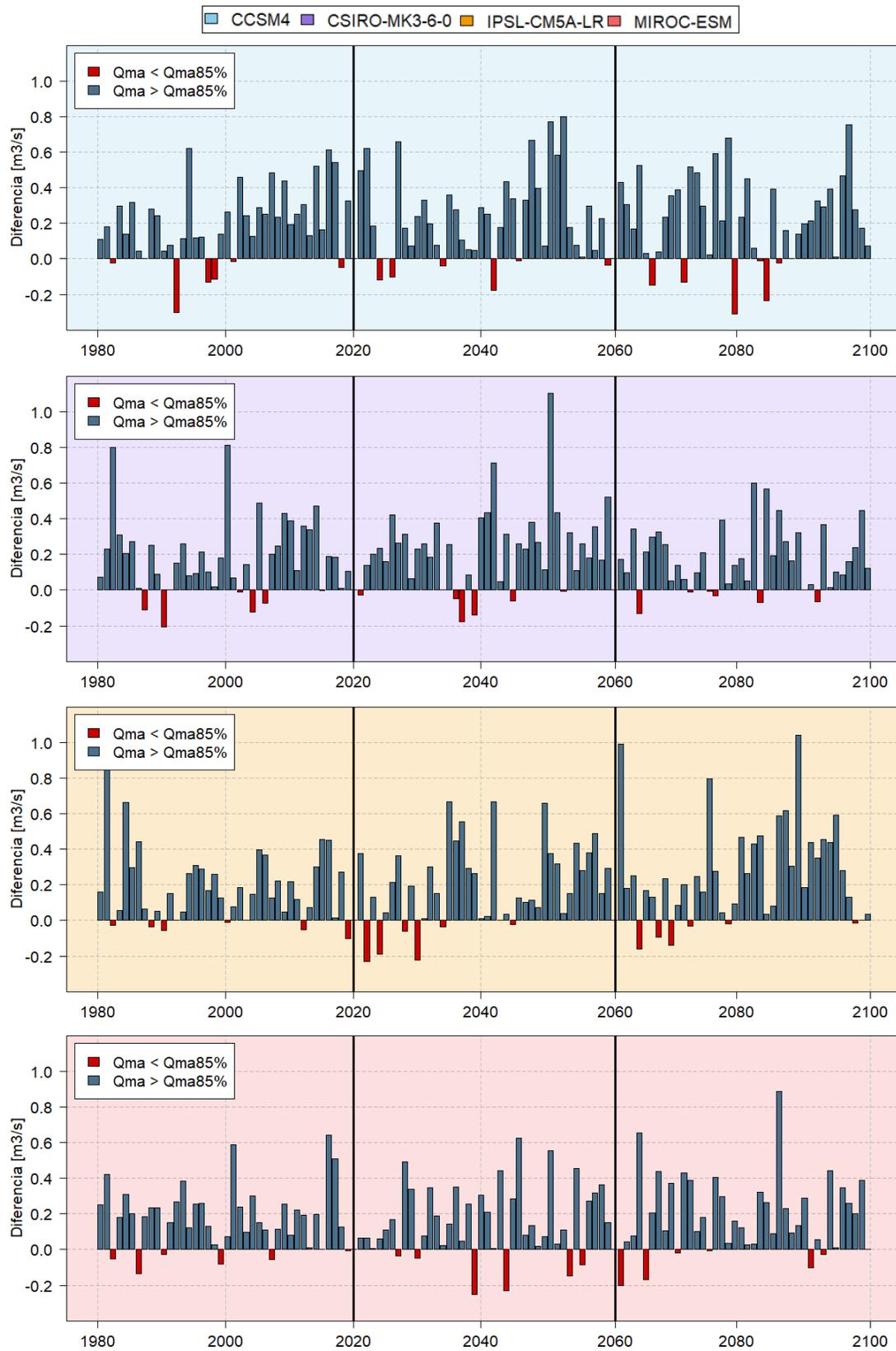


Figura 5-22: Diferencia de caudal media anual con respecto al caudal de demanda hídrica "mínima" para los periodos históricos y futuros.

En tanto, la sequía hidrológica diaria demuestra un aumento en su ocurrencia respecto al histórico, para los modelos IPSL y CSIRO en el periodo futuro cercano, mientras que, para el futuro lejano, este comportamiento se observa en el modelo CCSM4 y en el CSIRO. De igual forma sucede para el caso de la duración máxima y promedio de sequías diarias (tabla 5-17).

Tabla 5-17: Resultados del índice de sequía diaria para los periodos histórico y futuros.

CCSM	Histórico	Futuro Cercano	Futuro Lejano
Total [días]	789	737	869
Total c/r al periodo [%]	5,4	5,1	5,9
Duración máxima	49	31	57
Duración promedio	13	10	11
CSIRO	Histórico	Futuro Cercano	Futuro Lejano
Total [días]	584	836	727
Total c/r al periodo [%]	3,9	5,7	4,9
Duración máxima	32	42	52
Duración promedio	11	12	10
MIROC	Histórico	Futuro Cercano	Futuro Lejano
Total [días]	934	852	776
Total c/r al periodo [%]	6,4	5,8	5,3
Duración máxima	66	47	39
Duración promedio	13	12	12
IPSL	Histórico	Futuro Cercano	Futuro Lejano
Total [días]	690	708	680
Total c/r al periodo [%]	4,7	4,8	4,6
Duración máxima	38	42	37
Duración promedio	9	10	12

5.7.4 Cálculo de cambio en la escorrentía máxima futura

Finalmente, y para abordar el índice de factor de cambio en los periodos de retorno asociados en los caudales máximos, propuesto por Arclim. Se analiza el factor de cambio en los periodos de retorno de la escorrentía máxima horaria.

Para ello, se analiza la escorrentía máxima a nivel horaria anual en los tres periodos de análisis. Posterior a ello, se ajustan a función de probabilidad que mejor se ajuste a la curva, a partir de las pruebas χ^2 , Kolmogorov-Smirnov y la correlación de Pearson. Con ello, se calculan las escorrentías máximas asociadas a los periodos de retorno de 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250 y 500 años. Así, la escorrentía calculada para cada periodo de retorno se observa en la tabla 5-19 y las funciones de probabilidad ajustadas a cada serie se detallan en la tabla 5-18

Luego, se calculan 3 factores de cambio para cada modelo, el factor que analiza periodo futuro cercano-histórico, el que analiza periodo futuro lejano-histórico y finalmente, el que analiza periodo futuro lejano-futuro cercano (Tabla 5-20).

A partir de los resultados obtenidos, en particular, para los factores de cambio se observa que respecto al periodo histórico. Todos los modelos muestran un aumento en la escorrentía máxima horaria futura. A excepción del factor calculado para el periodo de retorno asociado a 500 años del modelo IPSL analizado en el futuro lejano.

