



Análisis de la información disponible de recursos renovables para generación utilizada en procesos de optimización del sistema eléctrico

Informe Final

Por encargo de:



Ministerio Federal
de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza
y Seguridad Nuclear

de la República Federal de Alemania

giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



Edición:

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Friedrich-Ebert-Allee 40
53113 Bonn • Alemania

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn • Alemania

Nombre del proyecto:

Descarbonización del sector energético en Chile

Marchant Pereira 150
7500654 Providencia
Santiago • Chile
T +56 22 30 68 600
I www.giz.de

Responsable:

Rainer Schröder/ Mark Falvey

En coordinación:

Ministerio de Energía de Chile
Alameda 1449, Pisos 13 y 14, Edificio Santiago Downtown II
Santiago de Chile
T +56 22 367 3000
I www.minenergia.cl

Título:

Análisis de la información disponible de recursos renovables para generación utilizada en procesos de optimización del sistema eléctrico

Autor:

Meteodata

meteodata

Aclaración:

Esta publicación ha sido preparada por encargo del proyecto “Descarbonización del sector energético en Chile” implementado por el Ministerio de Energía y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH en el marco de la cooperación intergubernamental entre Chile y Alemania. El proyecto se financia a través del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear (BMU). Sin perjuicio de ello, las conclusiones y opiniones de los autores no necesariamente reflejan la posición del Gobierno de Chile o de GIZ. Además, cualquier referencia a una empresa, producto, marca, fabricante u otro similar en ningún caso constituye una recomendación por parte del Gobierno de Chile o de GIZ.

Santiago de Chile, 28 de agosto, 2020

Contenido del informe

1	INTRODUCCIÓN	3
2	METODOLOGÍA	5
2.1	CONCEPTOS GENERALES	5
2.2	MODELOS GLOBALES DE CAMBIO CLIMÁTICO	7
2.3	METODOLOGÍA PARA LA ESTADÍSTICA DE CAUDAL	10
2.3.1	Método para obtener caudal diario	10
2.3.2	Resultados	12
2.3.3	Comentarios finales	14
2.4	MÉTODO PARA CAUDAL EN SITIOS SIN INFORMACIÓN FLUVIOMÉTRICA	14
2.4.1	Introducción	14
2.4.2	Sistema de modelación hidrológica	15
2.4.3	Fluviometría DGA	18
2.4.4	Datos CR2MET	21
2.4.5	Escenarios futuros con escalamiento estadístico	21
2.4.6	Modelo VIC	22
2.4.7	Calibración y evaluación	24
2.4.8	Proyección de caudal	29
2.5	MÉTODO PARA LAS VARIABLES OBTENIDAS DEL API DE ENERGÍAS RENOVABLES	30
2.5.1	Introducción	30
2.5.2	Escalamiento diario Quantile Delta Mapping	31
2.5.3	Generación de datos horarios	32
2.5.4	Variables derivadas	33
2.6	MÉTODO PARA EL CÁLCULO DE EVENTOS EXTREMOS	34
2.6.1	Sequía	34
2.6.2	Eventos de lluvia	35
2.6.3	Nevazones	35
2.6.4	Crecidas extremas	35
2.6.5	Olas de calor	36
3	BASE DE DATOS	38
3.1	INTRODUCCIÓN	38
3.2	VARIABLES	38
3.3	UNIDADES TERRITORIALES	41
3.4	FORMATOS DE DATOS	43
3.4.1	Series de tiempo en formato CSV	43
3.4.2	Archivos de resumen en formato GeoJSON	43
3.5	SELECCIÓN DE GCM A UTILIZAR	44
3.6	DEFINICIÓN DE ESCENARIOS CUALITATIVOS	45
4	REVISIÓN GENERAL DE RESULTADOS	47
4.1	VARIABLES METEOROLÓGICAS PRINCIPALES	47
4.2	ENERGÍA HIDROELÉCTRICA	48
4.2.1	Caudal	48
4.2.2	Generación hidroeléctrica	51
4.3	ENERGÍA SOLAR	53
4.3.1	Insolación	53
4.3.2	Radiación global en paneles solares	54
4.3.3	Producción fotovoltaica	56

4.4	ENERGÍA EÓLICA	59
4.5	EVENTOS EXTREMOS	61
4.5.1	Crecidas	61
4.5.2	Lluvias intensas	63
4.5.3	Nevazones	64
4.5.4	Eventos de viento fuerte	65
4.6	EVENTUALES TRABAJOS FUTUROS	66
5	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS DE CIERRE	67
6	REFERENCIAS	69
	ANEXO A: ANÁLISIS DE SOLICITUDES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE EVENTOS EXTREMOS	71
6.1	METODOLOGÍAS ESPECÍFICAS	73
6.1.1	Sequía	73
6.1.2	Crecidas extremas	73
6.1.3	Vientos extremos	74
6.1.4	Olas de calor	74
6.1.5	Inverno boliviano - Lluvias de verano	74
6.1.6	Tormentas de verano	75
6.1.7	Tormentas de arena	75
6.1.8	Heladas	75
6.1.9	Nevazones	75
6.1.10	Incendios	75
6.1.11	Aluviones	76
6.1.12	El Fenómeno del Niño	76
	ANEXO B: EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE LA ESTADÍSTICA DIARIA	77
6.2	LAGUNA MAULE	77
6.3	LAGUNA INVERNADA	78
6.4	RIEGO MELADO	79
6.5	BOCATOMA MAULE ISLA	80
6.6	LAGUNA LAJA	81
6.7	BOCATOMA CANAL ALTO POLCURA	82
6.8	BOCATOMA POLCURA	83
6.9	ANGOSTURA	84
6.10	EMBALSE RALCO	85
6.11	MAMPIL	86
6.12	LAGO CHAPO	87
7	ANEXO: HOJA RESUMEN DE ELEMENTOS RELEVANTES DE LA BASE DE DATOS	88

1 Introducción

Chile tiene un gran potencial de desarrollo de energías renovables, siendo un país privilegiado en recursos hídricos, eólicos y solares (Santana *et al*, 2014). En años recientes, este potencial se ha ido concretando con un ingreso acelerado de proyectos renovables en el sistema eléctrico nacional, principalmente de energía eólica y solar. La capacidad del sistema para incorporar proyectos nuevos con generación variable depende, en parte, de la capacidad hidroeléctrica de la matriz energética, que contribuye a un 26% de la capacidad instalada (Energía Abierta, 2020), la que funciona como *buffer*, permitiendo un suministro continuo.

La creciente importancia de las energías renovables hace cada vez más importante contar con información fidedigna sobre la disponibilidad y comportamiento del recurso en el largo plazo. Debido a que los recursos renovables dependen de variables atmosféricas (viento, radiación solar y precipitación principalmente) el impacto del fenómeno de cambio climático es especialmente relevante.

En Chile, los impactos del cambio climático han sido abordados ampliamente en la literatura científica (Williams, 2018). Los impactos proyectados más importantes, y que en parte ya se hacen presente, son un aumento de la temperatura y una disminución general de la precipitación. Estos impactos varían geográficamente: el aumento de la temperatura es más agudo en el norte y zona central del país, y menos intenso en el sur y en las zonas costeras (Falvey y Garreaud 2009); mientras que la disminución de precipitación se concentrará en la zona centro-sur del país (Bossier *et al* 2018; Bozkurt *et al* 2018).

La combinación de calentamiento y secamiento presenta un escenario complejo para la gestión de recursos hídricos en el sistema eléctrico, localizados principalmente en la zona centro-sur del país, donde los efectos proyectados del cambio climático resultan más severos. Se hace importante revisar la validez de la información de disponibilidad de este recurso, el que se utiliza en los procesos de optimización del sistema eléctrico. Debido a lo anterior, la Comisión Nacional de Energía (CNE) encargó una consultoría que revisó las estadísticas hidrológicas utilizadas en sus procesos, considerando tanto el impacto de la variabilidad natural como el impacto proyectado por el cambio climático. Este estudio, denominado “Análisis de la Estadística Hidrológica utilizada en los procesos de la Comisión Nacional de Energía” fue realizado por Meteodata en diciembre 2019 (en adelante Estudio CNE2019). El estudio analizó los efectos de la variabilidad natural y el cambio climático en la estadística hidrológica de las cuencas asociadas a las centrales hidroeléctricas del país, y entregó una nueva base de datos de estadísticas que se recomienda utilizar en los procesos de planificación para el periodo 2020 a 2050, ya que fue desarrollada tomando en cuenta el impacto del cambio climático.

Hay menos información disponible sobre el impacto del cambio climático en los recursos renovables eólicos y solares. Las variables asociadas a dichos recursos dependen de fenómenos muy locales (topografía, nubes) y su representación en los modelos de proyección de cambio climático es menos confiable que las principales variables que fuerzan los procesos hidrológicos (precipitación y temperatura). Sin embargo, la robustez de los cambios en la circulación atmosférica sobre Chile proyectados por los modelos globales (una expansión hacia el sur del anticiclón subtropical del Pacífico Suroriente), sugiere que estas variables también podrían experimentar cambios sistemáticos en el futuro (Garreaud y Falvey, 2008).

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, por encargo del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de la República Federal de Alemania (BMU), en el marco de su proyecto “Descarbonización del Sector Energía en Chile” del programa de Energías Renovables y Eficiencia Energética, 4e, apoya al Ministerio de Energía en actividades destinadas a contribuir al cumplimiento de las metas de Chile para la protección del clima a través de una transición energética sostenible.

En el contexto anterior, en la presente consultoría, GIZ encargó a Meteodata el presente estudio, denominado “Análisis de la información disponible de recursos renovables para generación utilizada en procesos de optimización del sistema eléctrico”, se plantea como objetivo ampliar el análisis de la estadística hidrológica y aplicar la metodología para examinar la disponibilidad futura de otros recursos renovables, tales como los recursos eólico, solar e hidrología de pequeña escala, con el objetivo de integrar los resultados a procesos que realiza el Ministerio de Energía, como por ejemplo el de Planificación Energética de Largo Plazo (PELP).

La estructura del informe es como sigue. En el capítulo 2 se describen las diversas metodologías que se aplicaron para analizar el impacto de cambio climático en los recursos renovables. En el capítulo 3 se presenta una descripción detallada de la estructura y formato de las bases de datos que se entreguen junto con el presente informe. En el capítulo 4 se agrega una breve descripción de las principales consecuencias del cambio climático en los recursos renovables analizados en el presente proyecto. Finalmente, en el capítulo 5 se entregan recomendaciones y conclusiones de este estudio.

2 Metodología

2.1 Conceptos generales

La información básica para evaluar el impacto del fenómeno de cambio climático en los recursos de energía renovable en Chile proviene de los llamados Modelos Generales de Circulación (*GCM*, por sus siglas en inglés), desarrollados en el marco del proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (*Coupled Model Intercomparison Project*, *CMIP*; Taylor *et al*, 2012). Los modelos *GCM* buscan representar el sistema planetario compuesto por la atmósfera, los océanos y las masas de tierra. De esta forma, se obtienen múltiples series que representan estados posibles del sistema climático, en un mismo periodo de tiempo, bajo un mismo escenario de forzamiento atmosférico, considerando tanto las forzantes radiativas como la composición química atmosférica. Además, con este planteamiento, estos modelos buscan extrapolar las condiciones que regirán la atmósfera en periodos futuros, utilizando para esto escenarios proyectados de las variaciones de condiciones atmosféricas. Para el presente estudio, al igual que en el estudio CNE2019, se utilizan las proyecciones obtenidas considerando un escenario de desarrollo **RCP8.5**, según lo definido en *CMIP5*. Este escenario es el que más se asimila a las condiciones actuales y el que pronostica una mayor tasa de emisiones durante el siglo XXI.

Los resultados de los *GCM*, que son públicos, permiten obtener series de valores para una amplia gama de variables meteorológicas relevantes para las energías renovables. Por ejemplo, las bases de datos de *CMIP5* incluyen resultados para el viento y la radiación solar, variables que, en principio, se podrían usar directamente para una proyección del recurso eólico y solar. En el caso de la simulación hidrológica, las variables de precipitación y temperatura se pueden usar como forzantes para un modelo hidrológico que estima la magnitud de caudales, tal como se hizo en el estudio CNE2019.

Una debilidad importante de los datos de los *GCM* es su baja resolución espacial, que varía entre 80 a 400 Km por cada unidad de modelación. Este rango de valores en ningún caso es suficiente para representar adecuadamente la variabilidad meteorológica de un país como Chile, que tiene un ancho promedio de aproximadamente 200 Km y se caracteriza por una geografía muy variada y compleja.

Para poder aplicar la información provista por los modelos globales a una escala espacial regional, es necesario realizar un escalamiento espacial (*downscaling*) de las variables de interés. En el presente estudio, al igual que el estudio CNE2019, se aplica un método de regionalización estadístico. Este tipo de método se basa en el supuesto de establecer relaciones estadísticas entre la información de los *GCM* y los datos observados, las cuales son posteriormente proyectadas sobre los datos a futuro.

El método de escalamiento más apropiado depende de qué variable se trate y la escala de tiempo (intervalo) de los datos. En el presente estudio se generan datos a nivel diario, e incluso horario, a través del escalamiento regional de las variables mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1: Métodos de escalamiento regional utilizados para las variables consideradas en el presente proyecto. La sección que contiene una descripción detallada del método y la manera de aplicarlo es indicada en la última columna.

Variable	Variables derivadas	Metodología	Sección
Precipitación	Lluvia, nieve	Scaled Distribution Mapping	2.4.5
Temperatura	-	Quantile Delta Mapping	2.4.5, 2.5.4
Caudal	Generación hidroeléctrica	Modelo Físico VIC	2.3, 2.4
Velocidad de viento	Generación eólica	Quantile Delta Mapping	2.5.2
Radiación Solar	Generación fotovoltaica	Quantile Delta Mapping	2.5.3

El método para aplicar en el escalamiento estadístico de las temperaturas diarias, el viento y la radiación solar es el “*Quantile Delta Mapping, QDM*” (Cannon *et al*, 2015), que ha sido exitosamente utilizado en el escalamiento de estas variables (Michelangeli *et al*, 2012). Este método preserva los cambios absolutos (utilizados típicamente para la temperatura) en los cuantiles de las distribuciones de probabilidad de cada variable, corrigiendo al mismo tiempo los sesgos en la distribución de frecuencia de la variable simulada, respecto de la referencia. En el caso de la precipitación, esta variable es escalada según el método “*Scaled Distribution Mapping*” *SDM* (Switanek *et al*, 2017). Esta metodología aborda explícitamente tanto los cambios en la variación de la frecuencia como de los montos de las precipitaciones, al mismo tiempo que respeta las variaciones proyectadas por los modelos. Adicionalmente, en el caso de las precipitaciones, se aplica una corrección final de sesgos sistemáticos metodológicos para asegurar que la variabilidad de los modelos se ajusta adecuadamente a las observaciones.

El procedimiento general (dibujado esquemáticamente en la Ilustración 1) consiste en la obtención y escalamiento de datos de referencia para el clima actual, y luego la aplicación de la técnica QDM para obtener series de tiempo para el periodo futuro. Para ciertas variables, como, por ejemplo, temperatura, viento e insolación, el uso de QDM permite obtener proyecciones realistas para el clima futuro. En el caso de la precipitación, la técnica *SDM* permite obtener proyecciones corregidas tanto en magnitud como en frecuencia. Sin embargo, aplicar este tipo de correcciones no se puede hacer directamente sobre variables asociadas al recurso hídrico (caudales), ya que los GCM no entregan caudal como variable de salida, al no ser una variable atmosférica. Por ende, es necesario aplicar un modelo hidrológico que utiliza las forzantes meteorológicas (precipitación y temperatura) para generar simulaciones de caudal que incorporen así los efectos del cambio climático. Esto fue, esencialmente, el método que se aplicó para obtener los resultados del estudio CNE2019.

Para la simulación de caudal y/o de generación hidroeléctrica se ocupa la metodología descrita en CNE2019, que consiste en el uso del modelo hidrológico VIC (*Variable Infiltración Capacity*, Liang *et al* 1994, Hamman *et al* 2017). Sin embargo, para los fines del presente estudio, se implementaron ajustes en el sistema de modelación para poder generar resultados en intervalos diarios y para extender el periodo de modelación hasta

el año 2060. Por otra parte, el proyecto también considera la entrega de proyecciones para cuencas sin estadística hidrológica, lo cual demanda el desarrollo de un nuevo sistema de modelación, que se detalla en la **sección 2.4** del presente capítulo.

En el caso de las variables asociadas a la energía eólica y solar, la información de referencia se extrae del API de energías renovables de MINENERGÍA. El API permite extraer variables relacionadas a las energías renovables desde una base de datos horarios que cubre Chile Continental (incluyendo además la Isla de Pascua y el archipiélago de Juan Fernández) con una resolución espacial de 1 Km y para un periodo que se extiende entre los años 1980 y 2017. Si bien, los datos de la API se basan en la modelación numérica, representan la mejor información disponible hoy en día para la evaluación de potencial de energías renovables, y se pueden considerar como *pseudo*-observaciones para fines del presente estudio. En la **sección 2.5** se entrega información sobre el procedimiento para esta fuente de datos. Finalmente, en la **sección 2.6** se describe una metodología para el cálculo de indicadores de eventos extremos.

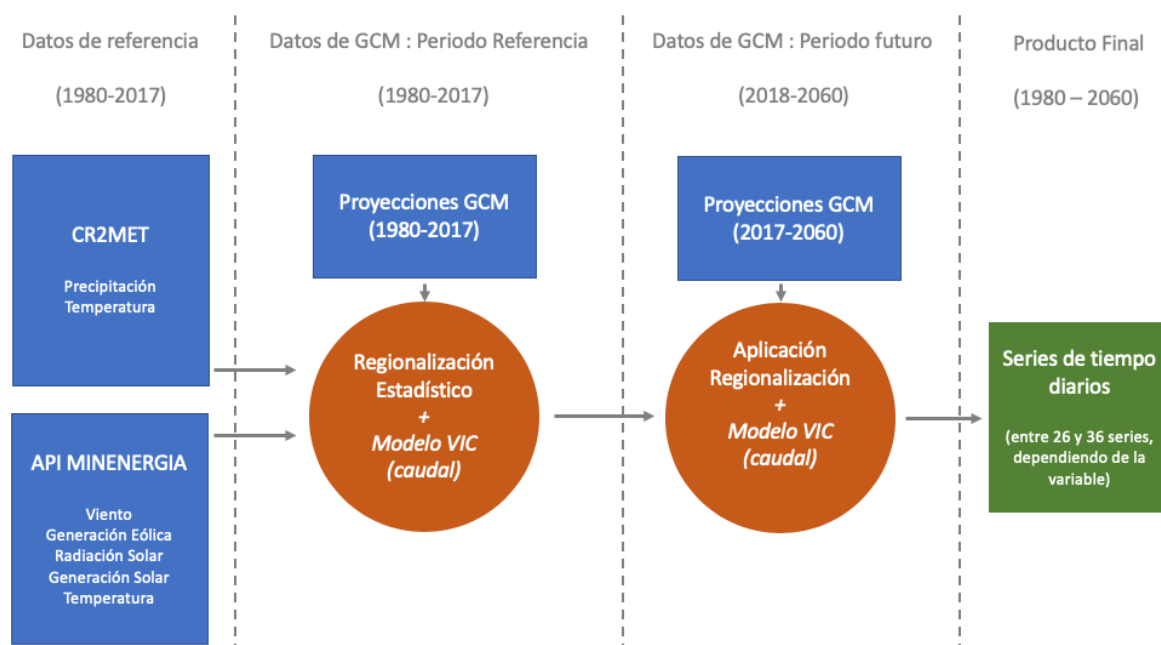


Ilustración 1: Diagrama esquemático de procedimiento general para generar proyecciones para el clima futuro basados en los modelos globales GCM.

2.2 Modelos Globales de Cambio Climático

El calentamiento global es un fenómeno de escala planetaria, que consiste en la alteración del sistema climático a través del aumento de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Estas alteraciones en general se perciben como un aumento de la temperatura, pero no están limitadas a esto. Existen grandes diferencias a nivel regional sobre las consecuencias del calentamiento global, y mientras que en algunas regiones del planeta se esperan aumentos de precipitaciones, en la región centro-sur de Chile se proyecta lo contrario. Esto es particularmente crítico para varias regiones de Chile, las cuales son zonas vulnerables a un déficit de precipitaciones. Esta vulnerabilidad se

evidencia en el conjunto de impactos socio-económicos y ecológicos provocados por la sequía prolongada que afecta varias regiones de Chile desde 2010 (Garreaud, 2017), y que sigue actualmente.

Varios estudios basados en observaciones han descrito cambios en el régimen de precipitación de Chile y su impacto en la hidrología regional, coherentes con las tendencias esperadas en respuesta al forzamiento antrópico (Boisier, 2018; Boisier, 2016). En particular, en Boisier, 2016 se analizó un periodo reciente con una tendencia negativa de precipitación muy marcada en Chile central (1979-2014). Se identificó que la causa de la tendencia observada tiene un origen tanto natural como antrópico, este último contribuyendo en aproximadamente un tercio de la señal total del cambio.

Como se describió anteriormente, se combinarán series meteorológicas que den cuenta de la situación de cambio climático, con modelos hidrológicos calibrados para cada una de las cuencas. Así, se obtendrán simulaciones hidrológicas homologables para un periodo base y para proyecciones futuras, en función de la información de estos modelos globales de clima. En este estudio se utilizarán las proyecciones obtenidas considerando un escenario de desarrollo RCP8.5, según lo definido en CMIP5. Este escenario es el que más se asimila a las condiciones actuales de proyección.

Sin embargo, las cuatro alternativas de escenario RCP que existen (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5) presentan un desarrollo similar durante el periodo 2020-2040 en lo referente a composición química atmosférica (que, a efectos prácticos, es la forzante principal de los modelos GCM) y comienzan a divergir notoriamente posteriormente a 2040. La definición de cada escenario RCP hace referencia al nivel de radiación adicional que permanece en la atmósfera a finales de siglo con respecto a un contexto preindustrial. Estos modelos, al ser simulaciones numéricas comprehensivas de la atmósfera, permiten obtener series de valores para todas las forzantes meteorológicas relevantes, requeridas para utilizar los modelos hidrológicos. Se utilizan las proyecciones estimadas por aproximadamente 26 modelos distintos, desarrollados por 14 instituciones, equipos o centros de investigación que se describen en la Tabla 2. Adicionalmente, en algunos casos se cuenta con más de un *ensemble*, es decir, con más de una ejecución de un mismo modelo. En la misma tabla, se muestra cuantos ensembles¹ presenta cada modelo.

¹ Un ensemble corresponde a una simulación. Puede existir más de uno al inicializar el modelo con condiciones iniciales ligeramente distintas, las que resultan en una reproducción distinta del sistema climático.

Tabla 2. Listado de modelos de circulación global a utilizar, de los cuales se obtendrán proyecciones de cambio climático. Fuente: elaboración propia.

Modelo	Centro de Investigación / Institución a cargo	Resolución		Ensembles
		Latitud [°]	Longitud [°]	
ACCESS1-0	<i>Centre for Australian Weather and Climate Research</i>	1,25	1,88	1
ACCESS1-3		1,25	1,88	1
BNU-ESM	<i>Beijing Normal University</i>	2,79	2,81	1
CCSM4	<i>National Center of Atmospheric Research</i>	0,94	1,25	2
CESM1-BGC		0,94	1,25	1
CESM1-CAM5		0,94	1,25	1
CMCC-CESM	<i>Euro-Mediterranean Center on Climate Change</i>	3,44	3,75	1
CMCC-CMS		3,71	3,75	1
CMCC-CM		0,75	0,75	1
CNRM-CM5	<i>National Centre for Meteorological Research - France</i>	1,40	1,41	1
CSIRO-Mk3-6-0	<i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization</i>	1,86	1,88	3
CanESM2	<i>Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis.</i>	2,79	2,81	3
FGOALS-s2	<i>LASG/IAP.</i>	1,66	2,81	1
GFDL-CM3	<i>Geophysical Fluid Dynamics Laboratory</i>	2,00	2,50	1
GFDL-ESM2G		2,02	2,00	1
GFDL-ESM2M		2,02	2,50	1
IPSL-CM5A-LR	<i>Institut Pierre Simon Laplace</i>	1,89	3,75	2
IPSL-CM5A-MR		1,27	2,50	1
IPSL-CM5B-LR		1,89	3,75	1
MIROC-ESM-CHEM	<i>MIROC team</i>	2,76	2,81	1
MIROC-ESM		2,76	2,81	1
MPI-ESM-LR	<i>Max Planck Institute</i>	1,87	1,88	3
MPI-ESM-MR		1,87	1,88	1
MRI-CGCM3	<i>Meteorological Research Institute (Japan)</i>	1,12	1,13	1
MRI-ESM1		1,12	1,13	1
NorESM1-M	<i>Norwegian Climate Center</i>	1,89	2,50	1

2.3 Metodología para la Estadística de Caudal

En el marco del proyecto “Análisis de la información disponible de recursos renovables para generación utilizada en procesos de optimización del sistema eléctrico” se deben desarrollar simulaciones a una escala temporal diaria, para todas las cuencas incorporadas en el estudio CNE 2019, aplicado sobre un conjunto de cuencas que reunían las características necesarias para ser modelizadas. Sin embargo, en dicho estudio el procesamiento de la información fue realizado a escala semanal, acorde a la escala temporal que presenta la estadística hidrológica, por lo que en una primera instancia no sería posible utilizar dichos parámetros directamente para obtener resultados diarios.

En el proceso de calibración de los modelos que se tienen en CNE, 2019, debido a que la información se encontraba promediada cada 7 días, los parámetros asociados a los flujos de corto plazo no eran prioritarios. Esto se traduce en que los parámetros asociados a la variabilidad intra-semanal favorecieron aquellas configuraciones donde escurrimientos fueran relativamente constantes, o de baja tasa de cambio.

Sin embargo, existe una alternativa que permitiría modificar la distribución temporal de los caudales para representar las crecidas diarias de forma apropiada. Al modificar uno de los parámetros asociados al hidrograma unitario, es posible aumentar la variabilidad de los caudales diarios sin afectar significativamente las medias de los caudales semanales.

En particular, existe un parámetro asociado al escurrimiento de la escorrentía superficial, el cual se relaciona con la proporción de caudal que escurre rápidamente, cuya modificación fue estudiada como una alternativa para representar de mejor forma los caudales diarios.

Con el fin de ajustar las calibraciones realizadas con la información semanal, se realizaron pruebas modificando dicho parámetro a un valor menor, para aumentar la variabilidad de los caudales diarios.

En esta sección, se presenta los resultados para verificar que dicha modificación a la distribución temporal de los caudales conserve la validez de las calibraciones realizadas a nivel semanal, pero que a la vez permita representar adecuadamente la información de caudales diarios.

2.3.1 Método para obtener caudal diario

La metodología de adaptación de parámetros para pasar de escala semanal a diaria consiste en alterar el valor del parámetro que distribuye temporalmente la fracción de escorrentía superficial que escurre directamente, en lugar de infiltrar hacia el suelo (que luego es liberada de forma paulatina). La fracción que determina qué porcentaje de escorrentía escurre directamente y qué porcentaje infiltra se mantendrán constantes. La alteración del parámetro de escorrentía supone que toda escorrentía superficial que se genere fluirá por el cauce durante el mismo día. Esto permitiría representar de mejor forma las crecidas diarias que no fueron consideradas en el proceso de calibración utilizando la estadística semanal.

Sin embargo, para validar esta metodología, es necesario contar con información fluviométrica a escala temporal diaria. Afortunadamente, dentro de las cuencas que fueron calibradas en el proyecto CNE2019 existe un conjunto para las cuales hay información fluviométrica que cumple 2 condiciones relevantes:

1. Tiene un largo de registro superior a 5 años.
2. Al promediarlas de forma equivalente a lo definido para la estadística hidrológica, se tiene que los valores resultan equivalentes.

Para realizar esta validación, se consideraron las cuencas descritas en la Tabla 3. En ella, se detalla el nombre del punto de control, así como también la macro cuenca a la que corresponde. Se observa que las cuencas seleccionadas abarcan una gran distribución geográfica, representando distintos tipos de climas y latitudes.

Tabla 3. Cuencas que se usarán para validar la homologación de parámetros.

ID	Punto de control	Cuenca
1	Laguna Maule	Maule
2	Laguna Invernada	Maule
3	Riego Melado	Maule
4	Bocatoma Maule Isla	Maule
5	Laguna Laja	Laja
6	Bocatoma Canal Alto Polcura	Laja
7	Bocatoma Polcura	Laja
8	Angostura	Biobío
9	Embalse Ralco	Biobío
10	Mampil	Duqueco
11	Lago Chapo	Lago Chapo

La verificación de la modificación a realizar sobre los parámetros de calibración será considerada exitosa si es que se cumplen los siguientes criterios:

1. Los resultados a nivel semanal no presentan una variación del error medio absoluto superior al 25%.
2. Los caudales diarios simulados de mayor valor (probabilidad de excedencia <5%) se encuentran en un rango de +/- 20% de los valores observados.

Es importante destacar que la comparación a realizar se da entre caudales simulados con los modelos obtenidos del proyecto CNE y caudales observados que, si bien, son equivalentes al ser agregados temporalmente a la estadística, no obtendrán necesariamente los mismos indicadores de desempeño que los resultados previos del proceso de calibración. Esto se debe a la desagregación temporal a la que se someten los resultados de los modelos.

2.3.2 Resultados

La Tabla 4 presenta las variaciones obtenidas en las simulaciones hidrológicas al modificar el parámetro asociado al porcentaje de escurrimiento superficial directo, con respecto a las simulaciones que se obtienen con los parámetros originales.

En general, se observa que los valores de error medio absoluto aumentan dentro del rango que se ha definido como admisible. Se observa que en algunos casos la modificación incluso conlleva una disminución del error (caso de Laguna Invernada).

Tabla 4: Variaciones del error medio absoluto al modificar los parámetros de escurrimiento superficial directo.

ERROR MEDIO ABSOLUTO	MODIFICACIÓN PROPUESTA	MODELO ORIGINAL	VARIACIÓN DE E.M.A. [%]
Laguna Maule	5.7	5.5	3.6
Laguna Invernada	6.9	14	-50.7
Riego Melado	34.6	28.1	23.1
Bocatoma Maule Isla	7.5	6.7	11.9
Laguna Laja	17.7	15.3	15.7
Bocatoma Canal Alto Polcura	2.1	1.8	16.7
Bocatoma Polcura	10.9	10.9	0.0
Angostura	39.3	28.5	37.9
Embalse Ralco	54.5	45.9	18.7
Mampil	5.4	4.6	17.4
Lago Chapo	24.4	20.9	16.7

El único caso donde no se respeta que la variación de error medio absoluto sea menor a 25% corresponde a la cuenca de Angostura. Sin embargo, considerando los valores de caudales medios de esta cuenca, el error resulta despreciable. Adicionalmente, Angostura posee solo cuatro años de información de caudales diarios, lo cual resulta ser un registro muy corto de observaciones, además de que los últimos años presentan una tendencia a ser hidrológicos secos, mientras que el registro de calibración utilizado tiene más de 60 años.

La Tabla 5 muestra los valores obtenidos de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), el cual queda definido por las siguientes ecuaciones.

$$\beta = \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}}$$

$$\alpha_{KG} = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}}$$

$$r_p = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) - \mu_{obs})(Q_{sim}(i) - \mu_{sim})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) - \mu_{obs})^2\right) \left(\sum_{i=1}^n (Q_{sim}(i) - \mu_{sim})^2\right)}}$$

$$R_{KG} = 1 - \sqrt{(\beta - 1)^2 + (\alpha_{KG} - 1)^2 + (r_p - 1)^2}$$

Donde: μ_{sim}, μ_{obs} representan la media de las simulaciones y de las observaciones
 $\sigma_{sim}, \sigma_{obs}$ representa la desviación estándar del conjunto de simulaciones y observaciones
 Q_{sim_i}, Q_{obs_i} representa el caudal en el instante i, simulado y observado respectivamente.

La ventaja de este índice es que incorpora información sobre la correlación de ambas series, así como también de la diferencia de valores medios y de variabilidad. Su rango de valores queda definido entre $-\infty$ y 1, siendo 1 el valor óptimo que se interpreta como una representación perfecta.

Tabla 5: Variaciones del índice de KGE al modificar los parámetros de escurrimiento superficial directo.

EFICIENCIA DE KLING-GUPTA	MODIFICACIÓN PROPUESTA	MODELO ORIGINAL	VARIACIÓN DE KGE
Laguna Maule	0.46	0.48	-0.02
Laguna Invernada	0.67	0.78	-0.11
Riego Melado	0.67	0.81	-0.14
Bocatoma Maule Isla	0.68	0.82	-0.14
Laguna Laja	0.79	0.83	-0.04
Bocatoma Canal Alto Polcura	0.79	0.78	0.01
Bocatoma Polcura	0.77	0.77	0.00
Angostura	0.59	0.73	-0.14
Embalse Ralco	0.84	0.89	-0.05
Mampil	0.55	0.37	0.18
Lago Chapo	0.68	0.6	0.08

Los resultados muestran que, en general, y como era esperable, existe una tendencia a la baja del valor, pero existen algunas cuencas en las que se observan aumentos de KGE.

En aquellos casos donde se tienen disminuciones de valores, estas tienden a estar asociadas con una baja en la sección de correlación temporal de los valores, lo que ocurre principalmente en cuencas de escurrimientos más regulados y, por lo general, de régimen nival o nivo-pluvial. Sin embargo, existe un subconjunto de cuencas donde el índice de desempeño mejora (a pesar de que sus valores de error medio absoluto no), donde se consideran mejoras asociadas a la temporalidad del escurrimiento de caudales, como, por ejemplo, en el caso de las cuencas de Lago Chapo y Mampil. Estas cuencas, asociadas a un tipo de régimen más dominado por un régimen pluvial, ven aumentada su capacidad de predicción de crecidas de caudales diarios, lo que es el objetivo de esta modificación.

Sin embargo, ya sea en aquellas cuencas donde se mejora o disminuye el índice de desempeño, los valores de KGE que se obtienen utilizando los parámetros modificados permanecen en un rango de valores que se encuentra dentro de lo publicado en la literatura científica pertinente.

En el Anexo es posible encontrar una comparación gráfica de las series de caudales obtenidas para cada una de las cuencas, utilizando los parámetros sin modificar y con la modificación propuesta para mejorar la representación de series de caudales diarios.

2.3.3 Comentarios finales

En base a lo reportado en este documento, se ha planteado una alteración a los parámetros de los modelos calibrados en el proyecto CNE, 2019 que permita que las simulaciones realizadas con ellas representen adecuadamente los fenómenos de crecidas diarias.

La evaluación por medio de dos índices, el error medio absoluto y el KGE, presentan resultados variados, en los que algunas cuencas mejoran y otras empeoran sus resultados. A pesar de estos resultados divergentes, los índices de desempeño se mantienen en un rango de valores admisibles, por lo que su utilización resulta factible. Sin embargo, al analizar el tipo de régimen hidrológico asociado a cada cuenca, es posible observar una relación directa entre mejoras significativas con cuencas del tipo pluvial, mientras que los descensos están asociados a cuencas que presentan un régimen de tipo nival o nivo-pluvial.

Considerando esto, se acepta que esta modificación de parámetros resulta válida para mejorar la representación de los caudales de flujo rápido en los hidrogramas, y será aplicado en todos los modelos cuya cuenca presente una altitud media menor a 2.500 metros.

2.4 Método para caudal en sitios sin información fluviométrica

2.4.1 Introducción

En la sección anterior se describió el desarrollo de una proyección de caudal diario para las cuencas incluidas en los procesos del Coordinador Eléctrico Nacional (en adelante, Coordinador). Esta base de datos considera todas las cuencas relevantes en la

generación hidroeléctrica del país actualmente. Sin embargo, para la evaluación del impacto del cambio climático sobre la hidroelectricidad en Chile, es necesario considerar también la posibilidad de nuevos proyectos hidroeléctricos que no figuran dentro de la estadística de caudales del Coordinador.

En el caso de cuencas que no cuentan con control hidrológico (que no tienen estadística ni estación fluviométrica de terceras fuentes equiparable) no es posible aplicar el mismo proceso de calibración que se aplica a las cuencas con estadística. Para poder simular estas cuencas es necesario contar con una versión espacialmente distribuida del modelo VIC, cuya configuración se adapte adecuadamente a las diferentes condiciones hidrológicas del centro y sur de Chile. Para lograr dicho fin se realizó una calibración distribuida del modelo ocupando datos de una gran cantidad de estaciones fluviométricas (más de 250) operadas por la Dirección General de Aguas (en adelante DGA) que cuentan con registros de buena calidad y completitud temporal. Con esto como base, se puede obtener una proyección para cualquier sitio utilizando los parámetros de calibración derivados de la estación fluviométrica más cercana, (o de mayor similitud hidrológica), tomando en cuenta factores como la distancia y la diferencia en la altura media.

En esta sección, se describe el desarrollo de un modelo hidrológico que permite realizar proyecciones de caudal de la manera señalada anteriormente. En la sección 2.4.2 se presenta una descripción general del sistema de modelación, y en secciones posteriores se describen en mayor detalle los aspectos específicos del sistema, tales como las observaciones de caudal utilizadas (sección 2.4.3), las forzantes meteorológicas presentes y futuras (secciones 2.4.4 y 2.4.5), el modelo hidrológico (sección 2.4.6), el proceso de calibración y evaluación (sección 2.4.7) y el método final para obtener una proyección de caudal para un emplazamiento arbitrario (sección 2.4.8).

2.4.2 Sistema de modelación hidrológica

Para los fines del presente estudio se ha implementado un sistema de modelación hidrológico que en principio es capaz de generar proyecciones de caudal diario bajo escenarios de cambio climático para cualquier lugar geográfico en el centro y sur del país. El sistema tiene varios componentes, las cuales se presentan gráficamente en la Ilustración 2.

El “núcleo” del sistema es el modelo hidrológico VIC (*Variable Infiltration Capacity*), el mismo modelo que se utilizó para realizar las proyecciones hidrológicas para las cuencas del Coordinador, pero aplicado de una forma muy diferente a lo realizado en dicho estudio.

Calibración y Evaluación

Proyección

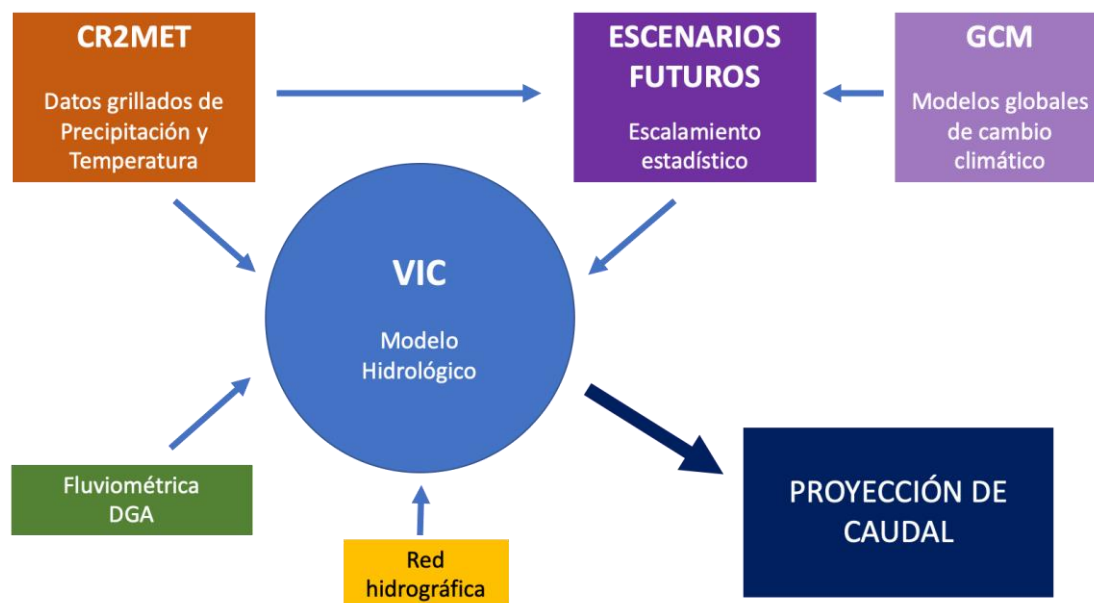


Ilustración 2: Diagrama esquemático que representa el sistema de modelación hidrológica empleado para obtener proyecciones de caudal en sitios donde no existen observaciones fluviométricas.

En la presente aplicación, el modelo VIC es ejecutado de una manera espacialmente distribuida, sobre una grilla regular de resolución $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ (aproximadamente 5 km) que cubre todo Chile continental (y parte de Argentina) entre los límites de latitud de 56°S y 32°N (ver Ilustración 3).

La implementación del modelo consistió, primero, en realizar un procedimiento de calibración y evaluación, utilizando datos diarios de caudal de la red de monitoreo de la DGA. La calibración considera del orden de 260 puntos de monitoreo ubicados dentro del dominio computacional. Para el periodo de calibración, que se extiende de 1980 a 2018, el modelo VIC es forzado con campos meteorológicos (precipitación y temperatura) del producto CR2MET, que tiene una resolución horizontal igual a la del modelo VIC.

Una vez terminada la calibración del sistema, se implementaron las rutinas que permitan obtener proyecciones hidrológicas para cualquier cuenca hidrográfica dentro del dominio del modelo. Para este fin se utilizaron métodos de escalamiento estadístico para confeccionar bases de datos de temperatura y precipitación basadas en los resultados de los GCM. Utilizando estos datos meteorológicos, en combinación con los resultados de la calibración, resulta posible aplicar el modelo VIC para generar un ensemble de proyecciones de caudal para el periodo 1980 a 2060.

En las siguientes secciones se describe cada aspecto del sistema de modelación en mayor detalle.

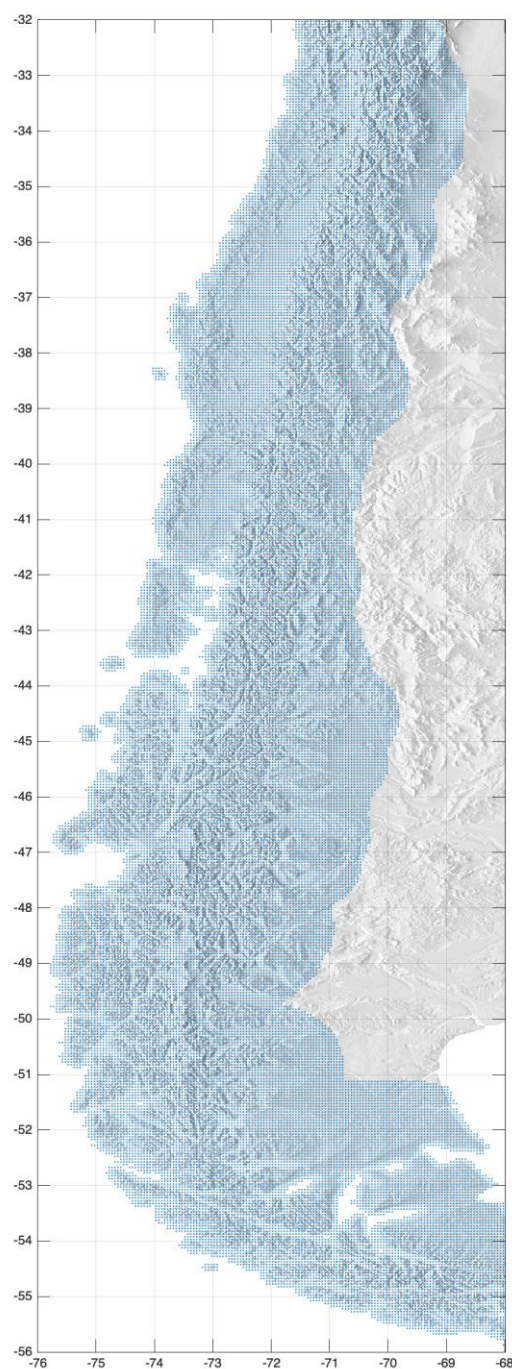


Ilustración 3: Dominio de la modelación hidrológica. La zona azul muestra la grilla del modelo, que tiene una resolución de 0.05 grados de latitud y longitud (aproximadamente 5 km). Adicionalmente, cada punto de grilla es subdividido en bandas de elevación en intervalos de 500 metros.

2.4.3 Fluviometría DGA

Los datos fluviométricos (es decir, mediciones de caudal diario) juegan un rol fundamental en el sistema de modelación, ya que son la piedra angular en que se basan los procesos de calibración del modelo y la evaluación de su desempeño. Los datos utilizados en el presente proyecto provienen de estaciones de monitoreo que forman parte de red hidro-meteorológica de la DGA. Para acceder a la información, se utilizó una base de compilados para el Explorador Climatológico del Centro para Clima y Resiliencia de la Universidad de Chile ².

En la zona de la modelación hay un total de 560 estaciones con datos de caudal diario (Ilustración 4). Sin embargo, muchos de ellos no se pudieron utilizar debido a problemas de la información. En particular, se descartaron estaciones que no cumplieron con los siguientes requerimientos básicos:

- Contar con al menos 5 años de datos de caudal diario, dentro del periodo de definido para la calibración (1980 a 2018).
- No tener problemas de calidad evidentes en la inspección visual de los datos.
- Ser representativas de un régimen hidrológico natural o cercano a natural.
- Contar con coordenadas suficientemente precisas para poder ubicar la estación en la red de hidrográfica utilizada en la modelación.

Finalmente, luego de aplicar estos criterios para la selección de estaciones, se mantuvieron 262 sitios de medición para la evaluación y calibración del modelo. La Ilustración 5 muestra la ubicación de los sitios seleccionados.

² <<http://explorador.cr2.cl>>

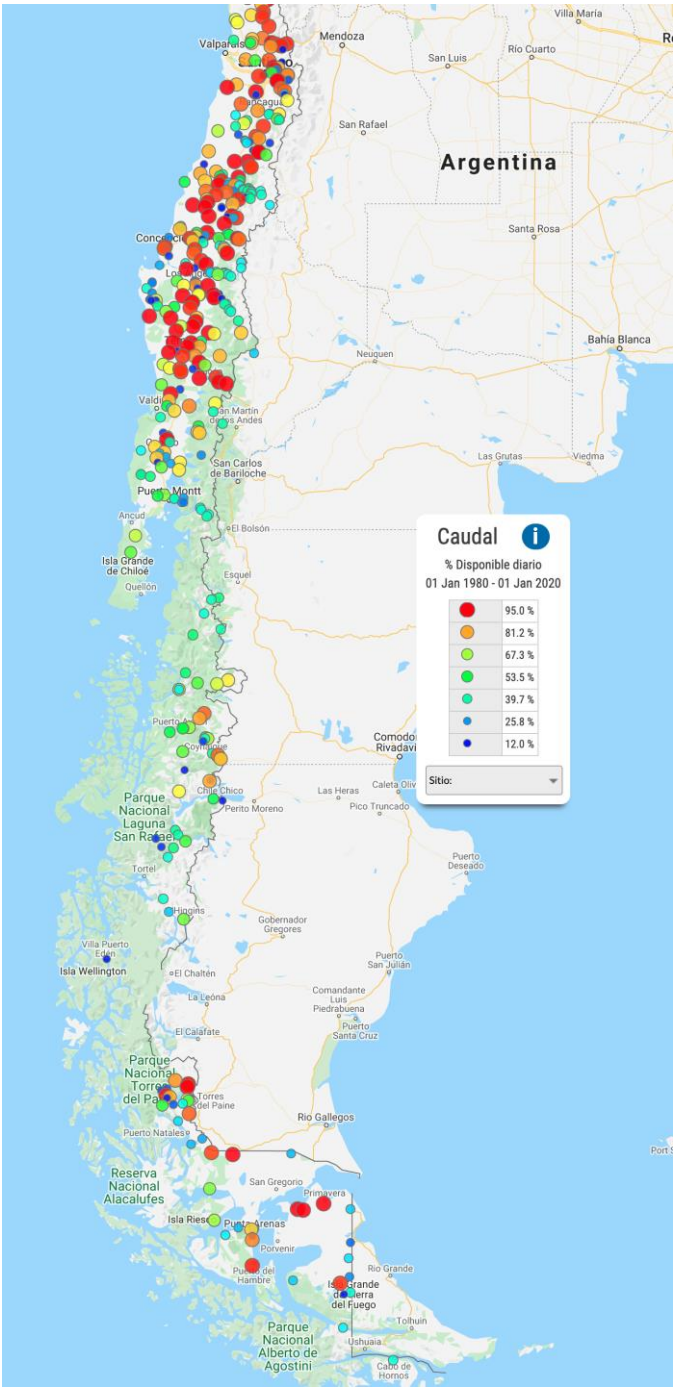


Ilustración 4: Base de datos de caudal diario disponible a través del Explorador Climático de la Universidad de Chile. Cada punto representa una estación fluviométrica, el color del punto indica la disponibilidad de datos en el periodo 1980 a 2020. En total, hay un total de 530 estaciones en la zona de interés. Sin embargo, muchas de ellas tienen pocos registros o claramente no representan un régimen natural. Luego de realizar una inspección visual de todas las series de datos, se quedó con un sub-conjunto de 262 estaciones para usar para la calibración del modelo VIC.