A su vez, este aumento en la escorrentía máxima en el futuro disminuye la probabilidad estimada para cierta escorrentía máxima calculada en primera instancia para periodo de retorno del orden de los 500 años, a periodos de retorno de incluso 25 años como se observa en la tabla 5-12. Por ejemplo, en el caso de la escorrentía de periodo de retorno de 500 años en el periodo histórico del modelo CCSM4 en comparación a la escorrentía máxima calculada al periodo futuro cercano de 25 años de periodo de retorno.

Por su parte, este factor de cambio se ve mucho más acentuado en el periodo futuro cercano, respecto al observado para el periodo futuro lejano en el caso de los modelos CCM4 e IPSL. Mientras que para CSIRO y MIROC, se observa lo contrario. Es decir, factores de cambio mayores en el periodo futuro lejano respecto al cercano.

Tabla 5-18: Funciones de distribución de probabilidad asociadas a cada serie evaluada.

Periodo	CCSM4	CSIRO-MK3.6-0
Histórico	Log Pearson III	Log Pearson III
Futuro Cercano	Log Pearson III	Gamma
Futuro Lejano	Log Pearson III	Log Pearson III
Periodo	IPSL-CM5A-LR	MIROC-ESM
Histórico	Weibull	Gamma
Futuro Cercano	Log Pearson III	Gamma
Futuro Lejano	Log Pearson III	Weibull

Tabla 5-19: Cálculo de periodos de Retorno para los 4 GCM en los 3 periodos de análisis.

T [años]	Periodo 1980-2020	Periodo 2020-2060	Periodo 2060-2100	Periodo 1980-2020	Periodo 2020-2060	Periodo 2060-2100
CCSM				CSIRO-MK3.6-0		
25	52.6	88.3	81.8	20.5	26.0	37.2
50	60.7	99.7	89.7	32.4	44.2	53.3
75	65.6	106.2	94.0	41.6	56.8	64.5
100	69.0	110.9	97.0	55.0	72.6	79.0
150	74.0	117.4	101.0	66.3	84.0	90.2
200	77.6	121.9	103.7	73.6	90.5	96.8
250	80.4	125.5	105.8	79.0	95.1	101.6
500	89.4	136.4	111.9	87.1	101.5	108.4
IPSL-CM5A-LR				MIROC-ESM		
25	64.2	93.3	99.1	62.7	83.8	121.8
50	80.7	110.3	109.7	75.8	99.3	148.9
75	91.4	120.7	115.5	83.6	108.4	166.1
100	99.5	128.3	119.5	89.3	114.9	179.0
150	111.7	139.3	124.9	97.3	124.1	198.1
200	120.9	147.5	128.5	103.0	130.6	212.4
250	128.4	153.9	131.3	107.5	135.7	223.9
500	153.6	174.8	139.5	121.6	151.5	262.1

Tabla 5-20 Cálculo de factores de cambio en periodos de retorno.

T [años]	Factor de cambio Hist Fut. Cer.	Factor de cambio Hist. Fut.Lej.	Factor de cambio fut. Cer. Y Lej.	Factor de cambio Hist Fut. Cer.	Factor de cambio Hist. Fut.Lej.	Factor de cambio fut. Cer. Y Lej.
CCSM			CSIRO-MK3.6-0			
25	1.7	1.6	0.9	1.3	1.8	1.4
50	1.6	1.5	0.9	1.4	1.6	1.2
75	1.6	1.4	0.9	1.4	1.6	1.1
100	1.6	1.4	0.9	1.3	1.4	1.1
150	1.6	1.4	0.9	1.3	1.4	1.1
200	1.6	1.3	0.9	1.2	1.3	1.1
250	1.6	1.3	0.8	1.2	1.3	1.1
500	1.5	1.3	0.8	1.2	1.2	1.1
IPSL-CM5A-LR			MIROC-ESM			
25	1.5	1.5	1.1	1.3	1.9	1.5
50	1.4	1.4	1	1.3	2.0	1.5
75	1.3	1.3	1	1.3	2.0	1.5
100	1.3	1.2	0.9	1.3	2.0	1.6
150	1.2	1.1	0.9	1.3	2.0	1.6
200	1.2	1.1	0.9	1.3	2.1	1.6
250	1.2	1	0.9	1.3	2.1	1.7
500	1.1	0.9	0.8	1.2	2.2	1.7

6 Conclusiones

El presente estudio tuvo por objetivo evaluar los impactos del cambio climático en eventos hidrológicos extremos en la cuenca del río de Las Minas, Región de Magallanes y Antártica Chilena. Para ello, se implementaron los modelos conceptuales concentrados GR4H y GR5H, acoplados a un módulo de nieves CemaNeige en la cuenca definida por Camels río de Las Minas en Bt. Sendos. Para un periodo histórico, definido por los años 1980-2020, y dos periodos futuros definidos por los años 2020-2060 y 2060-2100.

Este modelo se implementó usando un algoritmo de optimización global llamado Dynamically Dimensioned Search, para cierto periodo de calibración, forzado con series de precipitación y temperaturas extremas diarias, derivadas del producto grillado CR2MET v2.0. Las cuales fueron desagregadas a nivel horario a partir de las distribuciones de ERA5 y agregadas espacialmente a nivel cuenca. Y, corregidas para los valores de precipitación, con el objetivo de ajustar las estimaciones a las observaciones locales in-situ recuperadas de la red meteorológica disponible en la zona de estudio. Además, se aplicó un proceso iterativo para ajustar la modelación hidrológica a los patrones estacionales de la cuenca del río de Las Minas a partir de los registros observados por la estación fluviométrica que controla la cuenca.

Luego, con el modelo se realizó una modelación a finales de siglo, bajo un escenario de emisiones RCP8.5, utilizando como base 4 GMC, considerando su representación de los patrones de Chile continental, expuestos en la Actualización del Balance Hídrico Nacional. Estos fueron CCSM4, CSIRO-MK3-6-0, IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM.

De las principales conclusiones del trabajo se obtiene lo siguiente:

- Las precipitaciones intensas (i.e. lluvias intensas) son las principales responsables de los eventos hidrológicos extremos en la cuenca del río de Las Minas.
- El régimen de escorrentía de la cuenca se verá directamente afectado por impacto del cambio climático, a través del aumento de temperatura.
- Se evidencian aumentos en recurrencia y magnitud de las inundaciones por desbordes de río. No así para el caso de las sequías.

Adicionalmente, a partir de los resultados obtenidos se pueden derivar las siguientes conclusiones específicas:

Con relación a los resultados obtenidos, a partir del análisis al producto CR2MET, respecto a sus valores de precipitación y su desempeño frente a registros medidos por parte de la red meteorológica del país. Se observa que, el producto subestima de forma generalizada los valores reales de precipitación percibidos en la zona, sobre todo aquello que representan las más intensas. Dado que, la subestimación promedio observada para el análisis continuo alcanza 25%, mientras que en particular las precipitaciones severas y violentas que caracterizan los eventos hidrológicos extremos son subestimadas un 93% del tiempo.