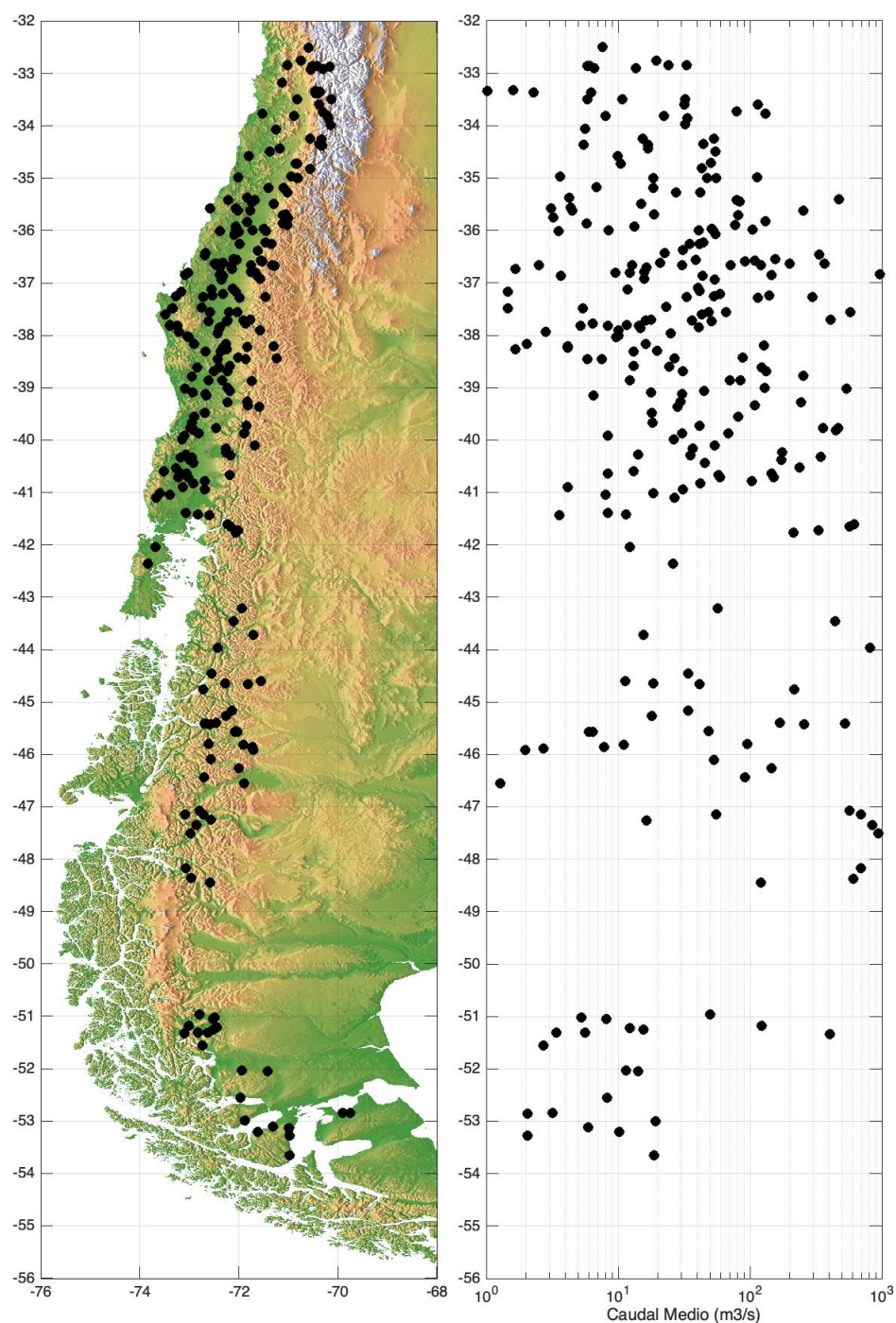


Ilustración 5: Estaciones fluviométricas utilizadas para la preparación del modelo hidrológico. Son 262 estaciones en total. El panel izquierdo muestra la ubicación de las estaciones, mientras que el panel derecho muestra el caudal medio según latitud. Es posible ver que el rango de caudales es de tres órdenes de magnitud (entre 1 y 1000 m³/s).

2.4.4 Datos CR2MET

Para generar las forzantes meteorológicas en el periodo histórico, se utilizó la base de datos CR2MET³. Este producto consiste en una base de datos de precipitación y temperaturas (medias, máximas y mínimas), a una escala temporal **diaria** y en una grilla de resolución aproximada de **5x5 km**. Esta base de datos fue desarrollada originalmente en el marco del proyecto Actualización del Balance Hídrico Nacional, desarrollado por la Universidad de Chile para la DGA y en colaboración con el Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR2). Este producto entrega información para todo el periodo comprendido entre los años 1979 y 2018.

El desarrollo de este producto se basa en una regionalización de variables proporcionadas por un reanálisis, usando como referencia de ajuste registros locales y de información de percepción remota. Un reanálisis corresponde a un producto meteorológico que transforma grandes cantidades de observaciones de diversos tipos (mediciones en superficie, radiosondeos, información satelital) de múltiples variables (temperatura, presión, viento, humedad, etc.) en estimaciones continuas globales, para un periodo histórico. Esto se logra utilizando técnicas de modelación atmosféricas y oceánicas en conjunto con sistemas de asimilación de datos. Dentro de estos productos de reanálisis, destaca el denominado ERA5, cuya sigla hace referencia a *European Center for Medium-Range Weather Forecasts*, (ECMWF ReAnalysis), en su quinta versión. Adicionalmente, se integra información topográfica en el desarrollo de los productos, para representar de mejor forma la compleja orografía del país, desde modelos de elevación digital satelital *Shuttle Radar Topography Mission* SRTM.

Debido a que las forzantes meteorológicas se encuentran en una escala espacial más fina (25 km²) que las bandas de elevación (habitualmente en los cientos de km²), esta información es agregada espacial y, consecuentemente, a las bandas de elevación definidas anteriormente. El tipo y uso de suelo de cada cuenca quedará determinado para cada una de las bandas por medio de procesos geoespaciales aplicadas a las capas de *MODIS Land cover*.

2.4.5 Escenarios futuros con escalamiento estadístico

Los GCM descritos anteriormente se basan en simulaciones numéricas, que abarcan todo el globo terrestre, utilizando grillas relativamente gruesas, mayores a 1,5° de resolución generalmente. Sin embargo, la escala actual de trabajo corresponde a un análisis hidrológico regional, que se está desarrollando a una resolución espacial de 0,05°x0,05°. Esta diferencia de resoluciones genera un problema de compatibilidad de la información, ya que la información de estas grillas globales no representa adecuadamente efectos locales, como por ejemplo los asociados a topografía y relieve, por lo que es imposible utilizarla directamente en estudios de carácter regional.

Para poder aplicar regionalmente la información provista por los modelos globales a una escala espacial regional, es necesario realizar un escalamiento de las variables relevantes para el estudio (en este caso, precipitación y temperaturas extremas diarias). Este proceso de escalamiento se puede realizar de múltiples formas: por un lado, existen los escalamientos de tipo físico, que corresponden a ejecutar a una mayor resolución espacial y en un área acotada algún tipo de modelo de circulación global, usando como condiciones de borde las proyecciones realizadas por los mismos GCM.

³ <<http://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>>

Este tipo de escalamiento entrega campos consecuentes y representa adecuadamente la física de toda el área que se defina como región de modelación. Sin embargo, presentan la desventaja que son altamente complejos de implementar y que requieren de muchos recursos computacionales para ser realizados.

Como alternativa a los métodos de escalamiento físicos, surgen entonces los métodos de regionalización estadísticos. Estos métodos se basan en el supuesto de establecer relaciones estadísticas, definidas en un periodo de línea base, entre la información de los GCM o reanálisis, y los datos observados, los cuales son eventualmente proyectados sobre los datos a futuro bajo alguna configuración. Estos métodos presentan la ventaja de que resultan computacionalmente rápidos de calcular.

Dentro del desarrollo del estudio, se aplicarán métodos de escalamiento estadístico a la información provista tanto por los reanálisis históricos como por los GCM, con respecto a la información utilizada como base en el periodo de calibración (CR2MET), de modo de homologar las series meteorológicas en el periodo histórico. De esta forma, se podrá asegurar la validez de eventuales comparaciones. El método propuesto de escalamiento estadístico para las temperaturas diarias extremas sigue lo propuesto en Cannon, 2015. Este método preserva los cambios absolutos (utilizados típicamente para temperatura) en los cuantiles de las distribuciones de probabilidad de cada variable, corrigiendo al mismo tiempo los sesgos en la distribución de frecuencia de la variable simulada, respecto de la referencia. En el caso de la precipitación, esta variable es escalada según lo presentado por Switanek, 2017. Esta metodología aborda explícitamente tanto los cambios en la variación de la frecuencia como de los montos de las precipitaciones. Adicionalmente, en el caso de las precipitaciones, se aplica una corrección final empírica para asegurar que la variabilidad de los modelos se ajusta adecuadamente a las observaciones.

2.4.6 Modelo VIC

La modelación hidrológica se realiza mediante el modelo hidrológico *Variable Infiltration Capacity* (VIC), cuyo esquema conceptual se presenta en la Ilustración 6. Este modelo es de tipo distribuido y de base física. En su planteamiento, representa procesos de evapotranspiración, acumulación y derretimiento de nieve, interceptación, lagos, entre múltiples otros. A nivel de suelo, este se encuentra representado por tres distintos estratos y permite la representación de distintos tipos y usos de suelo en cada unidad de modelación. En este modelo, se busca representar todos los flujos al interior de la cuenca. Por ejemplo, la evapotranspiración corresponde a la suma de la evaporación desde suelo desnudo, evapotranspiración desde la vegetación y la evaporación del agua acumulada en el follaje. La acumulación puede ser superficial (nieve o glaciares, por ejemplo) o subterránea, la que se representa mediante las humedades del suelo en las distintas capas. La precipitación corresponde a la única entrada de agua al elemento de modelación. La correcta representación de estos procesos resulta crítica si es que se pretende utilizar este modelo para estudios de sensibilidad a variaciones climáticas, ya que distintos procesos representan distintas sensibilidades a diferentes variables.

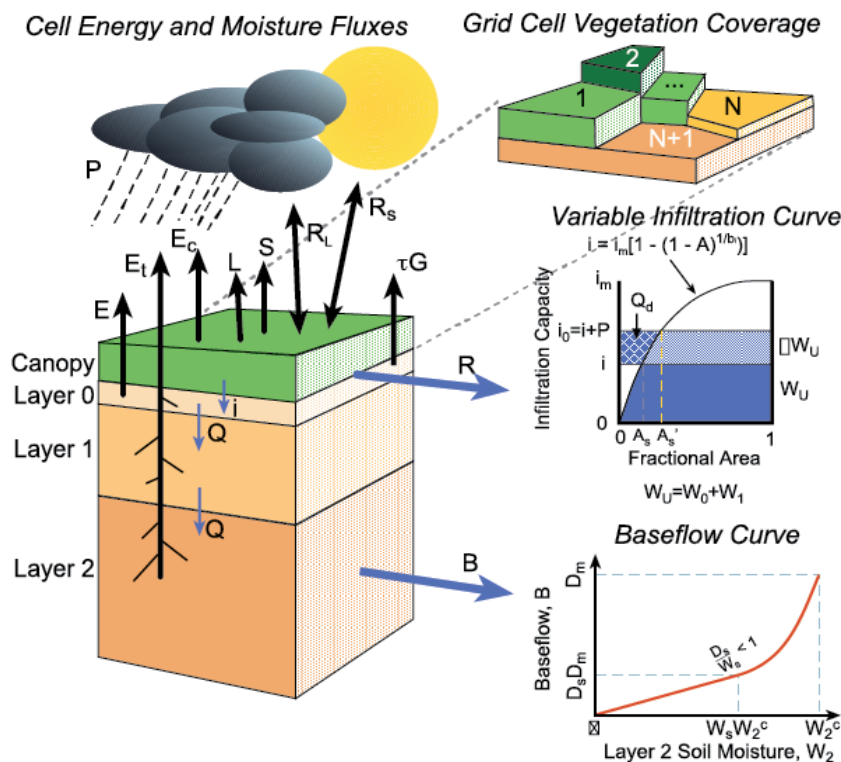


Ilustración 6: Esquema conceptual del planteamiento físico del modelo VIC. En ella se representan los principales flujos de cada celda de modelación: P (precipitación sobre la celda de modelación), R (escorrentía directa), B (flujo base), E (evaporación desde el suelo), Et (evapotranspiración), Ec (evaporación desde el follaje de vegetación), i (infiltración al suelo), Q (flujos entre distintos estratos de suelo), L, S (flujos de calor latente y sensible respectivamente), RL y RS (flujos de onda larga y corta, respectivamente) y τG (flujo de calor desde el suelo). Además, los esquemas central e inferior del costado derecho presentan esquemas de los planteamientos físicos de descarga de R y B, que dan cuenta del planteamiento físico del modelo, el cual puede ser revisado en detalle en Liang, 1994. El panel superior del costado derecho da cuenta de la versatilidad del modelo que permite la inclusión de diferentes coberturas de suelo para una misma unidad de modelación. Fuente: *VIC model Overview*.

Este modelo no presenta un esquema de ruteo de caudales, por lo que la agregación temporal de los caudales obtenidos desde cada unidad debe ser realizada de forma externa. En este caso, el ruteo de caudales desde cada unidad de modelación se hace por medio del tiempo de concentración de cada banda con respecto al punto de definición de la cuenca, suponiendo velocidades de flujo constante en el río.

La ecuación principal de este modelo se basa en un balance de masa simple, donde el único ingreso de agua posible es a través de la precipitación. En función de esto, el modelo opera básicamente con la ecuación:

$$P = R + B + E + E_T + E_C + \Delta S$$

Donde:

P = precipitación

R = escorrentía superficial, asociada al estrato superficial

B = flujo base, asociado al estrato inferior

E = evaporación desde suelo

E_T = evapotranspiración desde vegetación

E_C = evaporación del agua acumulada en el follaje

ΔS = variación de almacenamiento en los estratos, asociado a flujos verticales que ocurren, así como a los términos de R y B .

Debido a que este modelo presenta una base física y que cada uno de estos términos representa un proceso, cada uno de ellos está parametrizado por complejas ecuaciones cuya descripción escapa a los alcances de este informe. Para mayor detalle de estos términos se refiere al lector a Liang, 1994.

Un aspecto importante en el presente estudio es el tratamiento de glaciares en el modelo hidrológico. Los glaciares juegan un rol muy importante en el comportamiento los caudales observados en muchas cuencas de interés hidroeléctrico a lo largo del país. En este sentido, es importante señalar que el modelo VIC no tiene un módulo que permita representar los glaciares directamente. Generalmente, en zonas donde existen glaciares, el modelo VIC simula una capa de nieve que crece paulatinamente durante el periodo de simulación. Por ende, la contribución del glaciar no es simulada por el modelo, por lo cual fue necesario implementar una parametrización adicional para representar su impacto. Luego de considerar varias posibles estrategias para la inclusión de afluentes de glaciares en el modelo, se decidió utilizar el método de estimación basado en los “grados día”, lo que es una técnica relativamente simple que se ha aplicado en otros estudios de la zona (Schaffer et al, 2013, Schaffer et al 2015). Este método agrega una escorrentía adicional definido de la siguiente manera:

$$Q_{dd} = D_f * \max(0, T_{\max})$$

donde T_{\max} es la temperatura del aire sobre el glaciar (calculado en bandas de altura). Q_{dd} es la escorrentía ($m^3 / \text{área}$). D_f es un *Degree Day Factor* (parámetro de calibración). El uso del factor grados días es muy importante para representar el ciclo anual del caudal en cuencas que tienen una cobertura de glaciares significativa.

El modelo hidrológico VIC es usado para simular la escorrentía en cada punto geográfico de la malla computacional del modelo. Para generar estimaciones de caudal en los ríos de alguna zona de interés, es necesario aplicar un modelo de “routing” (o transporte) que simula el movimiento de agua por la red de cauces y ríos hasta desembocarse en el mar. Para este fin, se utiliza una red hidrográfica derivado de un modelo digital de terreno, usando el software TauDEM y la base de datos de elevación topográfica SRTM de 30 metros de resolución.

2.4.7 Calibración y evaluación

Para que un modelo hidrológico logre representar de manera adecuada la hidrología de una cuenca, es necesario realizar un proceso de calibración de los parámetros, donde se ajusten los valores de los parámetros del modelo, de forma tal que los caudales

simulados representen lo mejor posible los caudales observados, según algún índice de desempeño.

Para los fines de presente estudio, se utilizó el índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE) como métrica para determinar la calidad de la calibración del modelo. El KGE, ya mencionado en la sección 2.3.3 del presente informe, es una métrica de desempeño que mide simultáneamente la calidad del caudal simulado en términos de correlación temporal, rango de variabilidad y valor medio. El KGE es comúnmente utilizado en la literatura para evaluar modelos hidrológicos. El valor óptimo de este índice es 1, y se hace notar que en la literatura usualmente es posible encontrar que un modelo hidrológico se considera con buen desempeño si es que presenta valores superiores a 0,7, no obstante, un valor sobre 0,5 se puede considerar como aceptable para muchas aplicaciones.

La calibración del modelo fue realizada para cada estación fluviométrica de forma independiente, utilizando un esquema de validación cruzada (*k-folding*) en que se repite la calibración 5 veces, cada vez dejando un segmento de validación 20% de la serie fuera. El conjunto de parámetros obtenido a partir de calibración con el 80% restante es utilizado para simular los caudales del periodo de validación. Los caudales simulados en los periodos de validación representan una muestra completamente independiente de las observaciones, ya que las observaciones del periodo de validación no fueron consideradas en el proceso de generación de los parámetros. Esto permite que la comparación entre los caudales simulados y observados en el periodo de validación sea una representación efectiva de la capacidad predictiva del modelo.

En la Ilustración 7 se muestra los valores obtenidos para el KGE en cada punto donde se desarrolló un modelo hidrológico, distribuidos espacialmente sobre el territorio nacional. Se aprecia que los valores del KGE son generalmente altos (entre 0,7 y 0,9), lo que indica que el desempeño del modelo es bueno para la mayor parte del dominio espacial. Como se indica en la Tabla 2.6, la mediana de KGE es 0,77 y más del 90% de los puntos logran un valor de KGE sobre 0,5.

En la Ilustración 7, es posible notar que los valores de KGE son más bajos en ciertas zonas geográficas. En particular, para los modelos de la región de Magallanes los valores del KGE son claramente menores al resto del dominio, indicando que el modelo VIC tiene más dificultades para resolver las condiciones hidrológicas de esta zona. Al revisar los resultados de las simulaciones, se concluye que los problemas de desempeño en el extremo sur del país son consecuencia de dos factores principales:

- 1) La resolución vertical del modelo (que divide en bandas de 500 metros de altura) no es suficientemente fina para representar correctamente la acumulación de nieve en los cerros de Magallanes, que generalmente son de baja altura;
- 2) El producto CR2MET subestima la precipitación en la zona de Magallanes. Este problema se hace evidente al calcular el coeficiente de escorrentía⁴ para las cuencas en el entorno de Punta Arenas, que muestran valores significativamente mayores a 1, lo que implica que la precipitación del producto

⁴ El coeficiente de escorrentía (R/P) es la razón entre el volumen medio de escorrentía (R) que sale de una cuenca y el volumen de precipitación media sobre la superficie de la cuenca (P).

CR2MET es insuficiente para representar los caudales observadas en las cuencas.

En la zona central (latitudes mayores a 38°S) también se nota la presencia de varios sitios con valores de KGE en un rango relativamente bajo, entre 0,4 y 0,6. En este caso, parece probable que los problemas de la simulación de caudal se deban a la mayor influencia de actividades humanas en la zona, que se caracteriza por un intensivo uso de agua para irrigación y consumo. Por lo tanto, las series de caudal en la zona central de Chile pueden ser significativamente diferente a un régimen natural, lo que pone límites en el nivel de desempeño que se puede obtener con el modelo hidrológico.

Los distintos conjuntos de parámetros hidrológicos obtenidos en cada punto conforman una base de datos sobre la cual es posible realizar estimaciones para cualquier lugar del territorio. Para realizar esto, se recurre a una transferencia de parámetros hidrológicos de un punto a otro, utilizando como criterio el conjunto de valores de la cuenca más cercana.

Para validar la efectividad de esta técnica de transferencia se realiza un proceso de validación del tipo *leave-one-out* (dejar uno fuera). Este tipo de técnica de validación consiste en tomar un punto de la base de datos, excluirlo del análisis, y realizar la técnica de transferencia de parámetros a dicho punto. Así, se cuenta con un valor referencial (el índice obtenido en el proceso de calibración) y con un valor efectivo de la técnica de transferencia aplicada. Este proceso se repite para cada uno de los puntos de la base de datos.

Los resultados de este proceso se presentan tanto en la Tabla 6, en forma de estadísticos, como distribuidos espacialmente en la Ilustración 8, donde se comparan las diferencias entre valor óptimo y de validación para cada punto. Como era esperable, se registra un descenso de los valores de desempeño, donde el valor de la mediana disminuye 0,2 puntos alcanzando un valor de 0,57 y donde un 60% de los puntos superan el umbral del valor 0,5 (en contraste al 91% que se tenía del conjunto de valores calibrados).

Tabla 6: Resumen de la distribución de los valores del KGE obtenidos con la calibración directa del modelo (en que el modelo ocupa los parámetros determinados para el sitio) y después de la transferencia espacial, (en que el modelo ocupa los parámetros obtenidos para el sitio fluviométrico más cercano)

	Mediana	Percentil 5	Percentil 95	Fracción > 0.5
Calibración directa	0.77	0.42	0.89	91%
Transferencia espacial	0.57	-0.34	0.83	60%

La distribución espacial de los cambios no sigue ni favorece ninguna región en especial con mejores o peores desempeños, salvo en el caso de los puntos comprendidos entre las latitudes 43°S y 49°S. En esta área los resultados deben ser utilizados con precaución. Los valores extremos superiores descienden relativamente poco (de 0,89 a 0,83) pero los valores de menor percentil alcanzan valores negativos. Estos valores menores se distribuyen en general a lo largo de todo el país, aunque se concentran en la región anteriormente mencionada.

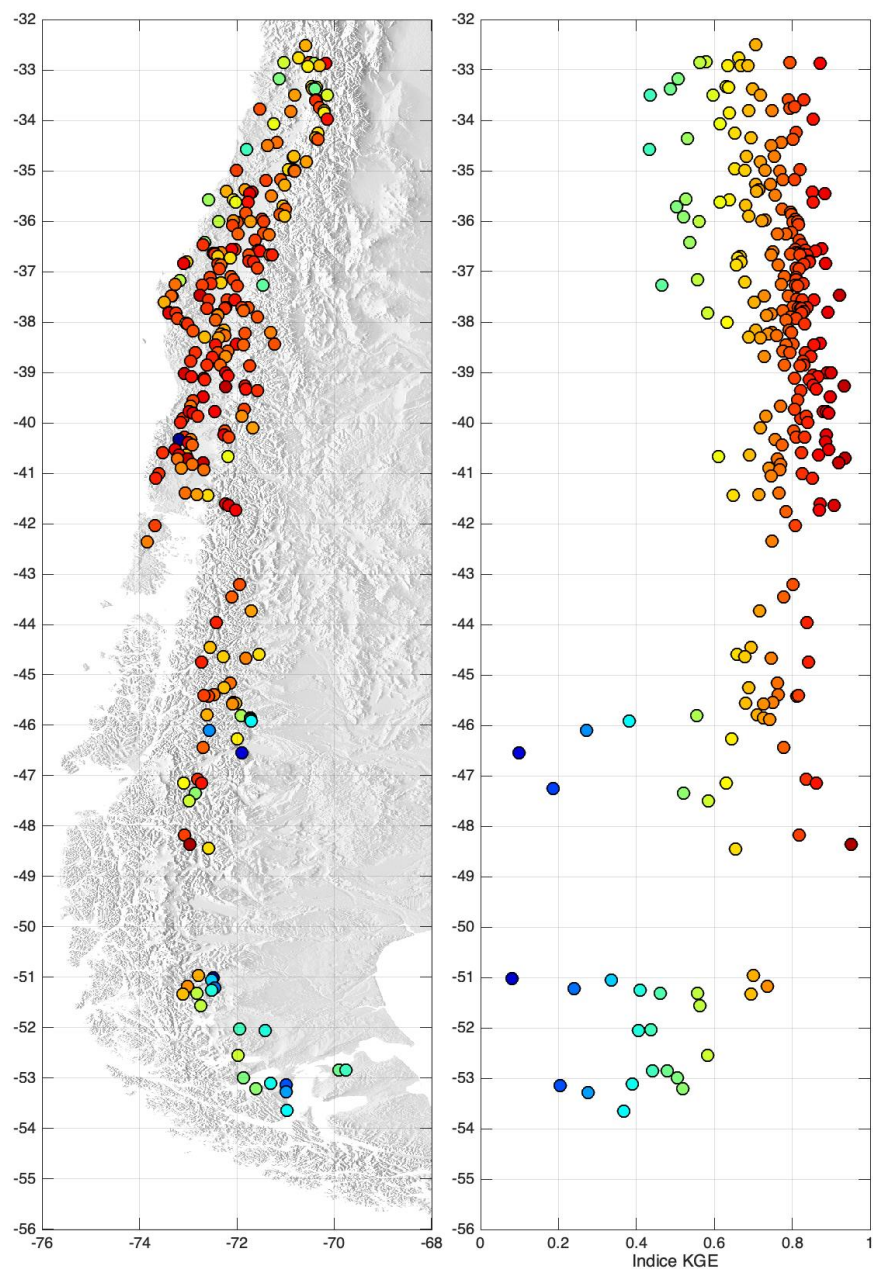


Ilustración 7: Estadística KGE obtenida para los sitios fluviométricos de la DGA. El valor del KGE se indica con el color (azul oscuro = 0, rojo oscuro = 1) de los círculos, tanto en el mapa de la izquierda como en el eje horizontal del panel a la derecha.