A raíz de la conclusión previamente se expuesta, se determinó una metodología para corregir el producto y poder representar bien los máximos de precipitación observados al largo del periodo histórico, ya que resultaba ser fundamental para los alcances de este trabajo. Y, en ese sentido conllevó un trabajo adicional no contemplado en los objetivos del estudio.

Por su parte, la corrección a los valores de precipitación de las forzantes demostró un buen desempeño respecto a los medido por la zona, mejorando tanto en la estacionalidad como en la representación de precipitaciones severa o violentas. Con respecto a los valores de temperatura del producto CR2MET, dado que estos mostraron un buen ajuste, con relación a la estación PA-04. No fue necesario corregirlos y fue posible aplicarlos de forma directa a los modelos.

Respecto a los modelos hidrológicos, si bien, se determinó hacer uso del modelo GR4HCN. Se debe tener en cuenta sus alcances y limitaciones, respecto a los resultados modelados tanto para el periodo histórico modelado y futuros modelados. Ya que, los valores de las métricas usadas para su evaluación de desempeño frente valores, se encuentran dentro de un rango, “aceptable-deficiente”.

Además, se observa, a partir del análisis de desempeño de reproducción de caudales máximos. Que, el modelo tiende a subestimar los datos. Peses a ellos, se debe destacar que este logro identificar un 80% de las crecidas observadas. Finalmente, y con respecto al porcentaje de subestimación que presenta el modelo, calculado en este mismo análisis. Se observa que incluso este puede llegar a ser conservador, debido a que al ser evaluado el año 2012. Es decir, al aplicar un sesgo del 42% del caudal observado ese mismo día, el caudal modelado alcanza a ser igual a 53 m³/s. Lo que indica una diferencia de alrededor de un 10m³/s en relación con el máximo observado y por tanto un sesgo conservador de los valores.

Sumado a lo anterior, se debe considerar que en este análisis no se consideró otros caudales aportantes al río, que puede ser una componente que implica subestimación de los datos.

En particular, para el análisis del periodo histórico, se observa que la temperatura es determinante en la variación del régimen de la cuenca, a partir del análisis realizado en detalle de las combinaciones anómalas. Sin embargo, es la precipitación la que tiene mayor influencia en la cantidad de disponibilidad hídrica, dado que periodos secos a nivel hidrológicos se presentan tan en periodos cálidos como fríos, no así con respecto a la precipitación.

A su vez, según los estudios analizados, son las precipitaciones intensas ocurridas en un rango de 24 a 48 horas seguidas, las principales responsables de los desbordes más catastróficos vividos en la ciudad.

Por otro lado, con los 2 desbordes analizados no es posible asignar un área de inundación, para cada periodo retorno histórico, debido a que los motivos de la gran área que abarco el ocurrido el año 2012, no está relacionado al caudal sino al diseño estructural de la costanera. Sin embargo, en el caso de no reconstruirse esta, o no implementar algún sistema de descargas, podría concluirse

que caudales mayores a los ocurridos para el desborde del año 2012, provocarían impactos aún mayores.

En relación, con los eventos hidrológicos contrarios a desbordes. A partir del análisis de anomalías se puede observar que desde el año 1990. Han cesado los periodos meteorológicos secos de larga duración (i.e, más de 2 de años) y de gran magnitud. Esto se ha visto reflejado en el análisis realizado por los índices que caracterizan sequías hidrológicas y meteorológicas.

Ahora referido a los impactos del cambio climático, en las variables meteorológicas. Se observa que tanto las precipitaciones como las temperaturas extremas mantendrán su estacionalidad. Sin embargo, estas últimas presentan un aumento del orden de 2 a 3 °C, tanto para las máximas como para las mínimas, de manera creciente, es decir, la temperatura aumenta a medida que se avanza en el tiempo. Por su parte la precipitación, no muestra cambios significativos en sus futuras magnitudes, tan solo en el periodo pluvial, se observa que un aumento promedio entre los 4 modelos de 30 mm. Sin embargo, mientras que los modelos IPSL y CCSM4 proyectan el mayor aumento de precipitación para el periodo futuro cercano, el modelo MIROC, lo indica para el futuro lejano y por lado CSIRO evidencia incluso una leve disminución de estas.

Si bien, las variables meteorológicas demuestran mantener su estacionalidad, el régimen de escorrentía mensual no demuestra el mismo comportamiento. Mas aun, evidencia claramente que el régimen de la cuenca pasara de ser nivo-pluvial, a pluvio-nival en el futuro cercano y luego solamente a pluvial en el futuro lejano. Lo anterior se puede asociar directamente con el aumento de las temperaturas, sobre todo con el aumento de las mínimas, que se dan durante el periodo pluvial. Como se observo en el periodo histórico en el análisis de detallado de combinaciones anómalas. Periodos cálidos indican directamente en el régimen de la cuenca.

En relación con los eventos futuros de sequía, los modelos no evidencian una tendencia común. Sin embargo, la mayoría no presenta cambios significativos. Se observan aumentos leves en la magnitud de las sequias a nivel anual por parte de los modelos MIROC e IPSL, pero no aumentos considerables de duración, ni de frecuencia. Es más el índice SPEI, mantiene lo establecido en el periodo histórico, dado que se mantiene “la normalidad” respecto a precipitaciones, sin embargo con un tendencia marcada percibir periodo más húmedos.

Finalmente, y en relación con las inundaciones por desbordes de río. El calculo de los periodos de retorno asociados al futuro cercano y lejano. Demuestran aumentos evidentes en los caudales máximos futuros. Siendo tan extremos que caudales asociados a periodos de retorno de 500 años para el futuro cercano, varían su probabilidad y se asocia a un periodo de retorno de 25 años.

Se observa, además que para los modelos CCSM4 e IPSL, el cambio será más extremos en el futuro cercano, en comparación al lejano. Por su parte CSIRO y MIROC evidencian un futuro lejano con mayor tendencia de cambio. Llegando incluso a doblar los caudales máximos asociados a los periodos de retorno evaluado.

Todo lo anterior, relacionado a los impactos de los cambios en los aumentos de caudales máximos, debe reanalizarle en periodos pluviales y de deshielo. Así, se puede estimar cuando existe mayor probabilidad de enfrentar eventos de crecidas. Dado que, si se analiza respecto al caso de la canalización del río de las minas, en las condiciones que se encontraba para el año 2012. Indicaría

futuros catastróficos, considerando que se espera que se espera que los caudales asociados a los periodos de retorno de 100, 200 y 500, aumenten de un 35 a 40%.

Ahora, considerando que, en la actualidad se están tomando medidas para prevenir o al menos mitigar los impactos de dichos eventos. Es posible que este aumento no provoque grandes impactos. Sin embargo, no es posible aseverar la no ocurrencia futura de desbordes como los evidenciados, menores o mayores.