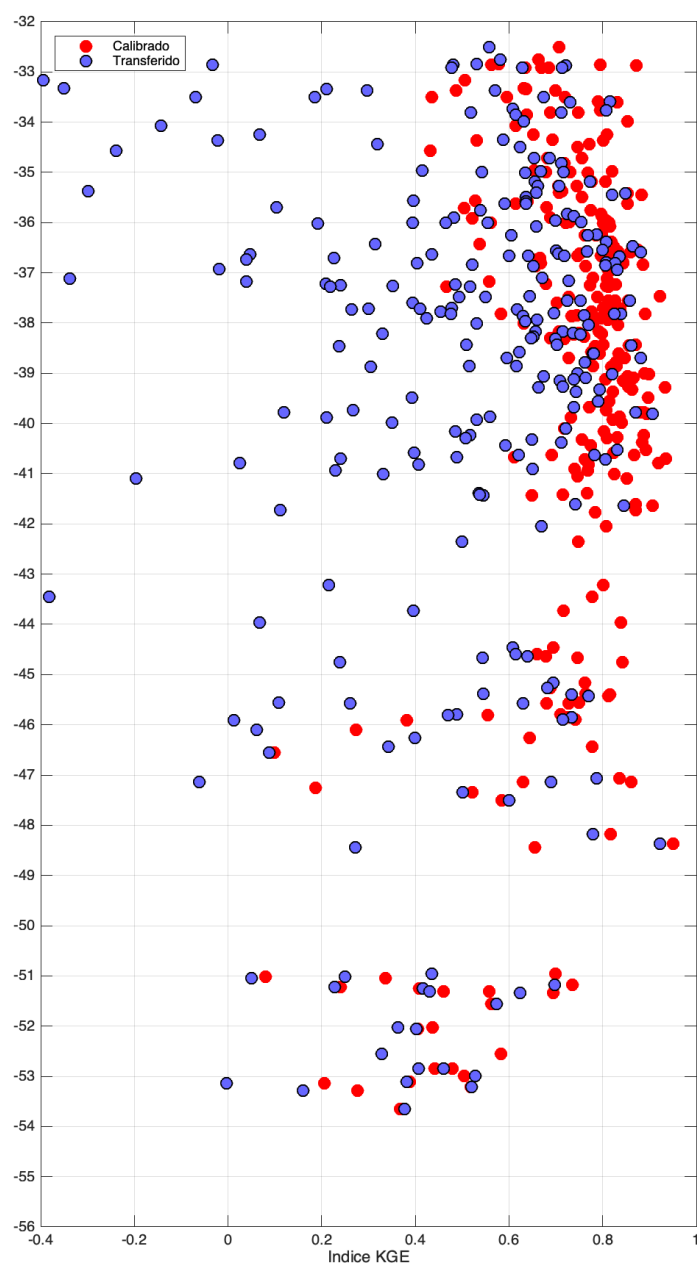


Ilustración 8: Valor del KGE antes y después de la transferencia espacial de los parámetros de calibración. Los puntos rojos muestran el valor de KGE obtenido para cada estación en el proceso de calibración. Los puntos azules muestran el mismo índice de desempeño al aplicar el modelo hidrológico en cada sitio usando los parámetros de calibración obtenidos para la estación más cercana.

2.4.8 Proyección de caudal

Las proyecciones de caudal se definen en función de la transferencia de parámetros de la base de datos desarrollados a potenciales puntos de interés. En esta sección se describe el procedimiento que permite al modelo VIC calibrado obtener proyecciones de caudal para cualquier cuenca dentro del dominio computacional del modelo. Consiste en cinco pasos, los que son descritos a continuación:

1. Primero, es necesario ubicar el punto solicitado en la red hidrográfica del modelo VIC. Dado que la red hidrográfica usada por el modelo es muy detallada, en muchos casos no es evidente cual punto dentro de la red es el que corresponde (ver el ejemplo de la Ilustración 9). Para ubicar correctamente un punto, lo ideal es contar con algún **caudal de referencia ya sea de mediciones puntuales o de orden de magnitud**, el cual permita identificar el río más cercano que tiene un caudal medio similar. En caso de no contar con un caudal de referencia, se busca el punto más cercano al punto geográfico de interés que presente un caudal mayor a 1 m³/s.
2. Una vez que se determina la ubicación del punto solicitado, se delimita la cuenca hidrográfica asociada por medio de un análisis de la red hidrográfica. Luego, se calcula el punto geográfico que corresponde a centro de la cuenca y se calcula su altura media.
3. Se calcula la **distancia** (D) entre el centro de la cuenca solicitada y los puntos centrales de cada una de las cuencas consideradas en la calibración. La métrica de distancia considera tanto la distancia horizontal (dx) entre los puntos, como la diferencia en altura media de las cuencas (dz).

$$D = \sqrt{f_x dx^2 + f_z dz^2}$$

Donde f_x y f_z tienen valores de 0.01 y 1.0, respectivamente. La inclusión de estos factores de ponderación busca generar que una diferencia de elevación media de 1000 metros sea equivalente a una distancia horizontal de aproximadamente 100 km.

4. Se obtienen los parámetros de la calibración para el punto de control que se encuentra a la menor distancia D de la cuenca a simular.
5. Se ejecuta el modelo VIC del punto de interés con los parámetros identificados del paso 4 para cada uno de los modelos GCM disponibles en la base de datos descrita en la sección 2.4.5. Cada simulación entrega datos de caudal diario para el periodo entre los años 1980 y 2060.

La ejecución de una proyección de caudal para un punto en particular toma en promedio unos 3 minutos.

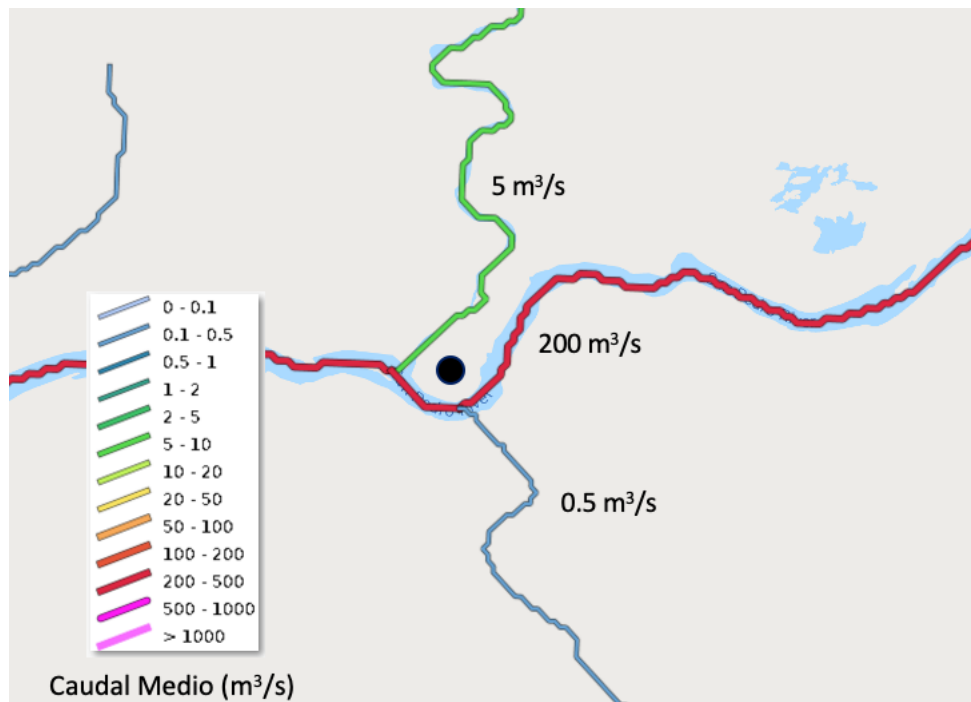


Ilustración 9: Ejemplo de un caso difícil para la selección del río asociado a un punto geográfico. En el ejemplo, el punto de interés (círculo negro) se ubica entre tres cauces de caudal medio muy diferente, y sin contar con más información no es claro cuál de los tres ríos corresponde al punto. La selección del punto se hace mucho más fácil si el punto en cuestión tiene algún caudal de referencia asociado. Por ejemplo, si sabemos que el punto representa una potencial central hidroeléctrica de caudal de diseño de $150 \text{ m}^3/\text{s}$, es bastante evidente que se debe ubicar en el río de color rojo. Por otra parte, si representa una minicentral de caudal de diseño de $4 \text{ m}^3/\text{s}$, el río de color verde sería el más apropiado.

2.5 Método para las variables obtenidas del API de Energías Renovables

2.5.1 Introducción

En esta sección se describe la metodología utilizada para el escalamiento estadístico de las variables relacionadas con el viento, la radiación solar y temperatura.

Para todas las variables señaladas, la información de referencia se extrae del API de energías renovables de MINENERGÍA. El API permite extraer variables relacionadas a las energías renovables desde una base de datos horarios que cubre Chile Continental (incluyendo la Isla de Pascua y el archipiélago de Juan Fernández) con una resolución espacial de 1 Km, para un periodo que se extiende entre los años 1980 y 2017. A pesar de ser una modelación numérica, esta base de datos puede considerarse *pseudo-observaciones* al ser la base de datos más precisa con que se cuenta.

La Tabla 7 muestra las **variables básicas** que se extraen del API y sobre las cuales se aplica el método de *downscaling*. Cabe señalar que el proyecto considera otras variables relacionadas (producción de energía, radiación en diferentes configuraciones de panel), pero estas variables se pueden derivar en relación a las variables de la tabla.

Tabla 7: Variables básicas extraídas desde el API y las variables de los GCM usadas para efectuar el escalamiento estadístico.

Variable API	Variable GCM
Velocidad de viento (5 m, 120 m, 180m)	Velocidad en superficie, calculado como $\sqrt{uas^2 + vas^2}$ donde <i>uas</i> y <i>vas</i> son los componentes zonal y meridional de la velocidad.
Densidad del aire	Calculado a partir de la presión y temperatura en superficie.
Radiación global horizontal	Radiación onda-corta horizontal en superficie (<i>rsds</i>).
Temperatura	Temperatura máxima (<i>tasmax</i>) y mínima (<i>tasmin</i>) diaria.

2.5.2 Escalamiento diario Quantile Delta Mapping

Como ya fue indicado anteriormente, para todas las variables la metodología utilizada es “*Quantile Delta Mapping*”, (QDM). QDM pertenece a una familia de métodos de escalamiento estadístico llamado *Quantile Mapping* (QM), que son ampliamente usados en la literatura científica (Panofsky y Brier, 1968; Déqué *et al*, 2007; Themessl *et al*, 2012; Maraun, 2016). A grandes rasgos, la técnica QM busca una función de transferencia f que transforma la distribución de la variable modelada P_m para que sea similar o igual que la distribución de la variable observada P_o - es decir $P_o = f(P_m)$ - durante un cierto periodo de referencia. En la práctica, la técnica calcula el sesgo (diferencia) entre los valores observados y simulados para cada percentil de la distribución simulada, para un periodo climático que corresponda al periodo de las observaciones. Luego, esta diferencia se agrega a los datos simulados para obtener el resultado escalado.

El QDM es una variación de la técnica QM, que tiene el beneficio importante de conservar los cambios absolutos en los cuantiles de las distribuciones de probabilidad de cada variable, corrigiendo al mismo tiempo los sesgos en la distribución de frecuencia de la variable simulada, respecto de la referencia. De esta manera, el QDM asegura que las tendencias en el largo plazo de las variables no se cambian al aplicar el escalamiento estadístico. Para más información se puede consultar a Canon *et al* (2015).

En el presente estudio, el método de QDM fue aplicado de manera independiente para cada mes del año. La aplicación mensual de la técnica de escalamiento es importante para poder corregir los sesgos en los ciclos anuales de los GCM.

Para un punto geográfico específico (puede ser un punto o un polígono), el método es ejecutado de la siguiente manera:

1. Se extrae una serie horaria de datos de recurso desde el API ERNC operado por el Ministerio de Energía⁵.
2. Para aplicar el escalamiento estadístico, la serie horaria es reducida a intervalos diarios. Sin embargo, la serie horaria se mantiene para el uso en la técnica para generar datos horarios (ver la sección 2.5.3).

⁵ <http://api.minenergia.cl/>

3. Se extrae la variable climática del GCM que es equivalente a la variable del API ERNC (Tabla 7, columna 2), en el punto de grilla del GCM más cercano al punto geográfico analizado. La serie del GCM es de 1981 a 2060.
4. Se aplica la técnica de regionalización estadística QDM a las series del API y GCM, obteniendo una serie transformada de los datos del GCM

Este proceso se repite para cada GCM disponible, para obtener un *ensemble* de entre 29 a 36 proyecciones para cada sitio.

2.5.3 Generación de datos horarios

La técnica de QDM solo permite escalar las variables de los GCM a nivel diario. Sin embargo, los datos entregados por el API de energías renovables tienen una resolución temporal horaria y es de mucha utilidad contar con proyecciones horarias, dado que permitirían calcular de manera correcta - y sin aproximaciones - otras variables relevantes para el estudio de las energías renovables (como, por ejemplo, la producción de electricidad).

En el caso del viento, para poder conseguir información a nivel horario, se implementó un algoritmo simple que “reconstruye” la variabilidad horaria a partir de las proyecciones diarias de los GCM y las observaciones horarias del API. Esencialmente, para cada día de proyección climática, el algoritmo examina el valor medio diario simulado y busca algún día en las observaciones -en este caso, los datos extraídos del API- que tenga un valor promedio similar. Del día seleccionado se resta el valor medio de los valores horarios y se agrega el valor medio del GCM escalado. El proceso se repite para todos los días de la proyección.

En el caso de la radiación solar, el método de selección de días es usado para reconstruir la radiación directa y la radiación global simultáneamente (Ilustración 10). Es decir, se seleccionan los días en base al valor de radiación global horizontal, y para el día seleccionado se obtiene tanto la radiación global como la radiación directa. Este método asegura que los valores de las dos componentes de la radiación sean consistentes, característica muy importante para los cálculos posteriores de radiación en superficies inclinadas.

En el caso de la temperatura, los datos diarios disponibles son los extremos diarios (t_{max} y t_{min}). En este caso, el algoritmo busca un día en las observaciones que tiene una amplitud térmica similar a cada día de la proyección, y las anomalías horarias se agregan como en el caso de las otras variables.

El algoritmo se aplica de forma segregada por mes. Esto quiere decir que para reconstruir datos horarios para un día en enero, sólo se consideran datos horarios de otro día de enero. Esta restricción ayuda a asegurar que las anomalías horarias sean apropiadas al periodo estacional cuando se desarrollan.

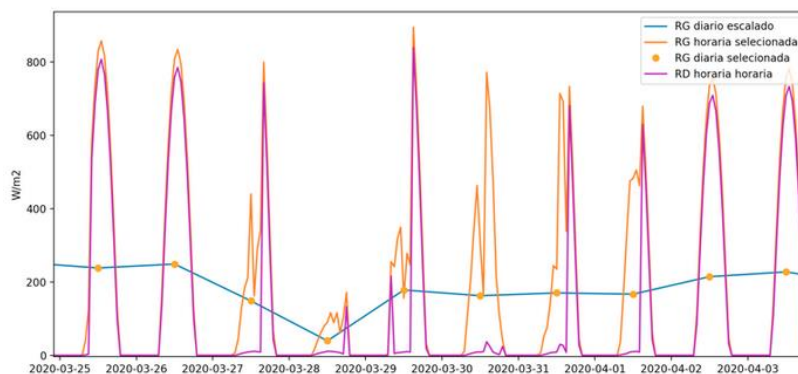


Ilustración 10: Reconstrucción de una serie de radiación solar para un periodo de 10 días. La línea azul es la serie de radiación diaria obtenida con QDM. La línea amarilla es la radiación global horizontal horaria, que se obtiene seleccionando días de los datos observados que muestran el mismo promedio que la serie QDM. El punto amarillo muestra el promedio diario de la serie de radiación horaria, y se comprueba que el promedio es igual que la serie original. Finalmente, la línea morada muestra la radiación directa horizontal, tomado de los mismos días que la radiación global horizontal horaria. El uso de datos simultáneos asegura que hay consistencia entre ambos componentes de radiación, lo cual facilita los cálculos de radiación incidente en paneles inclinados y con seguimiento.

2.5.4 Variables derivadas

Una vez que se obtienen las series horarias de las variables básicas, es posible calcular variables adicionales derivadas. A continuación, se describe brevemente cuáles son las variables derivadas y el método usado para calcularlas.

Generación Eólica

La generación eólica se expresa como factor de planta de una turbina de referencia. La turbina de referencia utilizada es el modelo **VESTAS V117 de 3.3 MW**. La generación es calculada de una manera idéntica que en el API ERNC, tomando en cuenta el impacto de la densidad del aire en el cálculo.

Radiación en superficie inclinada y con seguimiento

Los datos horarios de radiación global y directa horizontal se utilizan para calcular la radiación difusa horizontal y la radiación directa normal utilizando algoritmos idénticos a los del API de MINEN.

Adicionalmente, la radiación es calculada para dos configuraciones de panel:

1. Una de superficie fija inclinada (TILT): fija tiene un ángulo de inclinación equivalente a la latitud geográfica del sitio
2. Una superficie en seguimiento (HSAT): ángulo máximo de inclinación es de 45°.

Ambas configuraciones suponen un ángulo azimutal de 0°. Nuevamente, los algoritmos empleados son idénticos a los del API.

Generación Solar Fotovoltaica

La generación solar fotovoltaica es calculada usando los parámetros estándares del API, que se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Parámetros usados para el cálculo del factor de planta para sistemas fotovoltaicos.

Parámetro	Valor
Pdco	1.0
Coeficiente de temperatura	-0.45
Tipo cobertura	Vidrio
Montaje	Abierto
Pérdidas	14%
ETA nominal	0.96
Razón AC-DC	1.0
Capacidad	1 kW

2.6 Método para el cálculo de eventos extremos

El entregable principal del presente estudio es un conjunto de series de tiempo de variables relacionadas a los recursos renovables, en lugares geográficos definidos por la contraparte técnica del proyecto. Entre las diversas aplicaciones de estas series de tiempo, se reconoce la posibilidad de caracterizar posibles cambios en la frecuencia e intensidad de ciertos eventos extremos debido al efecto del cambio climático.

En la etapa inicial del proyecto, la contraparte técnica solicitó analizar la posibilidad de calcular varios indicadores para caracterizar el cambio en la frecuencia y/o intensidad de eventos extremos en el clima futuro. La evaluación de factibilidad que se realizó fue entregada en el primer informe de avance del proyecto y se incluye en los anexos del presente informe. Aunque no se puede abarcar todos los tipos de eventos mencionados por la contraparte, se pudo establecer un conjunto de indicadores para la caracterización de eventos extremos de viento, precipitación, caudal y temperatura. Estos indicadores se calculan en todos los sitios a procesar en el proyecto donde se extraen las variables correspondientes.

Para los fines del cálculo de los índices, se definen periodos de 30 años de largo que corresponden al clima de referencia (clima histórico) y el clima futuro, según lo indicado en la Tabla 9 . Se describen a continuación los indicadores factibles de cálculo.

Tabla 9: Periodo de referencia y periodo futuro.

Periodo	Años
Clima de referencia	1981-2010
Clima futuro	2031-2060

2.6.1 Sequía

Para obtener el cambio de la frecuencia de sequías se ocupan dos métricas:

3. **Standardized Precipitation Index (SPI)**: calculable en todos los puntos geográficos, es una medida de sequías meteorológicas basada en la precipitación. Es una métrica recomendada por la Organización Mundial de Meteorología (*WMO*, por sus siglas en inglés).
4. **Streamflow Drought Index**: calculable en puntos donde se estimen caudales. Es similar al **SPI**, pero calculado en base a los caudales. Provee una mejor estimación de la disponibilidad de las aguas superficiales.

2.6.2 Eventos de lluvia

La lluvia se define como la precipitación acumulada en un día, y donde además se cumpla que la temperatura media es mayor a 0°C. Se definen los umbrales según la Tabla 10.

Tabla 10: Umbrales para episodios de lluvia intensa en verano.

Categoría	Umbral
Lluvias moderadas	> 10 mm / día
Lluvias intensas	> 20 mm / día
Lluvias muy intensas	> 50 mm / día

2.6.3 Nevazones

Se propone calcular la ocurrencia de episodios de nieve fuertes, usando un esquema similar a lo propuesto para las lluvias intensas. En este caso, un episodio de nieve se define como la precipitación en un día en que la temperatura media es menor a 0°C. Se propone definir los umbrales según la tabla a continuación:

Tabla 11: Umbrales para episodios de nevazón.

Categoría	Umbral
Nevazones moderadas	> 10 mm / día (agua equivalente)
Nevazones intensas	> 20 mm / día (agua equivalente)
Nevazones muy intensas	> 50 mm / día (agua equivalente)

Cabe señalar que 1 mm de nieve agua equivalente corresponde a la acumulación de un espesor de nieve fresca de aproximadamente 1 cm de altura.

2.6.4 Crecidas extremas

Las crecidas se definen como los eventos asociados a ciertos periodos de retorno en el clima actual. El periodo de retorno es una variable usada en la hidrología para caracterizar la magnitud y frecuencia de crecidas (ver por ejemplo "*Water Resources Engineering*", 2005 Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2005 o "*Flood Estimation Handbook*", UK Centre for Ecology & Hydrology).

Los cálculos se harán para caudales diarios y caudales semanales. La Tabla 12 presenta un resumen de los periodos de retorno considerados. Para cada periodo de retorno se calcularán los siguientes datos:

- El caudal (Q_{TR}) asociado al periodo de retorno en el periodo de referencia.
- El caudal (Q_{TF}) asociado al periodo de retorno en el periodo de futuro.
- El cambio relativo entre el presente y futuro Q_{TF}/Q_T (%).

Tabla 12: Definición de crecidas, según periodo de retorno.

Intervalo	Periodo de retorno
Diario	1 año
Diario	5 años
Diario	10 años
Diario	30 años
Semanal	1 año
Semanal	5 años
Semanal	10 años
Semanal	30 años

Se calcula el cambio de la frecuencia de episodios de viento horario y diario que superan los umbrales indicados en la Tabla 13. Los umbrales de 20 y 25 m/s corresponden a los niveles típicos en que las turbinas eólicas dejan de funcionar (*cut-out velocity*). Los cálculos se realizan para la altura (o alturas) solicitadas para cada sitio donde se extrae información de viento.

Tabla 13: Umbrales para los eventos de viento fuerte.

Intervalo	Umbral de viento
Diario	10 m/s
Diario	15 m/s
Horario	15 m/s
Horario	20 m/s
Horario	25 m/s

2.6.5 Olas de calor

Las olas de calor caracterizan de acuerdo con la definición y umbrales utilizados por la Dirección Meteorológica de Chile (en adelante DMC) en su página web.⁶ La metodología señala que se considera como ola de calor todo evento de tres días seguidos donde se supere el percentil 95 de las temperaturas diarias. Dicho percentil debe ser calculado con respecto a la climatología de los valores, por medio del cálculo de un armónico que represente esta serie adecuadamente.

⁶ < <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/diario/mapaRecienteOlaDeCalor/> >

3 Base de datos

3.1 Introducción

En este capítulo se describen las bases de datos que se están generando como entregable del proyecto. A grandes rasgos, los resultados del estudio consisten en archivos de datos para grupos de sitios definidos por la contraparte técnica del proyecto. Los grupos de sitios generalmente corresponden a emplazamientos de proyectos de generación eléctrica, zonas de potencial para desarrollo futuro o emplazamientos de infraestructura eléctrica, entre otros.

Los datos que se generan para cada sitio consisten en series de tiempo, de intervalo diario u horario, para el periodo comprendido entre los años 1981 y 2060. Es importante señalar que existe una serie de tiempo para cada GCM, y que se están considerando 34 series distintas de GCM en este estudio. Por consecuencia, la cantidad de datos que se puede crear por sitio es significativa: si consideramos una variable, con intervalo horario para el periodo 1981-2060, y 20 proyecciones (GCM), tenemos un total de 14 millones de puntos de datos, lo que implica al menos 50 Mb de información. Tomando en cuenta que para un sitio solar se considera una evaluación de aproximadamente 10 variables, los datos asociados a **un solo sitio** fácilmente pueden exceder los **500 Mb**. En función de estas limitaciones, se optó por desarrollar una selección de modelos a utilizar, dejando la información solo de aquellos que presentaran set completo de variables a analizar en todos los tipos de energía renovable.

Debido a lo anterior, y también considerando el tiempo requerido para extraer y procesar los datos para cada sitio, la cantidad de emplazamientos que se podrá procesar en el proyecto es limitado. En principio, se considera 2.000 puntos para la extracción de información hidrológica y 4.000 puntos para las otras variables (eólico, solar, temperatura).

3.2 Variables

La Tabla 14 muestra las variables calculadas en el proyecto. El código de la variable es utilizado en los archivos de datos. La columna “Datos de referencia” indica la fuente de datos observados que se usa para hacer la proyección escalada. El mejor intervalo corresponde a la mejor resolución temporal en que se puede tener la variable. En general, variables asociadas a hidrología (precipitación y caudal) tienen intervalo diario mientras las variables derivadas del API de energías renovables tienen un intervalo horario.

Adicionales a las variables de la Tabla 14, también se han calculado los indicadores de eventos extremos. Los códigos asociados a estos indicadores se muestran en la Tabla 15.

Tabla 14: Variables consideradas en el presente proyecto. El código se usa para identificar la variable en los archivos de datos.