Finalmente, se debe mencionar que, a partir de todos los resultados, tan solo se aborda la amenaza que implica el cambio climático a partir del aumento de los eventos hidrológicos extremos. Que considera solo 1 de las 3 componentes necesarias para poder establecer el riesgo real que contempla la ciudad de Punta Arenas, respecto a las sequías y las inundaciones por desbordes de río.

En este sentido, se evidencia la necesidad de abordar otras componentes como la exposición y sensibilidad, de tal forma de conocer el riesgo que contempla la ciudad respecto del aumento de eventos hidrológicos extremos. Y con lo anterior, poder anticipar impactos y establecer medidas para mitigar sus efectos.

Por otro lado, este análisis debe ser complementado de un estudio hidráulico futuro, que no fue posible desarrollar dentro de esta investigación dado que no se contaba con la geometría final de la canalización del río de Las Minas, dado que las obras de retención sedimentológicas siguen en construcción.

7 Bibliografía

1. Alvarez-Garretón, C., Mendoza, P. A., Pablo Boisier, J., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., y Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: Catchment attributes and meteorology for large sample studies-Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11):5817– 5846.
2. Andreassian, V., Bergstrom, S., Chahinian, N., Duan, Q., Gusev, Y., Littlewood, I., Mathevet, T., Michel, C., Montanari, A., Moretti, G., Moussa, R., Nasonova, O., O'Connor, K., Paquet, E., Perrin, C., Rousseau, A., Schaake, J., Wagener, T., Xie, Z., 2006. Catalogue of the Models used in MOPEX 2004/2005, vol. 307. IAHS Publication, pp. 41e93. URL. <http://iahs.info/uploads/dms/13602.06-41-94-13-CATALOGUE-at-last.pdf>
3. Andrews, F., Croke, B., Jakeman, A., 2011. An open software environment for hydrological model assessment and development. *Environ. Model. Softw.* 26, 1171e1185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.04.006>
4. Atlas de Riesgos de Cambio Climático (<https://arclim.mma.gob.cl/>)
5. Avanzi, F., Rungee, J., Maurer, T., Bales, R., Ma, Q., Glaser, S., & Conklin, M. (2020). Climate elasticity of evapotranspiration shifts the water balance of Mediterranean climates during multi-year droughts. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(9), 4317–4337. <https://doi.org/10.5194/hess-24-4317-2020>
6. Baez-Villanueva, O. M., Zambrano-Bigiarini, M., Beck, H. E., McNamara, I., Ribbe, L., Nauditt, A., Birkel, C., Verbist, K., Giraldo-Osorio, J. D., & Xuan Thinh, N. (2020). RF-MEP: A novel Random Forest method for merging gridded precipitation products and ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 239, 111606. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111606>
7. Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 34(10), 3001-3023.
8. Bellin, A., Majone, B., Cainelli, O., Alberici, D., Villa, F., 2016. A continuous coupled hydrological and water resources management model. *Environ. Model. Softw.* 75, 176e192. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.10.013>
9. Bovis M., 1995. Río Las Minas basin, southern Chile: a geomorphic and geotechnical assessment. University of British Columbia. Canada.
10. Cannon, A.J., 2016. Multivariate bias correction of climate model output: Matching marginal distributions and intervariable dependence structure. *J. Clim.* 29, 7045–7064. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0679.1>
11. Cannon, A.J. (2018) Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Clim Dyn* 50, 31–49 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>
12. Carrasco J., 2005. Radiografía de una emergencia. Aluvión en Punta Arenas, miércoles 9 de mayo de 1990. Avance. Pedagogía en Historia y Ciencias Sociales. Universidad de Magallanes desastre, p. 109.
13. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 (FONDAP 15110009) “Simulaciones climáticas regionales”. Proyecto “Simulaciones climáticas regionales y marco de evaluación de la vulnerabilidad” mandatado por el Ministerio del Medio Ambiente. Julio de 2018. Disponible en www.cr2.cl

14. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (2015) Informe a la Nación. La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro [pdf]. Disponible en: <http://www.cr2.cl/megasequia>(Junio, 2019).
15. Collier, M. A., Jeffrey, S. J., Rotstayn, L. D., Wong, K. K., Dravitzki, S. M., Moeseneder, C., Hamalainen, C., Syktus, J. I., Suppiah, R., Antony, J., El Zein, A., y Atif, M. (2011). The CSIRO-Mk3.6.0 Atmosphere-Ocean GCM: Participation in CMIP5 and data publication. MODSIM 2011 - 19th International Congress on Modelling and Simulation - Sustaining Our Future: Understanding and Living with Uncertainty, (December):2691–2697.
16. Copernicus Climate Change Service (C3S): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate, Copernicus Clim. Chang. Serv. Clim. Data Store [online] Available from: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>, 2017.
17. Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C., & Andréassian, V. (2017). The suite of lumped GR hydrological models in an R package. *Environmental Modelling & Software*, 94, 166–171. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.05.002>
18. Coron, L., Delaigue, O., Thirel, G., Perrin, C., Michel, C., 2020. airGR: Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling. R package version 1.4.3.65. <https://doi.org/doi:10.15454/EX11NA>
19. Danabasoglu, G., Bates, S. C., Briegleb, B. P., Jayne, S. R., Jochum, M., Large, W. G., Peacock, S., y Yeager, S. G. (2012). The CCSM4 ocean component. *Journal of Climate*, 25(5):1361–1389.
20. DGA (2004). CUENCA DEL RIO LAS MINAS. DGA, CADE-IDEPE. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/LasMinas.pdf>
21. DGA (2017), Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.
22. Dirmeyer, P. A., Cash, B. A., Kinter, J. L., Stan, C., Jung, T., Marx, L., Towers, P., Wedi, N., Adams, J. M., Altshuler, E. L., Huang, B., Jin, E. K., and Manganello, J.: Evidence for Enhanced Land–Atmosphere Feedback in a Warming Climate, *J. Hydrometeorol.*, 13, 981–995, 2012.
23. Dracup, J. A., K. S. Lee, and E.G. Paulson, Jr., On the statistical characteristics of drought events, *Water Resour. Res.*, 16(2), 289- 296, 1980a.
24. Dracup, J. A., K. S. Lee, and E.G. Paulson, Jr., On the definition of droughts, *Water Resour. Res.*, 16(2), 297-302, 1980b
25. Dufresne, J. L., Foujols, M. A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., Balkanski, Y., Bekki, S., Bellenger, H., Benshila, R., Bony, S., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Cheruy, F., Codron, F., Cozic, A., Cugnet, D., de Noblet, N., Duvel, J. P., Ethé, C., Fairhead, L., Fichefet, T., Flavoni, S., Friedlingstein, P., Grandpeix, J. Y., Guez, L., Guilyardi, E., Hauglustaine, D., Hourdin, F., Idelkadi, A., Ghattas, J., Joussaume, S., Kageyama, M., Krinner, G., Labetoulle, S., Lahellec, A., Lefebvre, M. P., Lefevre, F., 93 Levy, C., Li, Z. X., Lloyd, J., Lott, F., Madec, G., Mancip, M., Marchand, M., Masson, S., Meurdesoif, Y., Mignot, J., Musat, I., Parouty, S., Polcher, J., Rio, C., Schulz, M., Swingedouw, D., Szopa, S., Talandier, C., Terray, P., Viovy, N., y Vuichard, N. (2013). Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: From CMIP3 to CMIP5, volumen 40.
26. EM-DAT. (2020). Emergency Events Database (EM-DAT). Recuperado el agosto de 2020, de Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED): <https://www.emdat.be/guidelines>

27. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. (2021, 5 marzo). ERA5. ECMWF. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>
28. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E.: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937-1958, doi:10.5194/gmd-9-1937-2016, 2016.
29. Fernández, B. (1997). Identificación y Caracterización de Sequías Hidrológicas en Chile Central. *Ingeniería Del Agua*, 4(diciembre), 37–46.
30. Fowler, K. J. A., Peel, M. C., Western, A. W., Zhang, L., & Peterson, T. J. (2016). Simulating runoff under changing climatic conditions: Revisiting an apparent deficiency of conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 52(3), 1820–1846. <https://doi.org/10.1002/2015wr018068>
31. Givati, A., Thirel, G., Rosenfeld, D., & Paz, D. (2019). Climate change impacts on streamflow at the upper Jordan River based on an ensemble of regional climate models. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 21, 92–109. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.12.004>
32. Gómez T., Morales B. y X. Vargas. 2013. Evaluación de impactos hidrológicos del cambio climático e incertidumbre asociada en dos cuencas andinas.
33. Gonzalez-Reyes, Álvaro et al. Variabilidad de la precipitación en la ciudad de Punta Arenas, Chile, desde principios del siglo XX. *Anales Instituto Patagonia (Chile)* [online]. 2017, vol.45, n.1, pp.31-44. ISSN 0718-686X. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-686X2017000100031>
34. Hirabayashi, Y., Kanae, S., Emori, S., Oki, T., and Kimoto, M.: Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate, *Hydrolog. Sci. J.*, 53, 754–772, 2008.
35. IPCC, 2012. Summary for policymakers. In: C.B Field et al., eds. *Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*. Cambridge: Cambridge University Press.
36. IPCC, 2013: Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
37. Krause, P., Boyle, D. P., y Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5:89–97.
38. Lamb, R., Faulkner, D., Wass, P., & Cameron, D. (2016). Have applications of continuous rainfall–runoff simulation realized the vision for process-based flood frequency analysis? *Hydrological Processes*, 30(14), 2463–2481. <https://doi.org/10.1002/hyp.10882>
39. Le Moine, N. (2008). *Le bassin versant de surface vu par le souterrain: une voie d’amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit ?* [Doctorat Géosciences et Ressources Naturelles].
40. Lima, F. N., Fernandes, W., & Nascimento, N. (2019). Joint calibration of a hydrological model and rating curve parameters for simulation of flash flood in urban areas. *RBRH*, 24. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180066>
41. Luebert, F. & Pliscoff, P. (2008). *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile*. (1a Edición) Santiago, Chile: Editorial Universitaria

42. McKee, T., Doesken, N., y Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Preprints, Eighth Conference on Applied Climatology, January 17 e 22, Anaheim, California, pp. 179 – 184.
43. Melsen, L. A., & Guse, B. (2019). Hydrological Drought Simulations: How Climate and Model Structure Control Parameter Sensitivity. *Water Resources Research*, 55(12), 10527–10547. <https://doi.org/10.1029/2019wr025230>
44. Melsen, L. A., Teuling, A. J., Torfs, P. J., Zappa, M., Mizukami, N., Mendoza, P. A., Clark, M. P., & Uijlenhoet, R. (2019). Subjective modeling decisions can significantly impact the simulation of flood and drought events. *Journal of Hydrology*, 568, 1093–1104. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.046>
45. Ministerio del Medio Ambiente. (2011). SEGUNDA COMUNICACIÓN NACIONAL DE CHILE ANTE LA CONVENCION MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/snc_Chile_Spanish.pdf
46. Ministerio del Medio Ambiente (2018) Atlas de Riesgos Climáticos para Chile, desarrollado por Centro de Investigación del Clima y la Resiliencia (CR2) y el Centro de Cambio Global (CCG-Universidad Católica de Chile). <https://arclim.mma.gob.cl/atlas/about/>
47. Ministerio del Medio Ambiente (2020) Informe del Estado de Medio Ambiente (IEMA), capítulo 17 Eventos Extremos y Desastres. <https://sinia.mma.gob.cl/interactivo-iema2020/>
48. Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1–2), 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
49. Moss, R.H., J.A. Edmonds, K.A. Hibbard, M.R. Manning, S.K. Rose, D.P. van Vuuren, T.R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G.A. Meehl, J.F.B., Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S.J. Smith, R.J. Stouffer, A.M. Thomson, J.P. Weyant and T.J. Wilbanks, 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, Vol 463j11 February 2010jdoi:10.1038/nature08823.
50. Muñoz, A.; Pérez, L., Opazo, E.; Gálvez, V. 2020. Revisión crítica de antecedentes disponibles en temáticas de geología y peligros naturales de la cuenca del río Las Minas relevantes para su monitoreo. Informe Medio Verificador N°4. Programa de transferencia de tecnología y conocimientos para el monitoreo de sectores críticos en el río Las Minas, región de Magallanes y Antártica Chilena. código BIP: 40000435. Dirección Regional de Magallanes y la Antártica Chilena. Servicio Nacional de Geología y Minería. Informe Inédito, 104 p.
51. Muñoz-Castro y Mendoza, IDENTIFICABILIDAD DE PARÁMETROS EN MODELOS HIDROLÓGICOS GR4J: ¿SOMOS CONSISTENTES?
52. Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discusión of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290.
53. Nijssen, B., O'Donnell, G., Hamlet, A., and Lettenmaier, D.: Hydrologic Sensitivity of Global Rivers to Climate Change, *Climatic Change*, 50, 143–175, 2001.
54. ONEMI (Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública), 2001. Temporales Siglo XX. ONE-0978. Preparado por Centro Nacional de Documentación en Protección Civil. 15 p. ONEMI (Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública), 2012. Desborde de río Las Minas. Punta Arenas-Región de Magallanes. Informe técnico consolidado. Ministerio del Interior y Seguridad Pública. Gobierno de Chile.
55. Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., Loumagne, C., 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? *J. Hydrol.* 303, 290– 306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>

56. Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought, volumen 30. US Department of Commerce, Weather Bureau
57. PANCC II 2017-2022 (2017). Plan de Acción Nacional de Cambio Climático. Ministerio de Medio Ambiente. Disponible en: <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/06/PANCCv3-19-10-baja.pdf> (septiembre 2019).
58. Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1–4), 275–289. [https://doi.org/10.1016/s0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/s0022-1694(03)00225-7)
59. Pica-Téllez, A.; Garreaud, R.; Meza, F.; Bustos, S.; Falvey, M.; Ibarra, M.; Duarte, K.; Ormazábal, R.; Dittborn, R. & Silva, I.; 2020. Informe Proyecto ARClím: Atlas de Riesgos Climáticos para Chile. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Centro de Cambio Global UC y Metedata para el Ministerio del Medio Ambiente a través de La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Santiago, Chile.
60. Productos grillados | Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia - CR2 http://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/?cp_cr2met=1
61. Qiang Wang, Youpeng Xu, Jie Wang, Zhixin Lin, Xiaoying Dai & Zunle Hu (2019) Assessing sub-daily rainstorm variability and its effects on flood processes in the Yangtze River Delta region, *Hydrological Sciences Journal*, 64:16, 1972-1981, DOI: 10.1080/02626667.2019.1645332
62. Shaykewich, J. (2000). GUIDELINES ON PERFORMANCE ASSESSMENT OF PUBLIC WEATHER SERVICES (WMO/TD ed., Vol. 1023). World Meteorological Organization. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5301
63. Sorooshian, S., Duan, Q., & Gupta, V. K. (1993). Calibration of rainfall-runoff models: Application of global optimization to the Sacramento Soil Moisture Accounting Model. *Water Resources Research*, 29(4), 1185–1194. <https://doi.org/10.1029/92wr02617>
64. Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485–498. doi:10.1175/bams-d-11-00094.1
65. UMAG (Universidad de Magallanes), 2019a. Actas Sesiones Municipales de Punta Arenas. Biblioteca Digital. Visita 12/07/2019. <http://www.bibliotecadigital.umag.cl/discover?scope=/&query=Actas+de+Sesiones+Municipales+de+Punta+Arenas&submit=Ir&rpp=10>
66. Universidad de Magallanes (2017), Prefactibilidad adecuación de inundación río de las Minas, Punta Arenas, Ministerio de Obras Públicas DOH, región de Magallanes y Antártica Chilena.
67. Urrutia, R. and Vuille, M.: Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century, *J. Geophys.Res.*, 114, D02108, doi:10.1029/2008JD011021, 2009.
68. Valéry, A., Andréassian, V., & Perrin, C. (2014). ‘As simple as possible but not simpler’: What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 1 – Comparison of six snow accounting routines on 380 catchments. *Journal of Hydrology*, 517, 1166–1175. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.059>
69. Valéry, A., Andréassian, V., & Perrin, C. (2014b). ‘As simple as possible but not simpler’: What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2 – Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments. *Journal of Hydrology*, 517, 1176–1187. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.058>

70. Van Werkhoven, K., Wagener, T., Reed, P., y Tang, Y. (2009). Sensitivity-guided reduction of parametric dimensionality for multi-objective calibration of watershed models. *Advances in Water Resources*, 32(8):1154–1169.
71. Vicario, L., García, C. M., Teich, I., & Carlos, J. (2015). Caracterización de las sequías meteorológicas en la región central de la Argentina. *Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*, VI, 153–165.
72. Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscale drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718.
73. Viglione, A., Parajka, J., 2016. TUWmodel: lumped hydrological model for education purposes. URL. <https://CRAN.R-project.org/package=TUWmodel>. r package version 0.1e8
74. Wang, Q., Xu, Y., Wang, J., Lin, Z., Dai, X., & Hu, Z. (2019). Assessing sub-daily rainstorm variability and its effects on flood processes in the Yangtze River Delta region. *Hydrological Sciences Journal*, 64(16), 1972–1981. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1645332>
75. Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T., Okajima, H., Nozawa, T., Kawase, H., Abe, M., Yokohata, T., Ise, T., Sato, H., Kato, E., Takata, K., Emori, S., y Kawamiya, M. (2011). MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geoscientific Model Development*, 4(4):845–872.
76. Yilmaz, K. K., H. V. Gupta, and T. Wagener (2008), A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model, *Water Resour. Res.*, 44, W09417, doi:10.1029/2007WR006716.
77. Zambrano-Bigiarini, M., Nauditt, A., Birkel, C., Verbist, K., Ribbe, L., 2017. Temporal and spatial evaluation of satellite-based rainfall estimates across the complex topographical and climatic gradients of Chile. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 1295–1320. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1295-2017>
78. Zucarelli, G. V. (2013). Identificación de eventos hídricos extremos en la cuenca del río Paraná. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000500012

ANEXOS

ANEXO A: Detalle del cálculo de los índices categóricos de rendimiento del análisis discreto.

Tabla A.1: Detalle de los resultados del POD (valor ideal 1)

Estación	[0,1)		[1,5)		[5,20)		[20,40)		>40	
	SC	C	SC	C	SC	C	SC	C	SC	C
BA	0.81	0.90	0.55	0.61	0.40	0.91	0.00	0.79	0.00	0.64
CM	0.76	0.88	0.63	0.63	0.36	0.87	0.03	0.63	0.17	0.67
CT	0.79	0.89	0.61	0.63	0.32	0.86	0.03	0.75	0.00	0.83
LA	0.75	0.88	0.65	0.63	0.42	0.79	0.22	0.67	0.20	0.80
LL	0.70	0.97	0.55	0.58	0.33	0.79	0.01	0.73	0.00	0.59
LM	0.77	0.95	0.53	0.60	0.26	0.82	0.02	0.86	0.00	0.67
MG	0.74	0.91	0.55	0.59	0.33	0.81	0.00	1.00	0.00	1.00
PA-04	0.83	0.93	0.53	0.57	0.31	0.83	0.04	0.71	0.00	0.60
PA-06	0.87	0.93	0.53	0.55	0.39	0.82	0.12	0.71	0.00	0.00
RLM	0.77	0.89	0.60	0.63	0.31	0.89	0.04	0.75	0.00	0.64

Tabla A.2: Detalle de los resultados del fBIAS (valor ideal 1)

Estación	[0,1)		[1,5)		[5,20)		[20,40)		>40	
	SC	C	SC	C	SC	C	SC	C	SC	C
BA	0.92	0.97	1.40	0.97	0.88	1.49	0.11	1.37	0.00	0.64
CM	0.90	0.96	1.41	1.01	0.71	1.24	0.11	1.00	0.17	0.83
CT	0.92	0.99	1.44	0.91	0.60	1.26	0.13	1.03	0.00	1.00
LA	0.90	0.97	1.29	0.95	0.87	1.30	0.56	1.33	0.20	1.00
LL	0.79	1.04	1.85	0.74	1.12	1.31	0.09	1.13	0.00	0.76
LM	1.00	1.08	1.27	0.79	0.52	1.08	0.09	1.15	0.00	0.72
MG	0.94	1.02	1.32	0.87	0.70	1.12	0.07	1.64	0.00	1.00
PA-04	0.95	1.00	1.39	0.91	0.60	1.22	0.09	1.02	0.00	1.20
PA-06	0.96	1.00	1.31	0.91	0.67	1.27	0.18	1.04	0.00	1.00
RLM	0.92	0.99	1.47	0.93	0.08	1.21	0.08	1.06	0.00	0.77