Código	Descripción	Unidad	Datos de referencia	Mejor Intervalo
Q	Caudal	m ³ /s	Simulación VIC	Diario
fp_hidro	Factor de planta hidroeléctrica (centrales OPC o SEIA)	Factor 0-1	Derivado de q	Diario
pp_pch	Factor de planta de potencial central hidroeléctrica	Factor 0-1	Derivado de q simulado en los puntos de captación asociados al PCH	Diario
vel_005	Velocidad de viento en 5m	m/s	API Energía renovable	Horario
vel_120	Velocidad de viento en 120m	m/s	API Energía renovable	Horario
dir_120	Dirección de viento en 120m	°	API Energía renovable	Horario
rho	Densidad del aire	kg/m ³	API Energía renovable	Horario
fp_eolo_120	Factor de planta de turbina altura 120m	Factor 0-0	Derivado de vel_120 y rho	Horario
ghi	Radiación global horizontal	W/m ²	API Energía renovable	Horario
dni	Radiación directa normal	W/m ²	API Energía renovable	Horario
dif	Radiación difusa	W/m ²	API Energía renovable	Horario
glb_tilt	Radiación global en panel inclinado	W/m ²	API Energía renovable	Horario
glb_hsat	Radiación global en panel con seguimiento HSAT	W/m ²	API Energía renovable	Horario
fp_tilt	Factor de planta de panel FV inclinado	Factor 0-1	Derivado de glb_tilt y temp	Horario
fp_hsat	Factor de planta de panel FV con seguimiento HSAT	Factor 0-1	Derivado de glb_tilt y temp	Horario
temp	Temperatura horaria	°C	API energía renovable	Horario
tmax	Temperatura máxima diaria	°C	API energía renovable	Diario
tmin	Temperatura mínima diaria	°C	API energía renovable	Diario
pr	Precipitación diaria	mm	CR2MET	Diario
rain	Lluvia diaria	mm	CR2MET	Diario
snow	Nieve diaria	mm (agua equiv.)	CR2MET	Diario
hrel	Humedad relativa	%	ARCLIM	Diario
evap	Evapotranspiración potencial	mm	ARCLIM	Diario

Tabla 15: Indicadores de episodios extremos considerados en el presente proyecto. El código se usa para identificar la variable en los archivos de datos.

Indicador valor extremo	Descripción	Unidad
spi	Standardized Precipitation Index	adimensional
ssi	Standardized Streamflow Index	adimensional
lluvia_moderada	Días con lluvia acumulada sobre 10 mm	Número de días/año
lluvia_intensa	Días con lluvia acumulada sobre 20 mm	Número de días/año
lluvia_muy_intensa	Días con lluvia acumulada sobre 50 mm (agua equivalente)	Número de días/año
nieve_moderada	Días con nieve acumulada sobre 10 mm (agua equivalente)	Número de días/año
nieve_intensa	Días con nieve acumulada sobre 20 mm (agua equivalente)	Número de días/año
nieve_muy_intensa	Días con nieve acumulada sobre 50 mm (agua equivalente)	Número de días/año
qd_retp_01	Caudal diario periodo retorno 1 año	m3/s
qd_retp_05	Caudal diario periodo retorno 5 años	m3/s
qd_retp_10	Caudal diario periodo retorno 10 años	m3/s
qd_retp_30	Caudal diario periodo retorno 30 años	m3/s
qd_retp_01	Caudal diario periodo retorno 1 año	m3/s
qd_retp_05	Caudal diario periodo retorno 5 años	m3/s
qd_retp_10	Caudal diario periodo retorno 10 años	m3/s
qd_retp_30	Caudal diario periodo retorno 30 años	m3/s
vel_diario_10ms	Viento diario sobre 10 m/s	Número de días/año
vel_diario_15ms	Viento diario sobre 15 m/s	Número de días/año
vel_horario_15ms	Viento horario sobre 15 m/s	Número de horas/año
vel_horario_20ms	Viento horario sobre 20 m/s	Número de horas/año
vel_horario_25ms	Viento horario sobre 25 m/s	Número de horas/año
dias_calurosos	Numero de días al año de temperatura máxima sobre 30°C	Número de días/año
dias_heladas	Numero de días del año de temperatura mínima menor a 0°C	Número de días/año
ola_calor	Índice olas de calor	Número de días/año

3.3 Unidades territoriales

La Tabla 16 muestra las capas geográficas entregadas por el Ministerio que ya se han procesado o que están en procesamiento. A cada capa se le asigna un “Grupo” que indica el conjunto de variables se debe extraer (Tabla 17).

Tabla 16: Unidades territoriales procesadas.

Grupo	Código	Descripción	Geom	N _{ent}
eolo	Centrales_Eolicas_OPC_Dic19	Centrales eólicas en Operación, Pruebas o Construcción	Punto	54
	Centrales_Eolicas_SEIA_Dic19	Centrales eólicas en Evaluación Ambiental	Punto	64
	Potencial_Eolico_2020_BrutoNac	Potencial eólico Bruto Nacional	Polígono	1969
solar	Centrales_Solares_FV_OPC_Dic19	Centrales solares fotovoltaicas en Operación, Pruebas o Construcción	Punto	237
	Centrales_Solares_FV_SEIA_Dic19	Centrales solares fotovoltaicas en Evaluación Ambiental	Punto	312
	Centrales_Solares_CSP_OPC_Dic19	Concentradores solares en Operación, Pruebas o Construcción	Punto	1
	Centrales_Solares_CSP_SEIA_Dic19	Concentradores solares en Evaluación Ambiental	Punto	4
	Corergido2	Zonas de potencial PV gran escala	Punto	359
	Potencial_GxDx_Cap_Comunales	Capitales Comunales	Punto	345
	Potencial_GxDx_SSMM	Sistemas medianas	Punto	9
	Potencial_GxDx_SSAA	Aysén	Punto	114
	Potencial_GxDx_SSAA	Sistemas aisladas	Punto	11
	Potencial_SolarCSP_2020_PELP	Potencial CSP	Punto	103
Hidro	Centrales_Hidro_Pasada_OPC_Jun20	Centrales hidroeléctricas de pasada en Operación, Pruebas o Construcción	Punto	167

Grupo	Código	Descripción	Geom	N _{ent}
Hidro	Centrales_Hidro_Pasada_SEIA_Jun20	Centrales solares fotovoltaicos en Evaluación Ambiental	Punto	55
	Subsubcuencas_BNA	Sub-subcuencas definidas para el Banco Nacional de Aguas	Polígono	~1000
	Puntos de captación DAANC 2018	Puntos de captación de los Derechos de Agua No-Consuntivos ->PCH	Punto	~5000
Infraestructura	Almacenamiento_combustible	Almacenamiento combustible	Punto	75
	Plantas_Regasificación	Plantas Regasificación	Punto	52
	Terminales_maritimos	Terminales maritimos	Punto	29
Líneas	LT_Chile_MEN_2019	Líneas de Transmisión	Línea->Punto	3875 puntos
	Gasoductos	Gasoductos	Línea->Punto	309 puntos
	Oleoductos	Oleoductos	Línea->Punto	224 puntos
Bombeo	Potencial_Hidro_Bombeo_AguaMar_Reservorio_Superior	Potenciales sitios de bombeo de agua del mar	Punto	3190
	Potencial_Hidro_Bombeo_AguaDulce_Reservorio_Inferior	Potenciales sitios de bombeo de agua dulce	Punto	15893

Tabla 17: Variables por extraer según tipo de potencial energético asociado.

Grupo	Variables
eolo	vel_120, vdir_120, rho, fp_eolo_120, tmax, tmin, pr, rain, snow
solar	ghi, dni, dif, glb_tilt, glb_hsat, fp_tilt, fp_hsat, vel_005, temp, tmax, tmin, pr, rain, snow
hidro	q, fp_hidro, tmin, tmax, pr, rain, snow
lineas	vel_005, rglb, temp
bombeo	tmin, tmax, vel_005, precip, rhum, evap (diario solamente)

3.4 Formatos de datos

3.4.1 Series de tiempo en formato CSV

El formato de archivo de entrega propuesto se puede resumir según los siguientes puntos:

1. Archivos en formato CSV.
2. Un archivo representa una variable para un punto de control.
3. En cada archivo, cada columna representa los resultados de un GCM.
4. Cada fila representa un intervalo dentro del periodo de la simulación. La fecha y hora se refiere al comienzo del intervalo.

Los archivos se organizan en directorios, cuyos nombres corresponden a la capa geográfica que contiene los sitios para los cuales se extrajo los datos (por ejemplo, en el directorio Centrales_Solares_FV_SEIA_Dic19, se ubican los cálculos de todos los puntos incluidos en dicha capa). Dentro de cada directorio, existen subdirectorios, referentes a distintos niveles de agregación temporal: horario, diario, mensual y anual. En cada una de estas subcarpetas, se encuentran los archivos en formato CSV, según la estructura descrita al inicio de este acápite, nombrado según la siguiente convención:

`$ID_SITIO_$CODIGO_VARIABLE.csv`

Donde `$ID_SITIO` es el código identificador del sitio (debe corresponder al ID del *Shapefile* de la capa de origen) y `$CODIGO_VARIABLE` es alguno de los códigos indicados en la Tabla 15.

3.4.2 Archivos de resumen en formato GeoJSON

GeoJSON es un formato para información geográfica compatible con una amplia gama de herramientas *SIG*. Para el presente proyecto, el formato es usado para almacenar datos consolidados de los valores relevantes de las variables simuladas, para todos los sitios de una capa geográfica determinada. Adicionalmente, este formato es usado para los datos de los valores extremos mencionados en la sección 2.6.

Hay un archivo *GeoJSON* por variable. Para una variable de código \$VAR, el archivo contendrá los campos indicados en la Tabla 18.

Tabla 18: Campos incluidos en el archivo GeoJSON de resumen. \$VAR puede ser cualquier de los códigos mostrados en las primeras columnas de las Tablas 3.1 y 3.2. De ser una variable de la Tabla 3.1, los datos refieren al valor medio de la variable en los periodos históricos y futuros. De ser un valor extremo, \$VAR es el valor del indicador para los periodos históricos y futuros.

Código	Explicación
\$VAR_HIS	Valor de la variable para el periodo histórico de 1981 a 2010. El valor es la mediana (percentil 50) de los resultados de cada GCM.
\$VAR_HIS_p10	Rango inferior de confianza (10%) de valores, para el periodo histórico de 1981 a 2010. El valor es el percentil 10 de la distribución de los resultados de todos los GCM disponibles.
\$VAR_HIS_p90	Rango superior de confianza (90%) de valores, para el periodo histórico de 1981 a 2010. El valor es el percentil 90 de la distribución de los resultados de todos los GCM disponibles.
\$VAR_FUT	Valor de la variable para el periodo proyectado de 2031 a 2060. El valor es la mediana (percentil 50) de los resultados de cada GCM.
\$VAR_FUT_p10	Rango inferior de confianza (10%) de los valores, para el periodo proyectado de 2031 a 2060. El valor es el percentil 10 de la distribución de los resultados de todos los GCM disponibles.
\$VAR_FUT_p90	Intervalo de confianza de 90% del valor para el periodo proyectado de 2031 a 2060. El valor es el percentil 90 de la distribución de los resultados de todos los GCM disponibles.
\$VAR_DIF	Valor de la diferencia entre el periodo histórico y el periodo futuro. El valor es la mediana (percentil 50) de las diferencias calculadas para cada GCM.
\$VAR_DIF_p10	Rango inferior de confianza (10%) para la diferencia entre el periodo histórico y el periodo futuro. El valor es el percentil 10 de la distribución de diferencias calculadas para de cada GCM.
\$VAR_DIF_p90	Rango superior de confianza (90%) para la diferencia entre el periodo histórico y el periodo futuro. El valor es el percentil 90 de la distribución de diferencias calculadas para de cada GCM.

3.5 Selección de GCM a utilizar

La base de datos consiste en series de tiempo horarios o diarios de diferentes variables meteorológicas. Por cada GCM, existe una serie de tiempo disponible para cada variable. Es importante notar que dentro del conjunto de GCM disponibles, cada simulación es diferente. Con el fin de simplificar y homologar los resultados de las simulaciones, se ha optado por entregar los resultados solo de aquellos GCM en que están disponibles todas las variables trabajadas en el presente proyecto, con el fin de mantener la coherencia espacial y temporal de la información, así como la existencia de conjuntos de datos que posean toda la información requerida. Del total original de 34 modelos, se consideran finalmente 18 GCM que cumplen esta condición. El listado de

estos modelos, que conformarán la base de datos obtenida como resultado de este proyecto, se presenta en la Tabla 19.

Tabla 19: Selección de los 18 GCM incluidos en la base de datos final. Estos GCM tienen datos para todas las variables analizadas en el presente proyecto.

Nombre GCM		Nombre GCM
ACCESS1-3_r1i1p1		GFDL-ESM2M_r1i1p1
ACCESS1-0_r1i1p1		inmcm4_r1i1p1
BNU-ESM_r1i1p1		IPSL-CM5B-LR_r1i1p1
CanESM2_r1i1p1		MIROC-ESM_r1i1p1
CMCC-CESM_r1i1p1		MIROC-ESM-CHEM_r1i1p1
CMCC-CM_r1i1p1		MPI-ESM-LR_r1i1p1
CNRM-CM5_r1i1p1		MPI-ESM-MR_r1i1p1
GFDL-CM3_r1i1p1		MRI-CGCM3_r1i1p1
GFDL-ESM2G_r1i1p1		MRI-ESM1_r1i1p1

3.6 Definición de escenarios cualitativos

En la medida que sea posible, se recomienda trabajar siempre con el conjunto completo de simulaciones de los 18 GCM definidos en la sección anterior. Sin embargo, por diversas razones, en muchas ocasiones es necesario seleccionar un subconjunto de simulaciones que se puede considerar como “representativo” de la distribución completa. Dicho esto, en esta sección se busca identificar mediante un análisis los GCM representativos de los escenarios “normales” (o medio), “optimistas” o. “pesimista”. Este análisis se realiza identificando y cuantificando la variación de cuatro variables relevantes: caudal, temperatura, radiación solar y viento. Se calcularon los cambios proyectados por cada modelo para cada una de estas variables, y en función de esto, se les asignó un valor de ranking, donde valores más altos representan cambios más severos. El resultado del análisis se presenta en la Tabla 20.

Se definió un factor propio a cada categoría según criterio experto, dando mayor ponderación a las variables de temperatura y caudal, debido a su mayor impacto en el sistema eléctrico. Combinando estos factores con los resultados obtenidos, se identificaron tres GCM que representaran condiciones **pesimistas** (con efectos de cambio climático más severos), **neutras** (efectos moderados de cambio climático) y **optimistas** (efectos leves de cambio climático). La información específica de qué GCM representa dichos escenarios se presenta en la Tabla 21.

Para facilitar el acceso a los datos de los tres GCM, se ha preparado una versión de la base de datos de archivos CSV que contiene los resultados de los tres GCM solamente.

Tabla 20: “Ranking” de las tendencias de caudal, temperatura, radiación solar y viento de cada uno de los 18 GCM en que están disponibles para todas estas variables. Un valor de 1 significa que el GCM muestra la menor tendencia (más optimista) para la variable de todos los GCM. El valor 18 indica que el GCM muestra la mayor tendencia (más pesimista) de los GCM. Un valor entre 5 y 14 se puede considerar como “normal”. Se destacan con colores verde, amarillo y rojo los GCM seleccionados como representativos de proyecciones “optimistas”, “normales” y “pesimistas”, respectivamente.

GCM	Disminución de Caudal	Aumento de temperatura	Disminución de radiación solar	Disminución de viento
ACCESS1-3_r1i1p1	11	10	8	5
ACCESS1-0_r1i1p1	7	11	7	4
BNU-ESM_r1i1p1	8	9	11	16
CanESM2_r1i1p1	18	18	18	11
CMCC-CESM_r1i1p1	3	4	16	9
CMCC-CM_r1i1p1	9	15	12	12
CNRM-CM5_r1i1p1	1	8	17	7
GFDL-CM3_r1i1p1	16	17	10	10
GFDL-ESM2G_r1i1p1	13	6	6	17
GFDL-ESM2M_r1i1p1	17	7	1	15
inmcm4_r1i1p1	5	2	15	18
IPSL-CM5B-LR_r1i1p1	4	1	9	14
MIROC-ESM_r1i1p1	10	13	2	2
MIROC-ESM-CHEM_r1i1p1	14	16	4	1
MPI-ESM-LR_r1i1p1	15	12	3	8
MPI-ESM-MR_r1i1p1	12	14	5	3
MRI-CGCM3_r1i1p1	2	5	13	13
MRI-ESM1_r1i1p1	6	3	14	6

Tabla 21: Definición de escenarios representativos de condiciones pesimistas, neutras y optimistas.

Escenario	GCM	Descripción
Pesimista	CanESM2_r1i1p1	Tendencia de caudal, temperatura y radiación similar al promedio del conjunto total de 18 GCM. La tendencia de viento es un poco más optimista que las otras simulaciones.
Neutro	ACCESS1-3_r1i1p1	Casi las menores tendencias de caudal, temperatura del conjunto total de 18 GCM. La tendencia de radiación y viento está dentro del rango normal-superior.
Optimista	MRI-CGCM3_r1i1p1	Mayor disminución de caudal, y radiación solar, y el mayor aumento de la temperatura. La disminución de viento de este GCM es normal.

4 Revisión general de resultados

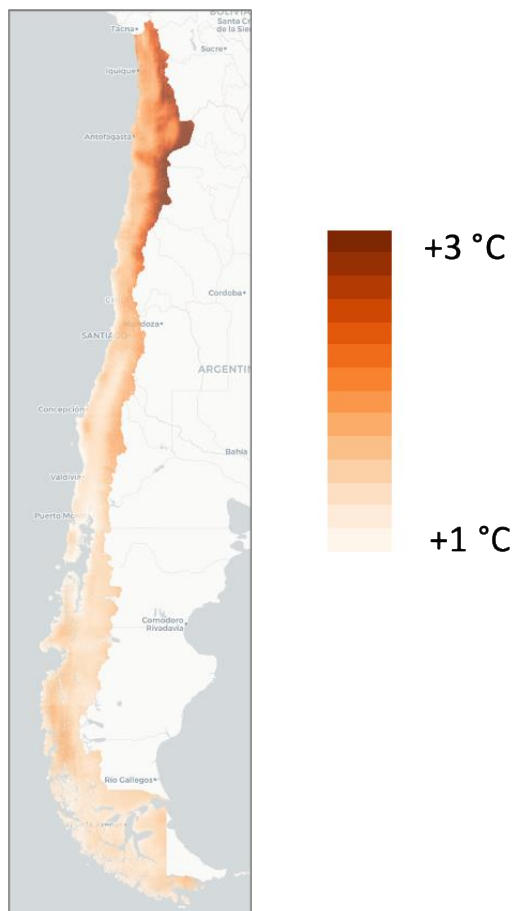
Se presentan en este capítulo resultados a nivel general de las principales forzantes meteorológicas, las principales variables de interés en la generación de los distintos tipos de energía y los eventos extremos.

4.1 Variables meteorológicas principales

Si bien se espera que todo el sistema climático sufra modificaciones en general, los efectos de cambio climático resultan más visibles en variables comúnmente apreciadas como la temperatura y la precipitación. Además, estas dos variables representan las forzantes más importantes de los modelos hidrológicos, por lo que resultan de gran interés. La Ilustración 11 muestra los cambios esperados para estas variables, comparando el periodo proyectado de 2030-2060 con el de referencia 1980-2010.

Se observa en el panel izquierdo un aumento general de la temperatura en todo el país, con aumentos mayores en los sectores cordilleranos de la zona norte del país. Sin embargo, en general, los aumentos son mayores en los sectores cordilleranos que los de valle, en todo el territorio nacional. Los aumentos proyectados tienen una media cercana a los 2°C en el territorio nacional.

Cambio de Temperatura



Cambio de Precipitación

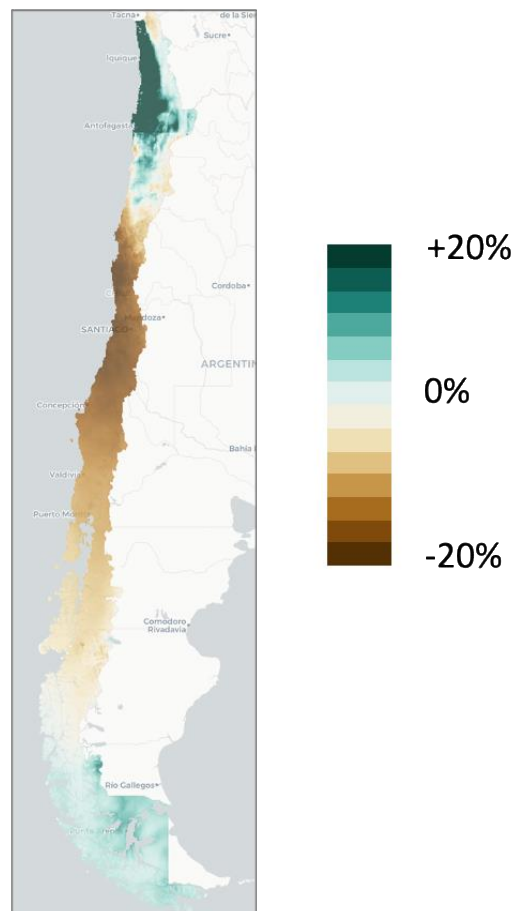


Ilustración 11: Aumento de temperatura y cambio de precipitación proyectada para Chile, del periodo 2030-2060 con respecto al periodo 1980-2010.

En el panel derecho de dicha ilustración, se muestran los cambios proyectados en los montos de precipitación total anual, la cual muestra regiones con aumentos y otras con disminuciones. Los aumentos porcentuales de la región norte son relativamente altos, pero guardan relación con los bajos montos que se dan en dicha área (leves aumentos en cantidad representan un porcentaje muy alto). Es interesante notar que en el sector Altiplánico dichos aumentos presentan una magnitud cercana a cero. Luego, al sur de este sector, en el territorio comprendido entre la región de Atacama y el sector de norte de la Patagonia, se observan disminuciones en los montos de precipitación de manera coherente, siendo las disminuciones más severas en el sector centro sur del país, con valores del orden de 20%. La magnitud de esta disminución se reduce a medida que se avanza hacia el sur, hasta que, ya comenzando el sector de la Patagonia austral, la señal se revierte y se proyectan aumentos de precipitación. Esto ocurre desde la latitud 45°S hacia el sur.

4.2 Energía Hidroeléctrica

4.2.1 Caudal

Habiendo aplicado la metodología de transferencia de parámetros hidrológicos a cada una de las unidades de subcuenca, en conjunto con la información de forzantes meteorológicas proyectadas, se obtienen resultados de caudales proyectados para el periodo futuro 2030-2060.

En el panel izquierdo de la Ilustración 12 se muestra los resultados de caudal medio obtenido del promedio de las 34 simulaciones basadas en los 18 GCM seleccionados para cada una de las sub-subcuencas definidas en el atlas del agua de la DGA. Consecuente con los cambios en los montos anuales de precipitación, los cambios proyectados de caudal muestran que en el sector centro y sur son esperables disminuciones, con valores que fluctúan entre un 10% y un 30%, siendo los efectos esperados más adversos en la zona central. Por el contrario, en la zona norte de la Patagonia se esperan aumentos de los caudales. Una posible explicación de esto es que las proyecciones de cambio climático señalan aumentos de las precipitaciones en dicha zona, pero adicionalmente podría considerarse el efecto del aumento de temperaturas, lo que generaría una mayor contribución de caudal glaciar en la zona (donde dicho tipo de elemento geológico es muy relevante).

En el panel derecho se muestra el porcentaje de variación medio (representado por los puntos negros), asociado a la latitud, donde cada punto representa lo proyectado para una sub-subcuenca en el periodo 2030-2060 con respecto al periodo 1980-2010. Es en este gráfico se aprecia la ventaja de contar con un conjunto de simulaciones, las cuales muestran en perspectiva el rango de valores esperables y por qué es importante utilizar múltiples escenarios. En la región comprendida entre 32°S y 45°S se observan disminuciones sistemáticas de caudal. Sin embargo, al norte de 35°S, el rango de las variaciones observables es mucho mayor, pudiendo llegar a variar entre -60% y 0%. Luego, hacia el sur de esta zona, las proyecciones reducen su variabilidad, y se limitan a variaciones entre -30% y 0% en la zona sur. En el sector norte de la Patagonia, el rango es aún más acotado, restringido entre -20% y 0%, con algunos puntos mostrando incluso leves aumentos de caudal (asociados probablemente a la hipótesis de un mayor aporte glaciar). El sector sur de la Patagonia, en promedio, proyecta aumentos de caudal. Sin embargo, en esta figura es posible ver que existe discrepancia entre los

modelos, por lo que la tendencia no resulta necesariamente significativa (dichos sectores se presentan con colores transparentes en el panel izquierdo).

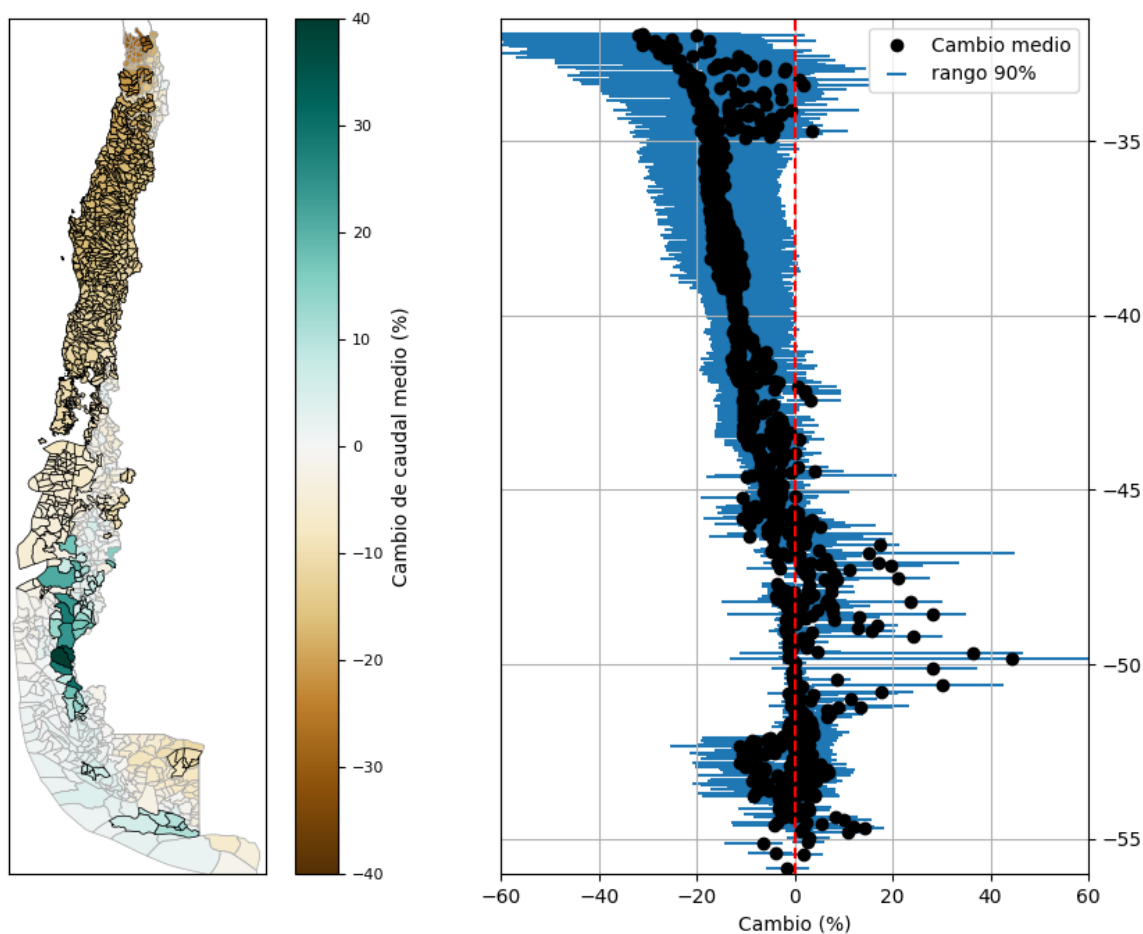


Ilustración 12: Cambio de caudal medio anual. En la figura a la izquierda se muestra cambio en cada sub-subcuenca con colores que varían entre café (disminución de caudal) y verde (aumento de caudal). Los colores y líneas son opacos en las cuencas en que la tendencia de caudal es la misma para todos los GCM. Las cuencas pintadas con colores transparentes corresponden a aquellos con GCM que muestran tendencias positivas y negativas, es decir, cuencas en que existe una alta incertidumbre respecto al signo de la tendencia futura. En el gráfico a la derecha se muestra el cambio según latitud. Con puntos negros se indica el cambio medio (percentil 50% de todos los GCM), mientras que con las líneas azules se muestra el rango de tendencias entre el percentil 10 y 90.

En la Ilustración 13 se presentan algunos gráficos de los resultados específicos obtenidos del análisis del punto de control Mampil. Dicha figura busca ser un ejemplo de los análisis que se pueden realizar con la información provista en la base de datos final que se entrega.

En el panel superior se muestran las series hidrológicas para el año hidrológico 2020/2021. En dicho gráfico, cada una de las líneas azules representa una simulación distinta, proveniente de un GCM distinto. Es importante recordar que estas líneas no representan la situación observada, sino que son simulaciones de un modelo que replica el sistema climático.

En el panel central, se observa la totalidad de los resultados de la simulación hidrológica. Se tienen 18 series que abarcan desde 1980 a 2060. La serie negra que se muestra en dicha figura representa el caudal medio diario obtenido de promediar las 18 series.

Finalmente, el tercer panel representa una comparación de las curvas de variación estacional de ambos periodos. En azul se muestran los resultados de línea base (línea más gruesa representa la media, líneas más finas representan una simulación particular de un GCM), mientras que en rojo se muestran los resultados de las proyecciones para el clima futuro. En particular, en este análisis se observa que las proyecciones de caudal para el punto de Mampil presentan, en promedio, disminuciones en todos los meses del año, pero con especial significancia en los meses de verano y otoño.

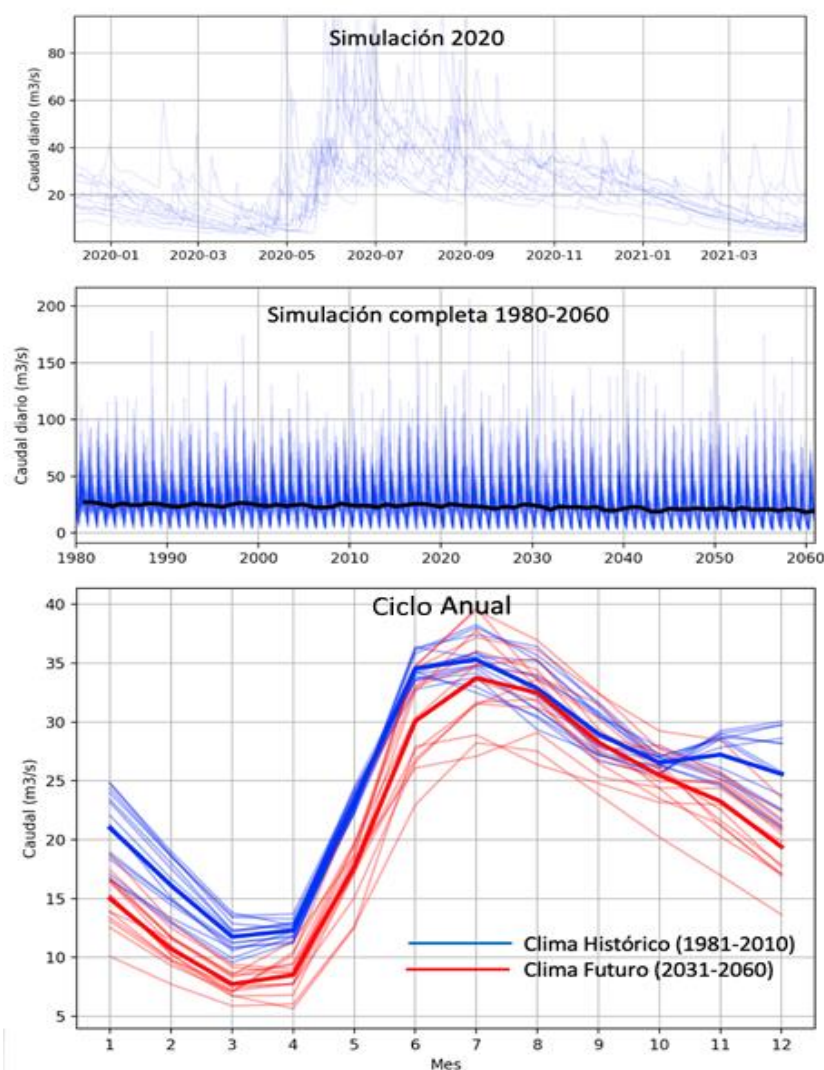


Ilustración 13: Ejemplo de los resultados obtenidos de la simulación hidrológica para el punto definido por la central Mampil. Se muestra en el panel superior los resultados obtenidos de los 34 GCM para el año 2020, en el panel central la simulación completa del periodo 1980-2060 y en el panel inferior la curva de variación estacional media de los periodos histórico y futuro (línea gruesa) y de cada GCM procesado (líneas más delgadas).

Este tipo de análisis se puede realizar con la base de datos a entregar para cada una de las variables de resultado entregada, y se presentan solo con fines de ejemplificación

y dimensionamiento de la cantidad y utilidad de los resultados que se entregan. Dado que los resultados son específicos para cada punto, y que presentan variaciones importantes, carece de sentido desarrollar una figura de ejemplo para cada variable.

4.2.2 Generación hidroeléctrica

Los resultados de variación porcentual del factor de planta se presentan en la Ilustración 14 (Centrales OPC en panel superior, Potenciales Centrales Hidroeléctricas en el panel inferior). En ambos gráficos se aprecia que hay una disminución del factor de planta que generalmente varía entre 0 y 20%. En promedio, la disminución de factor de planta es menor que la disminución de caudal, debido a que muchas centrales no aprovechan todo el flujo del río y por ende tienen menor sensibilidad a variaciones en el caudal medio.

En el panel superior se muestran las centrales de pasada OPC, donde hay varias centrales que muestran cambios medios pequeños o nulos, incluso en la zona central de Chile, donde las disminuciones proyectadas en los caudales son mayores. En algunos casos, esto se debe al impacto de derretimiento de los glaciares. Sin embargo, en la mayoría de los casos se debe a que las coordenadas de las centrales **no corresponden** a los puntos de captación, sino que representan la ubicación del punto de generación, el cual se debe ubicar por definición aguas abajo. Por lo tanto, los datos de caudal se extrajeron en un lugar de mucho mayor caudal que lo que realmente corresponde para la central, y, por ende, el factor de planta simulado no es sensible a los cambios de caudal proyectados. Esto implica que estos resultados deben ser utilizados con precaución.

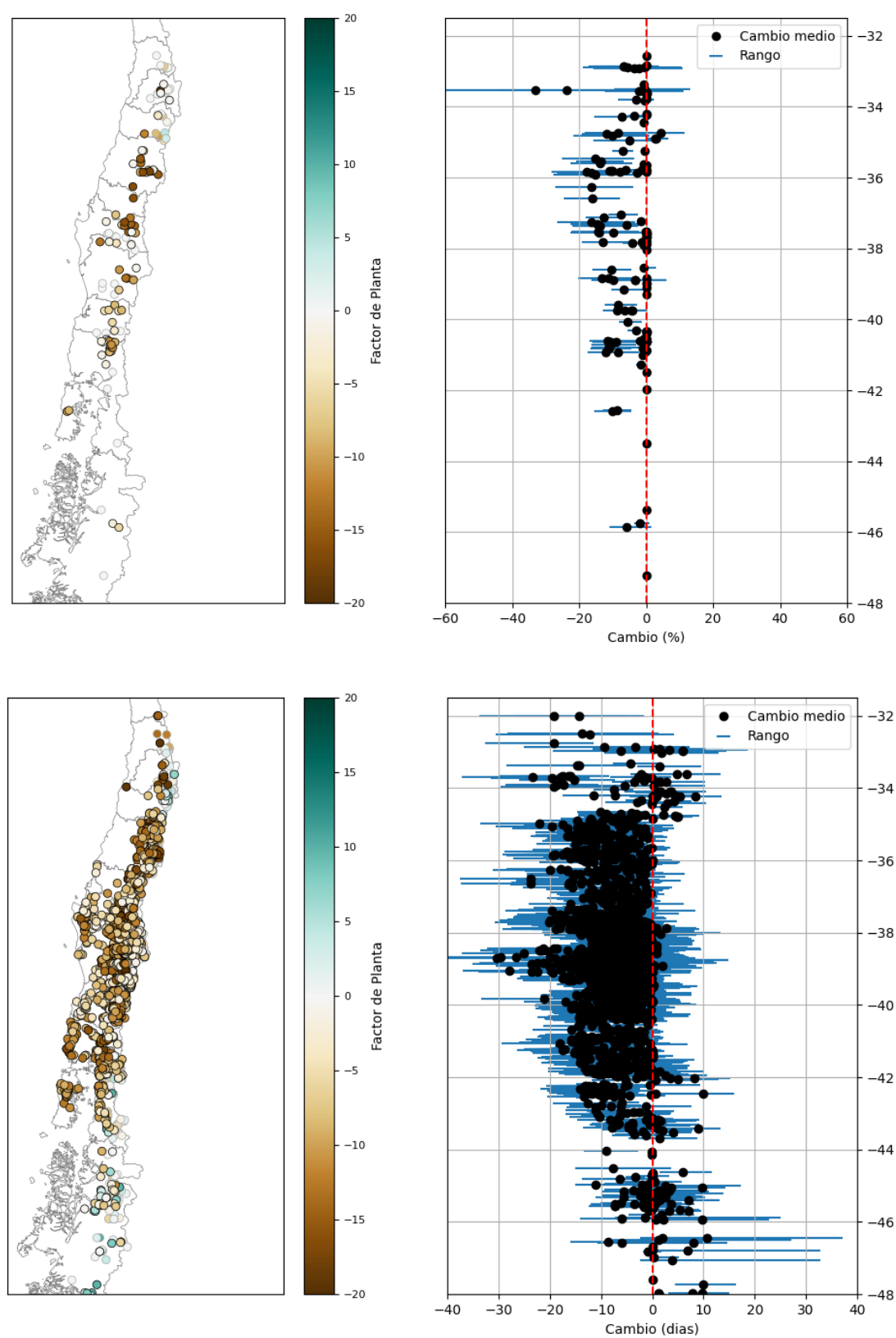


Ilustración 14: Cambio en el factor de planta de las centrales hidroeléctricas OPC (superior) y de los Potenciales Centrales Hidroeléctricas (inferior).

4.3 Energía Solar

4.3.1 Insolación

En la Ilustración 15 e Ilustración 16 se muestra el cambio proyectado del valor medio de la radiación global horizontal y la radiación directa normal, respectivamente. Para ambas variables las tendencias proyectadas son pequeñas (menos de 3%), y generalmente positivas. Esto quiere decir que los resultados indican que la radiación futura será, con un alto nivel de probabilidad, levemente más intensa que la radiación actual. El aumento varía entre 0 y 2.5%, siendo levemente más grande el aumento de la radiación directa. Las zonas de mayor aumento están en el centro-sur (entre las regiones de Valparaíso y Biobío) y el Norte Grande. En las regiones de Atacama y Coquimbo la tendencia de radiación se presume efectivamente nula. Resulta interesante notar que el aumento de radiación en el sur es consistente con la disminución de precipitación proyectada para esta zona, lo cual implica menos días en el año con nubosidad.

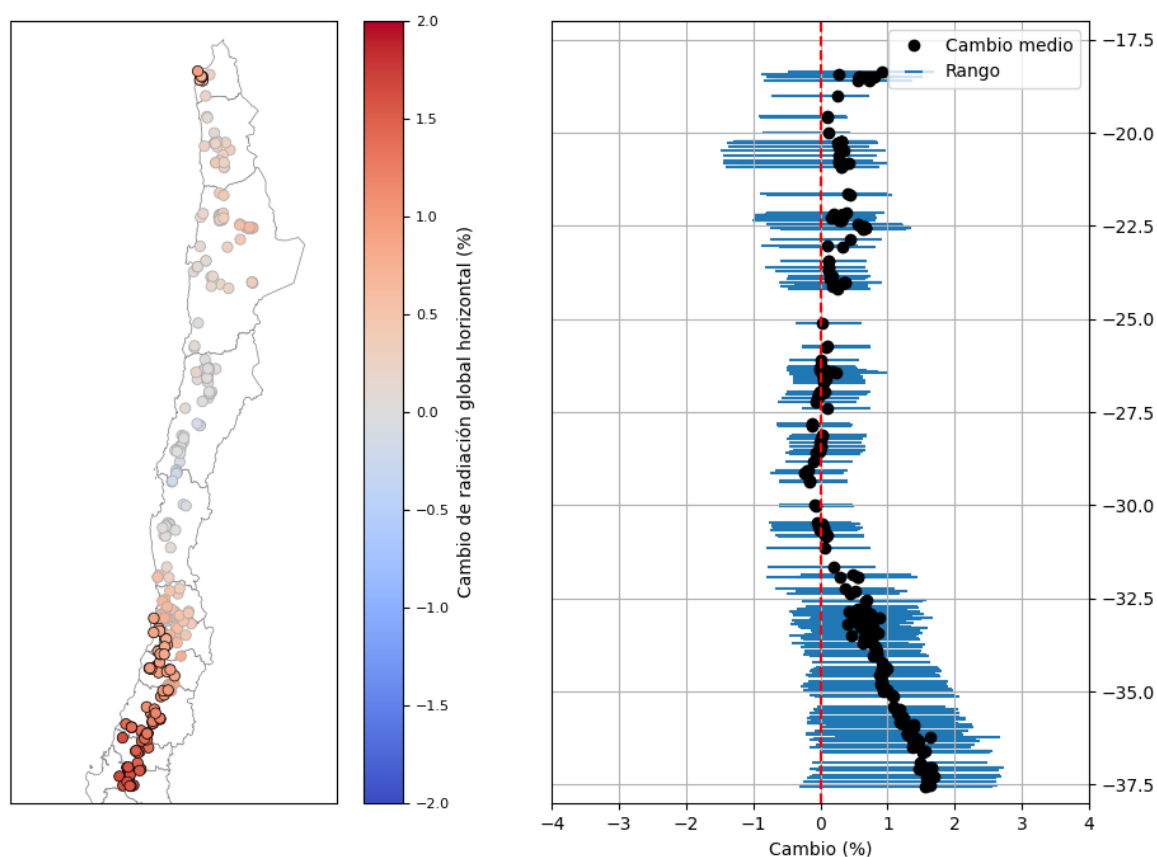


Ilustración 15: Proyecciones de cambio de la radiación global horizontal en los puntos de interés requeridos. En el panel izquierdo se muestra la ubicación geográfica de los puntos de interés, y el valor medio de cambio proyectado. En el panel derecho se permite ver la variabilidad asociada a cada uno de esos valores, representando el rango donde se ubican un 90% de las proyecciones.

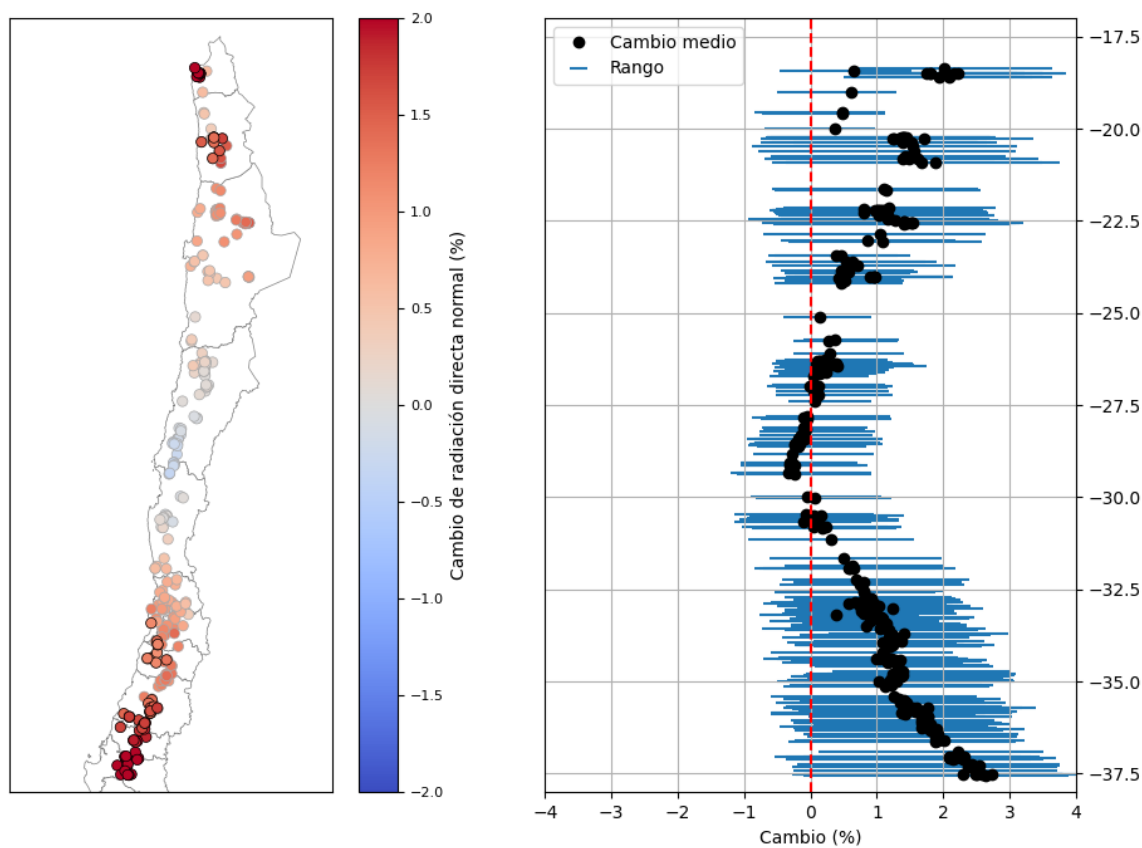


Ilustración 16: Proyecciones de cambio de la radiación directa normal en los puntos de interés requeridos. En el panel izquierdo se muestra la ubicación geográfica de los puntos de interés, y el valor medio de cambio proyectado. El panel derecho permite ver la variabilidad asociada a cada uno de esos valores representando el rango donde se ubican un 90% de los valores proyectados.

4.3.2 Radiación global en paneles solares

En La Ilustración 17 e Ilustración 18 se muestra el cambio de la radiación global incidente en paneles solares inclinados (ángulo de inclinación igual a la latitud del sitio), y paneles que utilizan un sistema de seguimiento HSAT.

Como es de esperar, los resultados obtenidos para los sitios con inclinación equivalente a la latitud se muestran muy similares a lo que se obtuvieron para la radiación global horizontal, donde no se proyectan cambios significativos en los sectores del Norte Grande ni Norte Chico. Desde la región de Valparaíso hacia el sur se observan aumentos coherentes en todos los modelos, pero de valores muy bajos (no mayores a 2% con respecto a línea base).

Los cambios de radiación global incidente en superficie con seguimiento HSAT son homologables a los de la radiación directa normal presentados en la sección anterior, tanto en patrón como comportamiento.

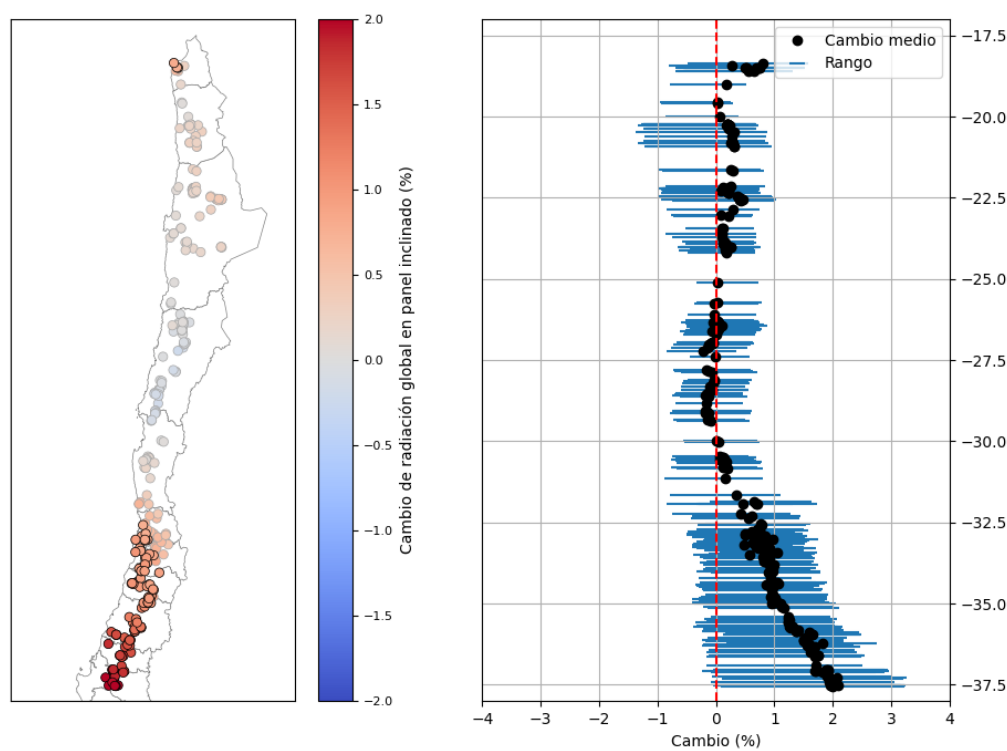


Ilustración 17: Cambios medios en la radiación global incidente en superficie inclinada según latitud del sitio (panel izquierdo), y rangos de variación de cada sitio (panel derecho).

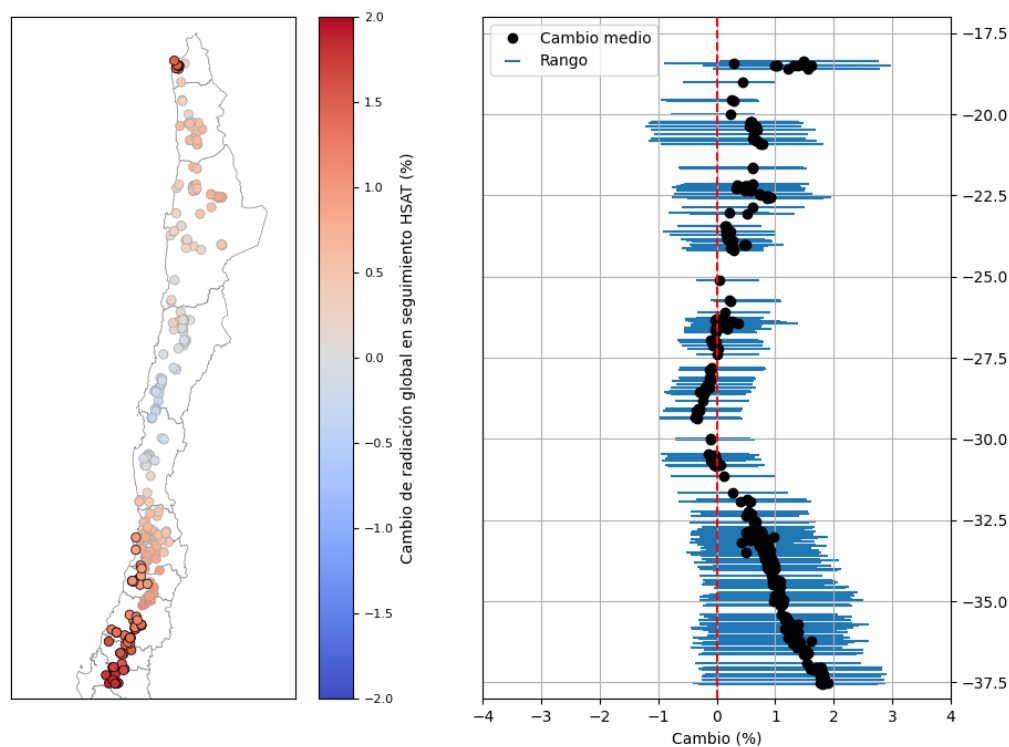


Ilustración 18: Cambios medios en la radiación global incidente en superficie con seguimiento HSAT (panel izquierdo), y rangos de variación de cada sitio (panel derecho).