Tabla A.3: Detalle de los resultados del FAR (valor ideal 0)

Estación	[0,1)		[1,5)		[5,20)		[20,40)		>40	
	SC	C	SC	C	SC	C	SC	C	SC	C
BA	0.12	0.07	0.61	0.37	0.55	0.39	1.00	0.42	1.00	0.00
CM	0.16	0.08	0.55	0.37	0.49	0.30	0.75	0.37	1.00	0.20
CT	0.13	0.10	0.58	0.31	0.47	0.32	0.80	0.27	1.00	0.17
LA	0.16	0.10	0.50	0.33	0.51	0.40	0.60	0.50	1.00	0.20
LL	0.12	0.06	0.70	0.21	0.71	0.40	0.89	0.36	1.00	0.23
LM	0.23	0.12	0.58	0.23	0.50	0.24	0.75	0.26	1.00	0.08
MG	0.21	0.11	0.59	0.31	0.52	0.28	1.00	0.39	1.00	0.00
PA-04	0.13	0.07	0.62	0.37	0.49	0.32	0.50	0.31	1.00	0.50

PA-06	0.10	0.07	0.59	0.40	0.43	0.36	0.33	0.31	1.00	0.00
RLM	0.16	0.09	0.59	0.32	0.48	0.26	0.50	0.29	1.00	0.18

Tabla A.4: Detalle de los resultados del CSI (valor ideal = 1)

Estación	[0,1) SC C	[1,5) SC C	[5,20) SC C	[20,40) SC C	>40 SC C					
BA	0.73	0.85	0.30	0.45	0.27	0.57	0.00	0.50	0.00	0.64
CM	0.66	0.82	0.36	0.46	0.27	0.63	0.03	0.46	0.17	0.57
CT	0.71	0.81	0.33	0.49	0.25	0.62	0.02	0.59	0.00	0.71
LA	0.66	0.80	0.39	0.48	0.29	0.52	0.17	0.40	0.20	0.67
LL	0.64	0.92	0.24	0.50	0.18	0.52	0.01	0.52	0.00	0.50
LM	0.62	0.84	0.30	0.51	0.21	0.65	0.02	0.66	0.00	0.63
MG	0.62	0.81	0.31	0.47	0.25	0.61	0.00	0.61	0.00	1.00
PA-04	0.74	0.86	0.29	0.43	0.24	0.60	0.04	0.54	0.00	0.38
PA-06	0.79	0.87	0.30	0.41	0.30	0.56	0.12	0.54	0.00	0.00
RLM	0.67	0.82	0.32	0.48	0.24	0.68	0.04	0.57	0.00	0.56

ANEXO B: Metodología de calibración, a partir del ajuste de la precipitación mensual

El proceso de calibración contemplo los siguientes pasos:

- i) Análisis de la curva de variación estacional promedio de escorrentía simulada versus observada en el periodo conjunto de calibración-validación (Figura B-1).
- ii) Cálculo de la sobre o subestimación de los datos por parte del modelo a nivel mensual (ecuación 14).
- iii) Análisis de los percentiles de las series mensuales, de aquellos meses que evidenciaran sobre o subestimación mayor a un 10% o de igual forma un $S_{estimación} > 0,1$.
- iv) Cálculo de coeficientes de parde, respecto a percentiles de escorrentía observada versus simulada (ecuación 15).
- v) Aplicación de coeficiente de parde a la precipitación mensual, determinado por el percentil de la escorrentía simulada para el mismo mes (ecuación 16).
- vi) Calibración del modelo con la precipitación ajustada, luego volver al paso i).

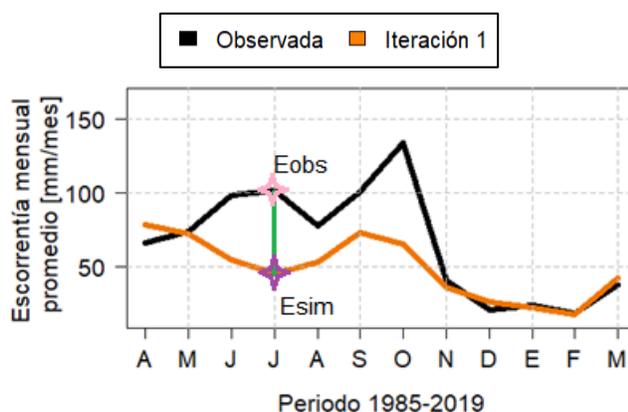


Figura B.1: Ejemplo gráfico del primer paso, del proceso iterativo de calibración

$$S_{estimacion} = \frac{E_{obs}}{E_{sim}} \quad (B.1)$$

$$I_{parde\%}(julio, año_S) = \frac{E_{O\%}(julio, año_O)}{E_{S\%}(julio, año_S)} \quad (B.2)$$

$$Pp_a(julio, año_S) = Pp(julio, año_S) * I_{parde\%}(julio, año_S) \quad (B.3)$$

Donde, $S_{estimación}$ representa el porcentaje relativo de sobrestimación o subestimación entre la escorrentía observada versus la simulada para cierto mes, este ejemplo. $E_{O\%}$ representa la escorrentía perteneciente al percentil % en la serie observada de todos los junios del periodo, que

a su vez se asocia a un año. Luego, $E_{S\%}$ representa la escorrentía del percentil % en la serie simulada, de junio que corresponder a un años. Este último puede o no ser el mismo año. Finalmente, P_{p_a} , es la precipitación de junio del años ajustada.

Este procedimiento se desarrollos tanto para el modelo GR4HCN como para GR5HCN, y llegaba a su fin, en el momento en que $S_{estimación}$ era menor a un 10% para todos los meses.