4.3.3 Producción fotovoltaica

Los gráficos de factor de planta de sistemas de generación fotovoltaica se muestran en la Ilustración 19 e Ilustración 20. Las figuras se basan en las ubicaciones de las plantas solares ya en evaluación ambiental (Centrales_Solares_FV_SEIA). Es notable que, a pesar del aumento de la radiación, la producción fotovoltaica disminuye sobre gran parte del territorio. Esto se debe al impacto del aumento de la temperatura asociado al cambio climático, que reduce la eficiencia de los paneles fotovoltaicos.

Dado que el uso de paneles solares para fines domésticos es relevante en todo Chile y no sólo en el norte, en la Ilustración 21 se muestra el cambio de rendimiento proyectado para el país entero en base a los resultados de la capa de centros comunales (Potencial_GxDx_Cap_Comunales). Se muestra un leve aumento de producción en el centro-sur del país (entre 35 y 45°S) que corresponde a la zona donde disminuirán las precipitaciones. Se infiere que esto representa una menor cantidad de nubes, lo que se relacionaría con mayor radiación incidente. En el extremo norte y el sur, domina el impacto negativo del aumento de la temperatura sobre la eficiencia de generación y, por tanto, la producción solar disminuye.

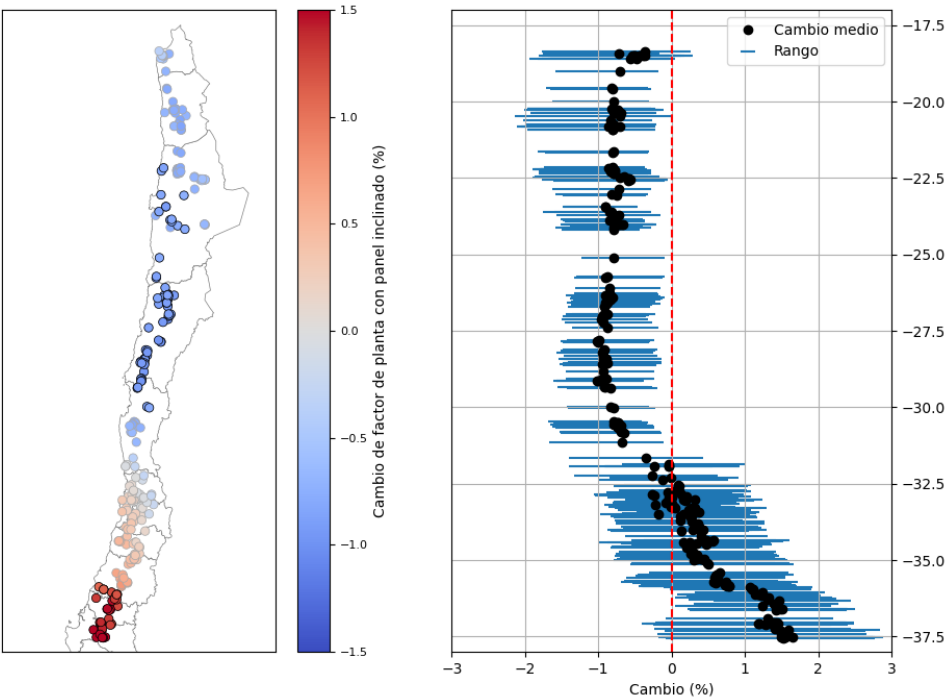


Ilustración 19: Cambios medios del factor de planta de panel solar inclinado distribuidos espacialmente (panel izquierdo), y rangos de variación de cada sitio (panel derecho).

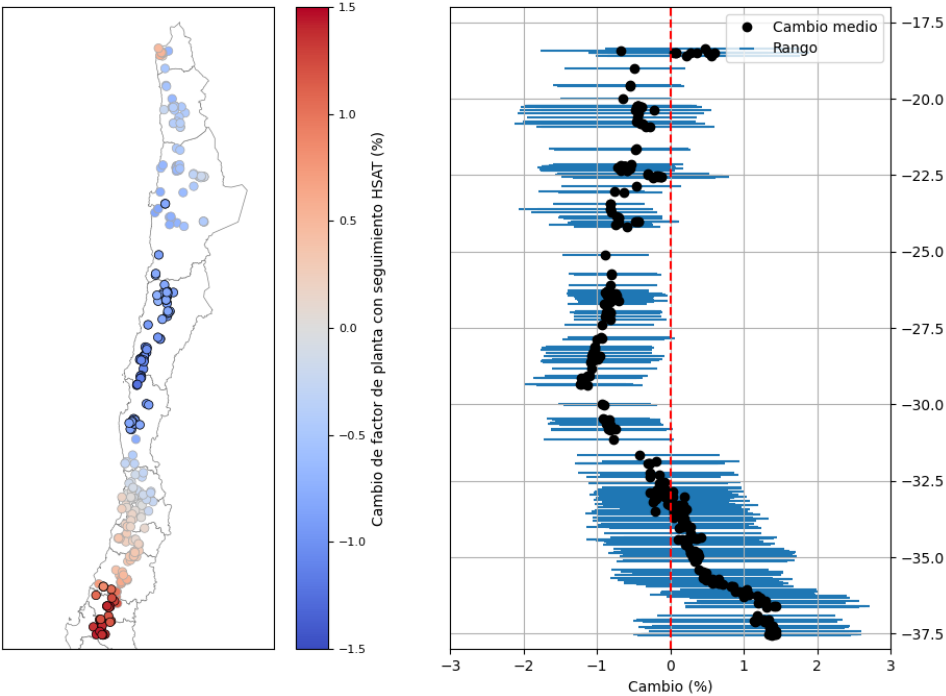


Ilustración 20: Cambios medios del factor de planta de panel solar con sistema de seguimiento HSAT distribuidos espacialmente (panel izquierdo), y rangos de variación de cada sitio (panel derecho).

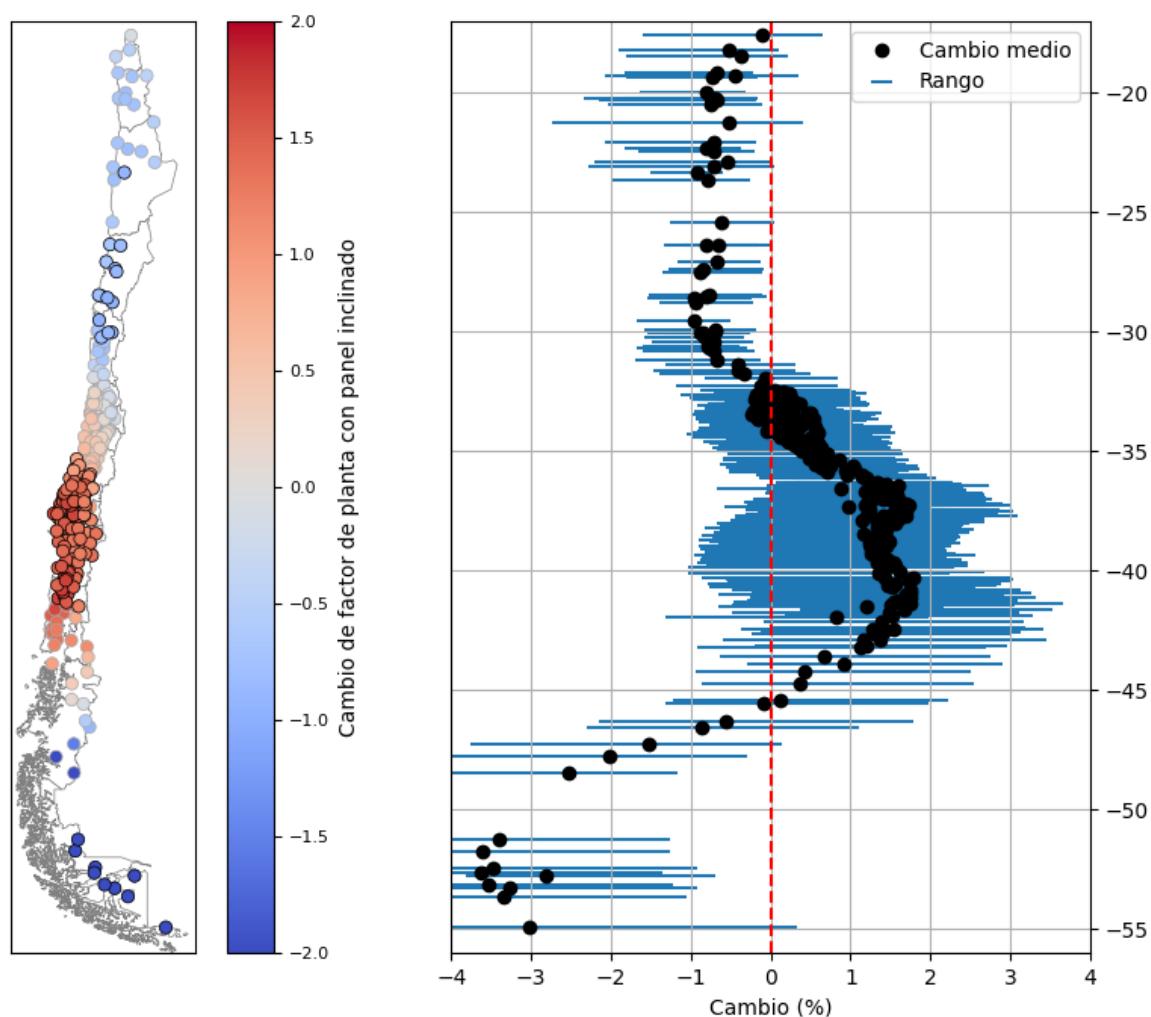


Ilustración 21: Cambio de factor de planta para paneles inclinados a lo largo del país, utilizando los resultados para la capa de centros comunales (Potencial_GxDx_Cap_Comunales). Se muestra en el panel izquierdo los valores medios proyectados, mientras que en el panel derecho se refleja la variabilidad de dicho valor, por medio del rango donde quedan comprendidos el 90% de los valores proyectados

4.4 Energía Eólica

En la Ilustración 22 e Ilustración 23 se muestra el cambio relativo en la velocidad de viento y el factor de planta, utilizando como referencia un modelo de turbina del tipo VESTAS V117, para cada uno de los sitios eólicos en el sistema de evaluación ambiental (Centrales_Eolicas_SEIA_Dic19). Los resultados proyectan una leve disminución de los valores de velocidad de viento y generación eléctrica en la mayor parte de la región mostrada, y que resulta mayor en la zona de Chiloé. Además, estas proyecciones presentan, desde la zona del Norte Chico, coherencia entre todos los modelos (esto no se observa en la zona del Norte Grande, donde los resultados no presentan una tendencia definida según lo indicado por los distintos modelos).

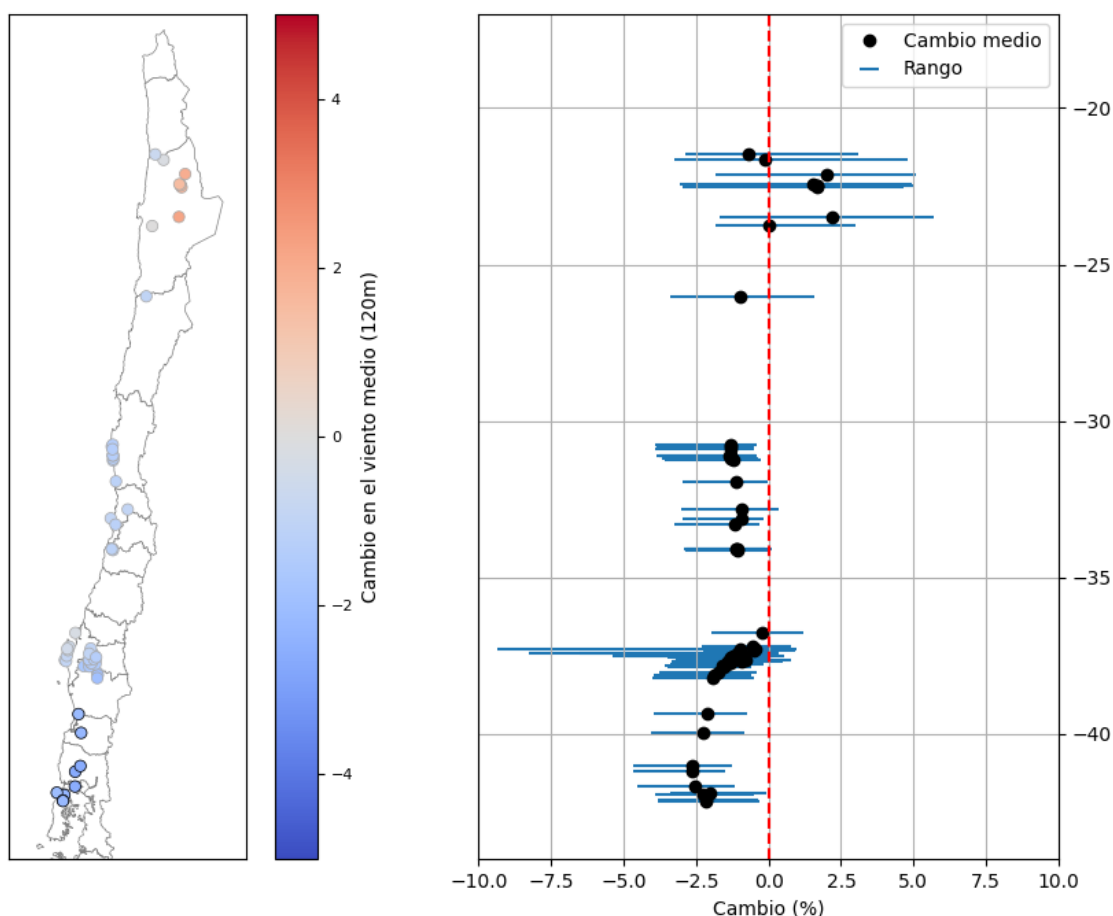


Ilustración 22: Cambio relativo de la velocidad de viento (120 m.s.n.s.) en los sitios de parques eólicos actualmente en evaluación ambiental (Centrales_Eolicas_SEIA_Dic19; panel izquierdo) y rangos de variación esperados por latitud (panel derecho).

Estas proyecciones de disminución tienen efectos considerables sobre los factores de planta de los puntos evaluados. Según lo que se muestra en la Ilustración 23, en los sectores donde se proyectan disminuciones de los valores de viento coherentemente entre todos los modelos, los factores de planta podrían llegar a disminuir en un 10% en los casos más extremos, pero se mantienen en general dentro de un rango entre -7.5% y 0%.

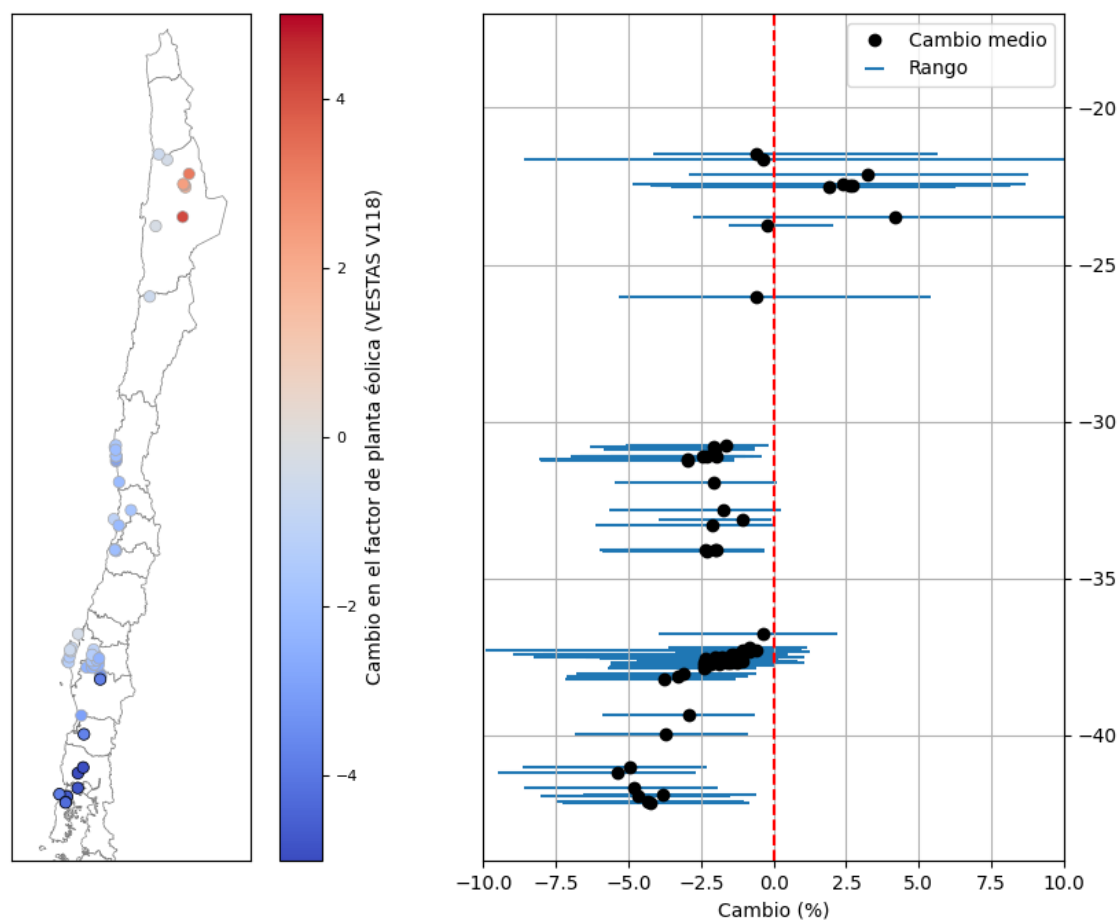


Ilustración 23: Cambio relativo el factor de planta en los sitios de parques eólicos actualmente en evaluación ambiental (Centrales_Eolicas_SEIA_Dic19). El factor de planta se calcula con el viento en 120 metros de altura y la curva de potencia de una turbina Vestas V-117.

4.5 Eventos extremos

En esta sección se presentan ejemplos relevantes de los cambios en la frecuencia de eventos extremos, así como también breves comentarios sobre los efectos más importantes identificados.

4.5.1 Crecidas

En la Ilustración 24 e Ilustración 25 se muestran los cambios en la intensidad de las crecidas asociadas a periodos de retorno (T) de 30 años y de 1 año, que corresponden a crecidas excepcionalmente grandes y normales, respectivamente.

Los resultados muestran que la magnitud de las crecidas muy grandes ($T = 30$), en promedio, se mantiene o incluso aumenta bajo un escenario de cambio climático. Esto ocurre a pesar de la disminución general de la precipitación, debido en parte al aumento de temperatura asociado, el cual genera un aumento de la superficie de las cuencas expuesta a precipitaciones líquidas sujetas a escurrimientos inmediatos. Esto es mayormente esperable en la zona comprendida entre 40°S y 50°S . En el sector centro y centro-sur del país la tendencia no resulta tan clara, y se observa una gran variabilidad entre las proyecciones realizadas por los diversos modelos (notar que mientras más al norte se ubique la cuenca de interés, mayor es la variabilidad esperada en el valor del caudal de crecida).

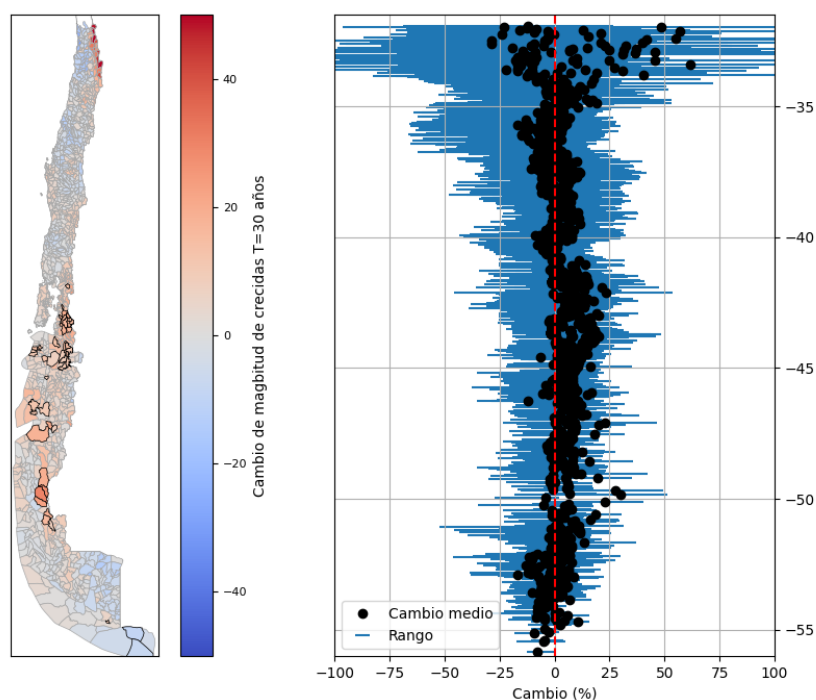


Ilustración 24: Cambio relativo de la intensidad de crecidas de periodo de retorno de 30 años, ejemplificada por unidad de sub-subcuenca (panel izquierdo) y su variabilidad proyectada en función de los diversos modelos de proyección climática (panel derecho).

Por otra parte, las crecidas regulares ($T = 1$ año) muestran una clara disminución de intensidad en la zona central y centro-sur del país (entre 30°S y 45°S), y un patrón relativamente estacionario desde la latitud 45°S hacia el sur. Se infiere que la

disminución de estas crecidas en el sector centro-sur está asociada a la disminución de los eventos de precipitación en la zona, y, en general, se observa una alta coherencia entre todos los modelos, incluso los más optimistas, hacia una disminución.

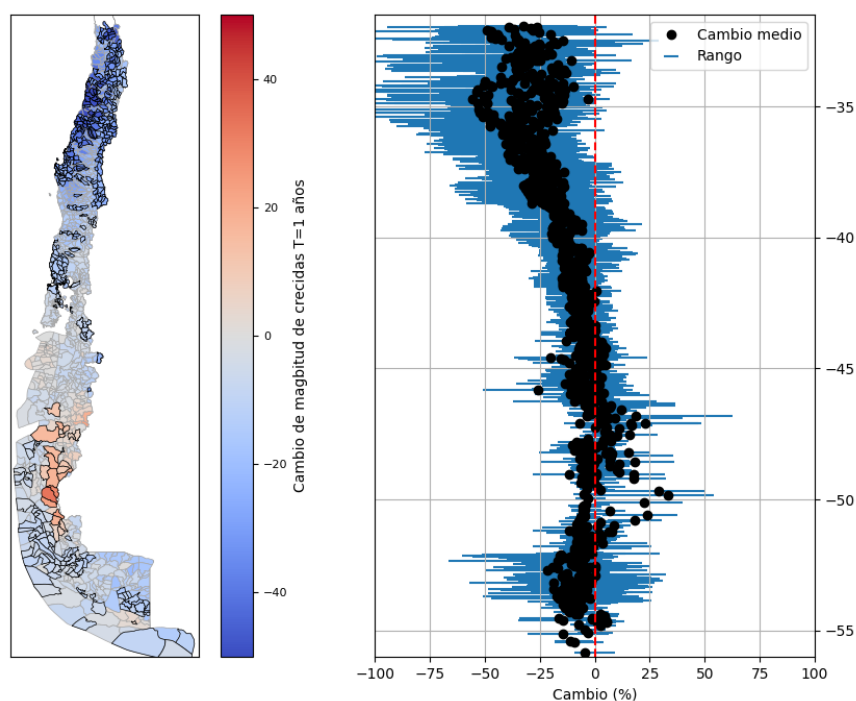


Ilustración 25: Cambio relativo de la intensidad de crecidas de periodo de retorno de 1 año, ejemplificada por unidad de sub-subcuenca (panel izquierdo) y su variabilidad proyectada en función de los diversos modelos de proyección climática (panel derecho).

4.5.2 Lluvias intensas

En la Ilustración 26 se muestra un ejemplo del cambio de la frecuencia de eventos de lluvia intensa, donde se grafica el umbral de 20 mm diarios (lluvias intensas). En el centro y sur del país, la frecuencia de eventos disminuye entre 10 y 20%. Sin embargo, en la cordillera del centro y norte del país, se aprecia un aumento de episodios de lluvia que se asocia al aumento de la temperatura. Algo parecido se observa en la región de las Magallanes. Sin embargo, debido a los complejos procesos orográficos, se observa gran variabilidad entre las distintas proyecciones.