ANEXO C: Verificación de las forzantes de los GCM frente a forzantes observadas (Producto CR2MET)

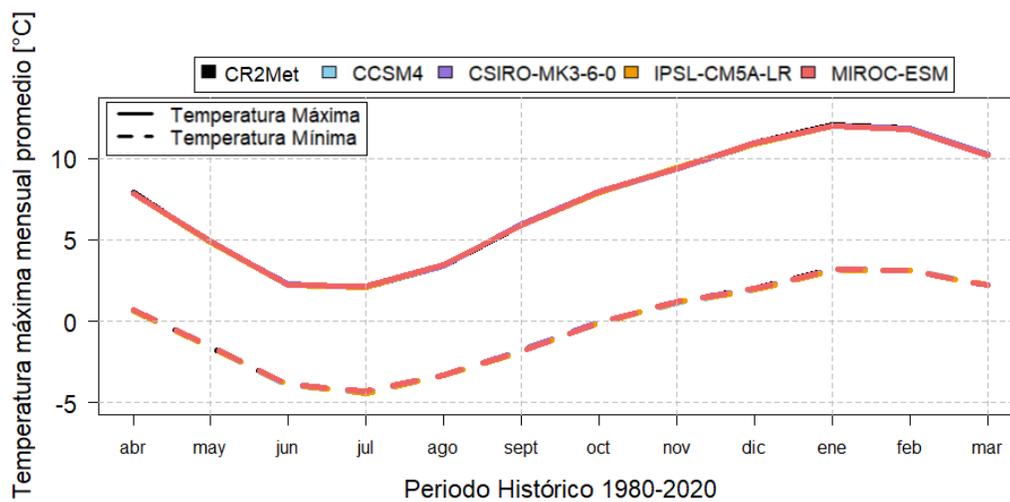


Figura C.1: Análisis de las curvas de variación estacional para temperaturas máxima y mínimas, de los 4 GCM y de la observada.

Tabla C.1 Métricas calculadas para verificar el desempeño de las curvas de variación estacional para la temperatura máxima y mínima de los GCM, respecto a las temperaturas observadas.

GCM	CCSM	CSIRO	IPSL	MIROC
RMSE Tmax [°C]	0.05	0.04	0.05	0.03
RMSE Tmin [°C]	0.04	0.03	0.04	0.04

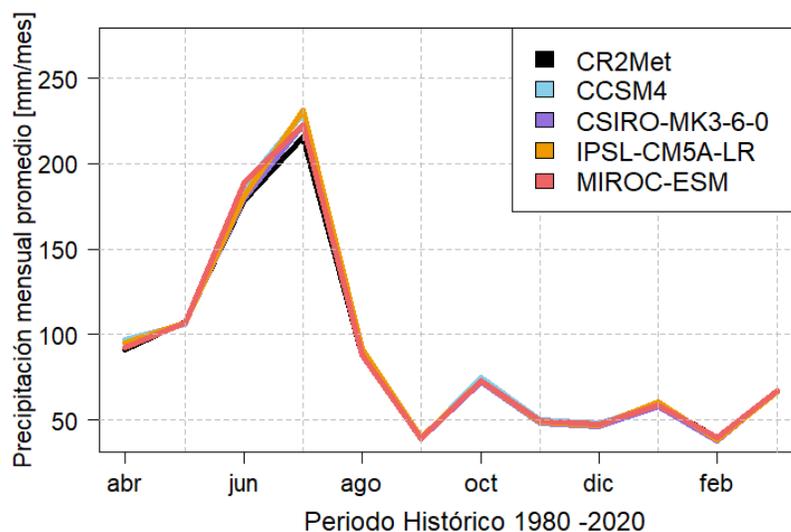


Figura C.2: Análisis de las curvas de variación estacional para precipitación, de los 4 GCM y de la observada.

Tabla C.2: Métricas calculadas para verificar el desempeño de las curvas de variación estacional para la forzantes de precipitación de los GCM, respecto a la precipitación observadas.

GCM	CCSM	CSIRO	IPSL	MIROC
RMSE Pp [mm]	5.4	2.25	4.91	3.75

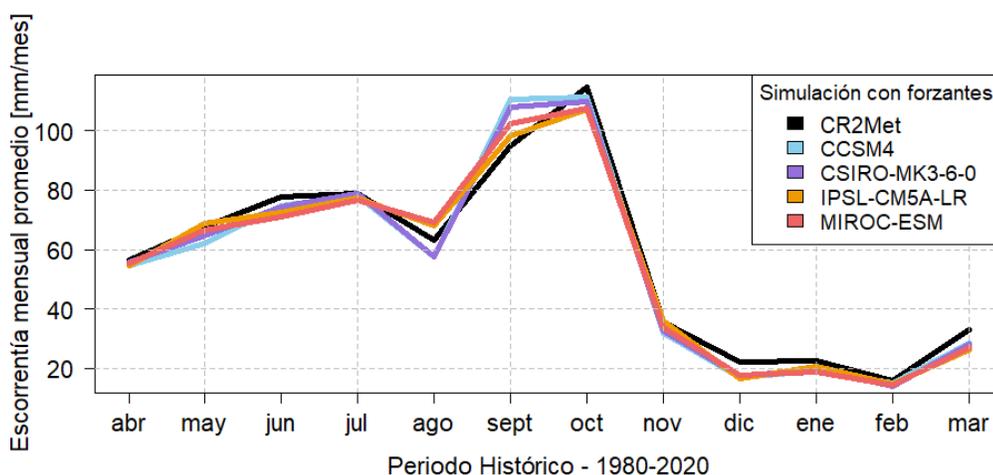


Figura C.3: Análisis de las curvas de variación estacional para escorrentía obtenida por la modelación forzada por los 4 GCM y por la forzada por las observadas.

Tabla C.3: Métricas calculadas para verificar el desempeño de las curvas de variación estacional para la escorrentía obtenida por el modelo forzado por los GCM, respecto a la escorrentía modelada con las forzantes observadas.

GCM	CCSM	CSIRO	IPSL	MIROC
RMSE Esc. [mm]	5.82	5.12	4.15	4.74

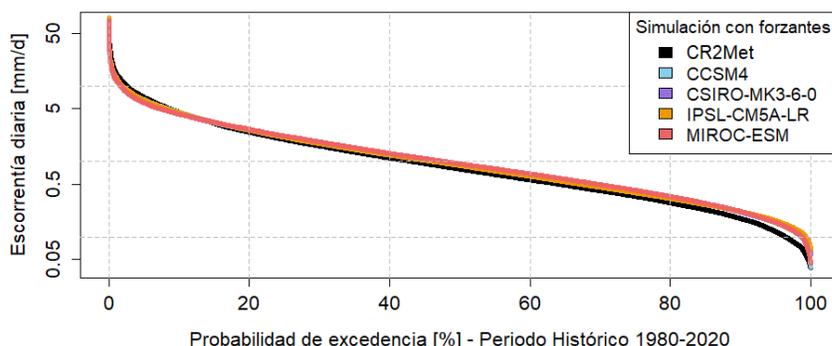


Figura C.4: Análisis de las curvas de duración para escorrentía obtenida por la modelación forzada por los 4 GCM y por la forzada por las observadas.

Tabla C.4: Métricas calculadas para verificar el desempeño de las curvas de duración para la escorrentía obtenida por el modelo forzado por los GCM, respecto a la escorrentía modelada con las forzantes observadas.

GCM	CCSM	CSIRO	IPSL	MIROC
BiasFMS [%]	-0.03	-0.05	-0.03	-0.05
BiasFHV [%]	-18.35	-19.66	-13.97	-19.1
BiasFLV [%]	3.39	3.6	3.57	3.8