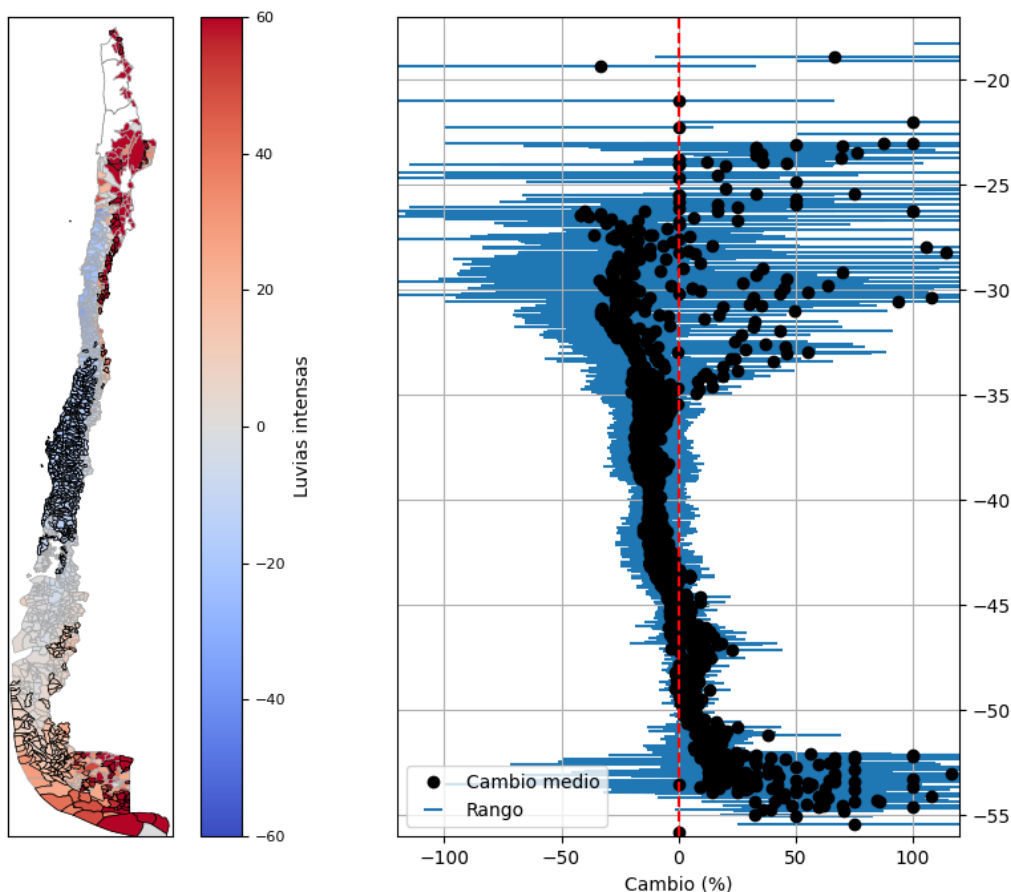


Ilustración 26: Cambio medio de la frecuencia de eventos de lluvia sobre 20 mm, para todas las sub-subcuencas de Chile (panel izquierdo) y su variabilidad proyectada asociada a los distintos modelos (panel derecho).

4.5.3 Nevazones

La Ilustración 27 muestra los resultados del análisis de cambio de eventos de nevazón en los sectores cordilleros a nivel nacional. Como es de esperar, y ya un poco adelantado en el análisis de eventos de crecidas, al aumento de temperatura asociado al cambio climático, combinado con la disminución de las precipitaciones, provoca una fuerte disminución en la frecuencia de nevazones a lo largo del país. Los resultados de los modelos, a pesar de tener alta variabilidad, en general muestran tendencias coherentes a la disminución.

Destacan en particular de forma preocupante múltiples puntos donde se observa que la disminución de los eventos es de un 100%, es decir, sectores que previamente registraban nieve proyectan no tener precipitaciones sólidas en el periodo 2030-2060.

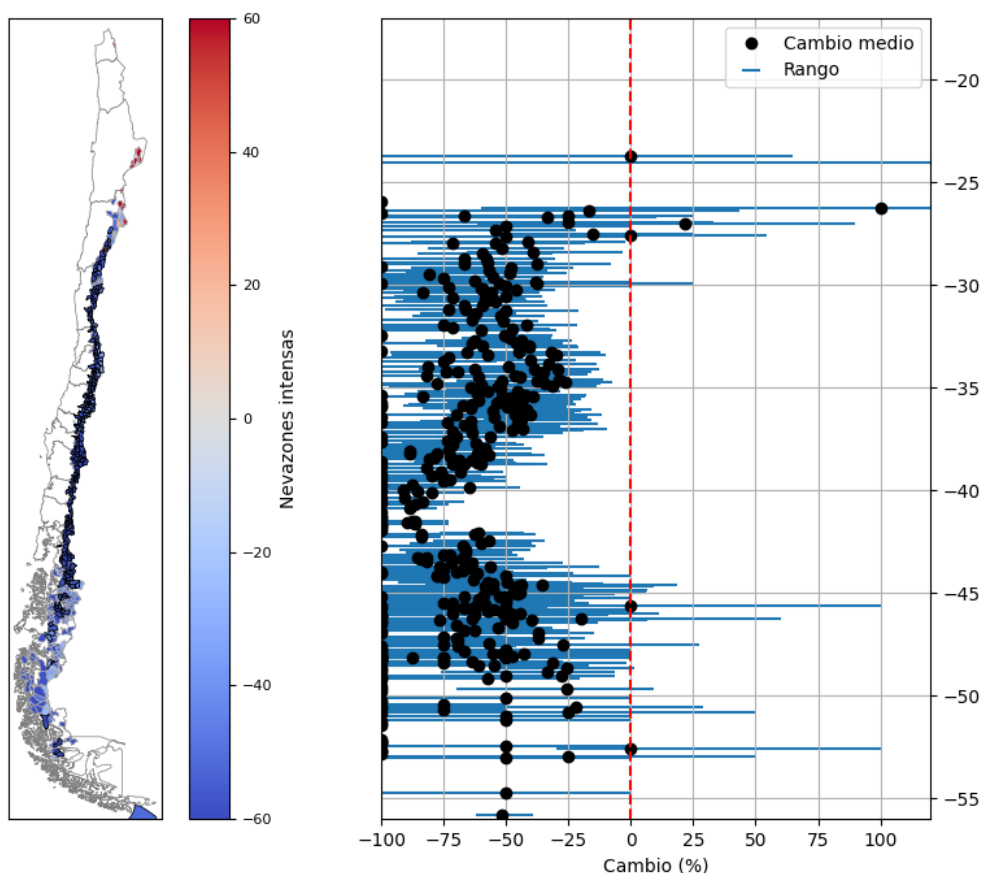


Ilustración 27: Cambio de la frecuencia media de eventos de nieve sobre 20 mm (agua equivalente), para todas las sub-subcuencas de Chile (panel izquierdo) y su variabilidad proyectada asociada a los distintos modelos (panel derecho).

4.5.4 Eventos de viento fuerte

En la Ilustración 28 se muestra un ejemplo del cambio en el número de horas anuales de viento intenso (> 15 m/s). Se calcula para la capa de terminales marítimos, suponiendo que el viento podría ser un factor que influye en la operatividad del puerto. Consistente con los resultados mostrados para la energía eólica, se puede apreciar que el cambio en la frecuencia de los eventos extremos es relativamente pequeño (menos de 10% para la mayoría de los puertos) y la incertidumbre es muy significativa (en muchos puertos los GCM no muestran *consensos* sobre el signo de la tendencia). Esto conduce a que resulte imposible tener un resultado significativo en esta variable.

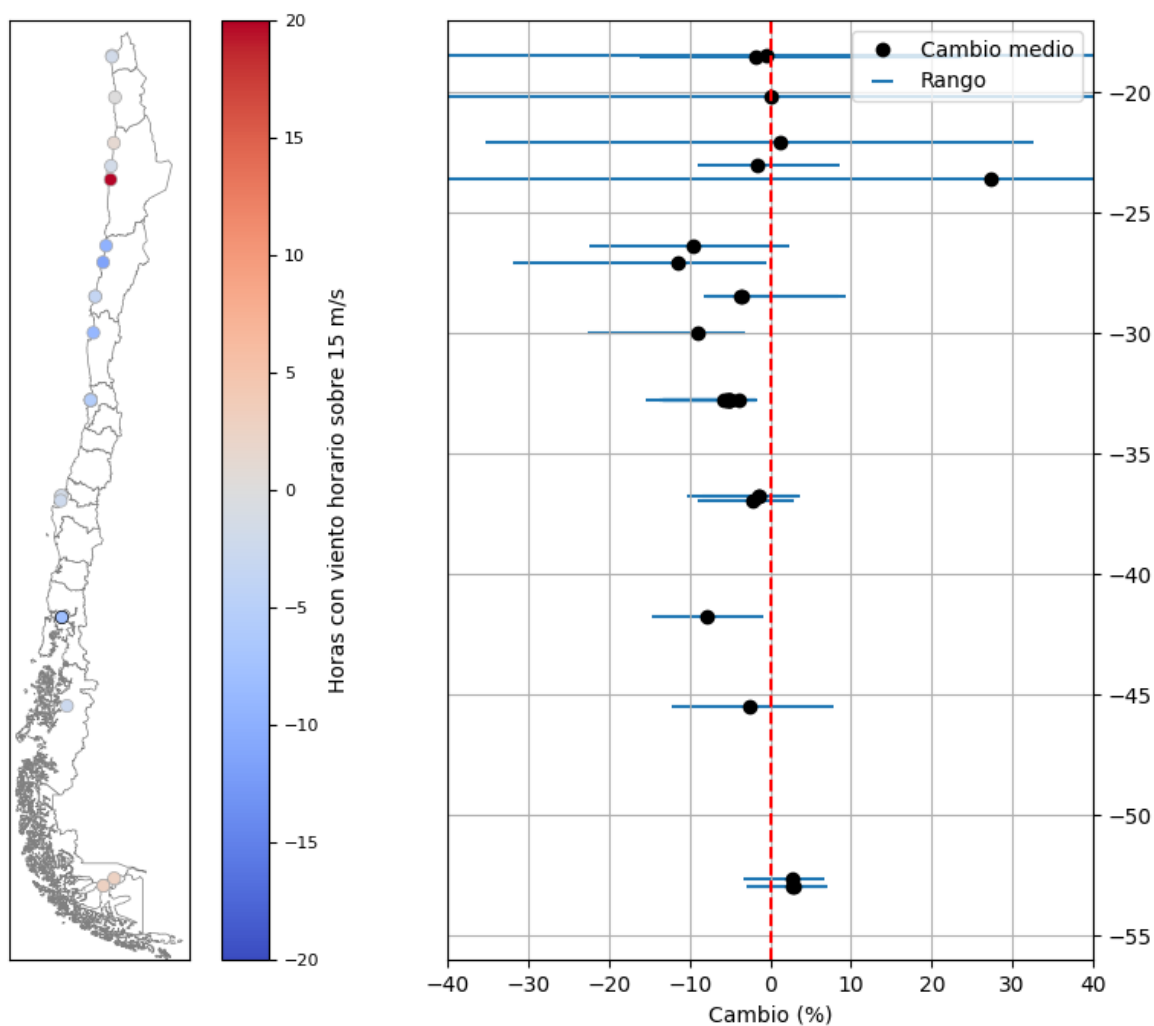


Ilustración 28: Cambio relativo medio en la frecuencia de horas de viento sobre 15 m/s, para los sitios de terminales marítimos (panel izquierdo) y variabilidad de cada valor medio (panel derecho). Notar que los rangos son altamente variables.

4.6 Eventuales trabajos futuros

Debido al enfoque del presente estudio, y limitaciones de tiempo y recursos debido a la alta demanda computacional inherente al proyecto, no fue posible abordar una serie de elementos que sin duda resultarían de gran interés en revisar.

Dentro de esta categoría, destacan especialmente el desarrollo de proyecciones sobre algunos tipos de eventos extremos que no pudieron ser desarrollados a cabalidad. Se especifican a continuación algunas propuestas:

1. **Análisis de incendios:** este tipo de eventos extremos puede ser considerado una consecuencia de factores tanto meteorológicos (temperatura, viento, precipitación) como no-meteorológicos (presencia de combustible, cercanía de actividades humanas, entre otros). Si bien, se cuenta con información de las variables del primer tipo, es necesario desarrollar un estudio enfocado específicamente para levantar antecedentes suficientes de información no meteorológica y la forma de representar la interacción entre ambos tipos para evaluar de forma adecuada este tipo de eventos.

Algunas alternativas a evaluar para desarrollar este punto son:

- a) Cálculo de riesgo de incendios desarrollado en el estado California, Estados Unidos. (<https://cal-adapt.org/>). Este tipo de índice se basa en el estudio detallado de la relación entre variables atmosféricas, vegetación, densidad de población, y datos de incendios.
 - b) Uso del índice de amenaza definido por el grupo de trabajo de Bosques para el proyecto Atlas de Riesgo (ARCLIM). Se podría evaluar la posibilidad de realizar un cálculo similar.
2. **Aluviones:** un riesgo asociado a los tipos de eventos extremos de precipitaciones, información que podría servir como indicadores del riesgo de aluviones. Sin embargo, se requieren antecedentes adicionales de geomorfología, sedimentológicos, hidráulicos, entre otros, para realizar una evaluación adecuada de este tipo de eventos.

5 Conclusiones y comentarios de cierre

En este informe se ha descrito el planteamiento, marco teórico y desarrollo general de las bases de datos desarrolladas para la estimación del efecto del cambio climático en las distintas fuentes de energías renovables (hidráulica, eólica y solar).

El marco de trabajo propuesto que corresponde a la simulación de caudales en el caso de los recursos hídricos para potencial hidroeléctrico y de ajuste de series de variables meteorológicas para el potencial eólico y solar según lo proyectado por distintos modelos de cambio climático proveerá de una base de datos coherente espacio-temporalmente para todos los puntos de interés solicitados, en distintas escalas temporales. Dada la cantidad de puntos solicitados y la escala temporal a la que están siendo calculados, el proceso de cálculo ha resultado significativo y extenso, y del cual se obtuvieron importantes volúmenes de datos.

La base de datos final entregado con el estudio contiene proyecciones del periodo 1980 a 2060 (81 años) con 18 GCM diferentes, para un total de 13 variables horarias y 10 variables diarias, considerando más de 14,000 emplazamientos a lo largo del país. La base de datos consiste en archivos de formato CSV con series de tiempo en intervalos horarios, diarios, mensuales y anuales, junto con archivos de resumen en el formato de intercambio SIG GeoJSON, y otros archivos de metadatos. En total, la base de datos ocupa > 3Tb de disco y seguramente se puede considerar entre los análisis más completos del impacto de cambio climático en los recursos renovables de Chile que se han realizado hasta la fecha.

Resulta interesante destacar que al tomar la información entregada por cada modelo GCM para todas las variables, se tienen escenarios que son coherentes tanto espacial como temporalmente, lo cual puede ser relevante para efectos de planificación. Así, por ejemplo, un año de hidrología más húmeda, será coherente espacialmente en que todas las zonas analizadas sean húmedas, pero también estarán relacionadas con las intensidades de viento que se proyecten y la cantidad de radiación.

Como parte del proyecto se ha realizado un breve análisis de las principales consecuencias del cambio climático en base a resultados seleccionados de la base de datos, en que se contrastó las condiciones del clima presente (1981-2010) con las condiciones proyectadas para el periodo 2031 a 2060. Las principales conclusiones de este análisis se enumeran a continuación:

- Se proyecta un fuerte descenso en la disponibilidad del recurso hídrico, caracterizado por una disminución de aproximadamente 20% del caudal medio en la zona centro y centro-sur del país. Esta disminución del recurso hídrico implica una disminución media de ~10% del factor de planta de las futuras centrales de pasada.
- Los recursos solares y eólicos muestran una menor sensibilidad al cambio climático. En particular, las tendencias de estos recursos no superan +/- 5% y hay un alto nivel de incertidumbre en el signo de las tendencias.
- Se observa un leve pero significativo aumento de la radiación solar en la zona central y centro-sur del país, debido a la disminución de precipitaciones en esta zona.

- En el caso de la generación fotovoltaica, el aumento de temperatura afecta el rendimiento de los paneles solares, lo que provoca una leve disminución (-1.2%) del factor de planta en el centro y norte de Chile.

Adicionalmente al análisis de la tendencia en los recursos renovables, se analizó además los cambios proyectados en la frecuencia de episodios extremos, las cuales podrían impactar en la operación del sistema eléctrico del país. Las conclusiones principales son las siguientes:

- Se proyecta un leve aumento en la magnitud de las crecidas más extremos. Por otra parte, se proyecta una leve disminución de la magnitud de crecidas “regulares”
- Se proyecta una leve disminución de la frecuencia de episodios de lluvia intensa en la zona centro-sur del país. Aumento de frecuencia de lluvia en la cordillera de la zona central y el norte, y en las Magallanes
- Se observa una disminución general (en todo el país) de eventos de nevazones y heladas.
- Se proyecta un aumento importante de la frecuencia de sequía en la zona central y centro-sur del país.
- Se proyecta un aumento general y fuerte de la frecuencia de olas de calor y días calurosos
- Se observa poca variación en la frecuencia de eventos de viento fuerte

La base de datos entregado con este informe cuenta con todos los elementos que para poder profundizar sobre estas conclusiones generales y realizar análisis más detallados, como por ejemplo el análisis de la estacionalidad de los cambios futuros o la simulación de sus impactos en el sistema eléctrico. Dicha base se entrega en un disco duro externo puede ser revisado preliminarmente en <http://190.96.79.51/giz/>.

6 Referencias

Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 413-421.

Boisier, J.P., Alvarez-Garreton, C., Cordero, R.R., Damian, A., Gallardo, L., Garreaud, R.D., Lambert, F., Ramallo, C., Rojas, M. and Rondanelli, R. (2018) Anthropogenic drying in CentralSouthern Chile evidenced by long term observations and climate model simulations. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6, 74. <https://doi.org/10.1525/elementa.328>.

Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J.P. and Valdivieso, J. (2018) Projected hydroclimate changes over Andean basins in Central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. *Climatic Change*, 150, 131–147.

Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes?. *Journal of Climate*, 28(17), 6938-6959.

Falvey, M. and R. Garreaud, 2009: Regional Cooling in a Warming World: Recent Temperature Trends in the Southeast Pacific and along the West Coast of Subtropical South America (1979-2006), *Journal of Geophysical Research*, 114, D04102, doi:10.1029/2008JD010519

Flood Estimation Handbook, *UK Centre for Ecology & Hydrology*.

Garreaud, R. and M. Falvey, 2008: The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios. *Int. J. of Climatology*. doi: 10.1002/joc.1716

Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., ... & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology & Earth System Sciences*, 21(12).

Hamman, J. J., Nijssen, B., Bohn, T. J., Gergel, D. R., and Mao, Y.: The Variable Infiltration Capacity model version 5 (VIC-5): infrastructure improvements for new applications and reproducibility, *Geosci. Model Dev.*, 11, 3481-3496, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-3481-2018>, 2018.

Liang, X., D. P. Lettenmaier, E. F. Wood, and S. J. Burges (1994), A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models, *J. Geophys. Res.*, 99(D7), 14415–14428, [doi:10.1029/94JD00483](https://doi.org/10.1029/94JD00483).

Michelangeli, P. A., Vrac, M., & Loukos, H. (2009). Probabilistic downscaling approaches: Application to wind cumulative distribution functions. *Geophysical Research Letters*, 36(11).

Santana C. S., M. Falvey, M. Ibarra y M. Garcia 2014: ENERGÍAS RENOVABLES EN CHILE: EL POTENCIAL EÓLICO, SOLAR E HIDROELÉCTRICO DE ARICA A CHILOE. 2014, ISBN: 978-956-8066-15-4, Publicación de GIZ.

Switanek, M. B., Troch, P. A., Castro, C. L., Leuprecht, A., Chang, H. I., Mukherjee, R., & Demaria, E. (2017). Scaled distribution mapping: a bias correction method that preserves raw climate model projected changes.

Taylor, K.E., R.J. Stouffer, G.A. Meehl: An Overview of CMIP5 and the experiment design." Bull. Amer. Meteor. Soc., 93, 485-498, [doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1), 2012.

Williams CJR (2017) Climate Change in Chile: An Analysis of State-of-the- Art Observations, Satellite-Derived Estimates and Climate Model Simulations. J Earth Sci Clim Change 8:400. doi: 10.4172/2157-7617.1000400

Water Resources Engineering, 2005 Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2005

ANEXO A: Análisis de solicitudes para la caracterización de eventos extremos

En la etapa inicial del proyecto la contraparte técnica de GIZ ha solicitado a Meteodata el cálculo de varios indicadores para caracterizar el cambio en la frecuencia y/o intensidad de eventos extremos en el clima futuro. Los tipos de eventos solicitados se presentan en la Tabla 22. En este anexo se entrega el análisis realizado por Meteodata que permitió identificar cuáles de los eventos solicitados efectivamente pudieron ser abordados en el proyecto, y proponer metodologías específicas para ellos. El contenido de este anexo fue entregado como primer informe de avance al cabo de primer mes de ejecución del proyecto.

Tabla 22: Tipo de eventos climáticos solicitados.

	Tipo de evento extremo	¿Se puede calcular?
1	Sequía	SÍ
2	Crecidas	SÍ
3	Crecidas extremas	SÍ
4	Tornados	NO
5	Vientos extremos	SÍ
6	Olas de calor	SÍ
7	Inverno boliviano-Lluvias de verano	SÍ
8	Tormentas de verano	SÍ
9	Tormentas de arena	NO
10	Heladas	SÍ
11	Nevazones	SÍ
12	Incendios	NO
13	Aluviones	NO
14	Fenómeno del Niño	NO

Es importante señalar que varios de los eventos extremos solicitados en la Tabla 22 no se pueden abordar en el presente proyecto debido a que corresponden a eventos de una escala demasiado pequeña para ser tratados con los datos disponibles, o que su ocurrencia involucra factores adicionales que escapan el alcance del presente proyecto.

Para los fines del cálculo de los índices se definen periodos de 30 años de largo que corresponde al clima de referencia y el clima futuro, según la Tabla 23.

Tabla 23. Periodo de referencia y periodo futuro.

Periodo	Años
Clima de referencia	1981-2010
Clima futuro	2031-2060

Las estadísticas de episodios extremos para el periodo de referencia se calculan con los resultados **simulados** por los modelos GCM para 1980 a 2010, no con las observaciones del clima para el mismo periodo. Se destaca también que el periodo de referencia no incluye la década de 2010 a 2019 que ha sido particularmente seca en la zona central de Chile. Esto no afectaría significativamente los resultados del estudio ya que la mega-sequía es una anomalía climática que sólo se debe parcialmente al fenómeno de cambio climático (REF) y no se manifiesta en las simulaciones que se usan para caracterizar el clima de referencia. Se propone generar resultados considerando el año completo, las 4 estaciones del año, y los meses del año individualizados. Es decir, para cada tipo de evento extremo se contará con 17 resultados, según la Tabla 24:

Tabla 24: Periodos (estaciones) del año a considerar.

Periodo del año	Meses incluidos
Año completo	Todos los meses
Verano	Diciembre, Enero, Febrero
Otoño	Marzo, Abril, Mayo
Invierno	Junio, Julio, Agosto
Primavera	Septiembre, Octubre, Noviembre
Meses individuales	Enero
	Febrero
	Marzo
	Abril
	Mayo
	Junio
	Julio
	Agosto
	Septiembre
	Octubre
	Noviembre
	Diciembre

Metodologías específicas

A continuación, se describe la metodología específica para cada uno de los eventos solicitados que pueden ser efectivamente abordados en el contexto de este proyecto. En el caso de aquellos donde no es posible cuantificar su cambio respecto a línea base, se dan las razones correspondientes.

Sequía

Para obtener el cambio de la frecuencia de sequías se propone ocupar dos métricas:

5. **Standardized Precipitation Index (SPI)**: calculable en todos los puntos geográficos, es una medida de sequías meteorológicas basada en la precipitación. Es una métrica recomendada por la Organización Mundial de Meteorología (WMO).
6. **Streamflow Drought Index**: calculable en puntos donde se estimen caudales. Es similar al SPI pero calculado en base a los caudales. Provee una mejor estimación de la disponibilidad de las aguas superficiales.

Crecidas extremas

Se propone definir las crecidas como los eventos en que se supera el caudal asociado a ciertos periodos de retorno en el clima actual. El periodo de retorno es una variable usada en la hidrología para caracterizar la magnitud y frecuencia de crecidas (ver por ejemplo Water Resources Engineering, 2005 Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2005 o "Flood Estimation Handbook". UK Centre for Ecology & Hydrology)

Los cálculos se harán para caudales diarios y caudales semanales. La Tabla 25 presenta un resumen de los periodos de retorno considerados. Para cada periodo de retorno se calcularán los siguientes datos:

- El caudal (Q_T) asociado al periodo de retorno en el periodo de referencia
- Periodo de retorno de los eventos que superan el Q_T en el periodo futuro

Tabla 25: Definición de crecidas, según periodo de retorno.

Intervalo	Periodo de retorno
Diario	1 año
Diario	5 años
Diario	10 años
Diario	20 años
Semanal	1 año
Semanal	5 años
Semanal	10 años
Semanal	20 años

No es factible estimar el cambio de la frecuencia y/o intensidad de tornados en el presente estudio. Los tornados corresponden a un fenómeno extremadamente localizado y muy poco frecuente en Chile. Solo en los años recientes se ha podido estudiar algunos ejemplos (concentrados en la región de Biobío) y los mecanismos que los provocan en Chile son un tema de debate científico, aunque se sabe que su ocurrencia en Chile responde a factores meteorológicas de la atmósfera media como energía disponible para convección y el gradiente vertical de viento. Este tipo de variables no están disponibles en las salidas de las simulaciones de cambio climático. En este contexto, no existe suficiente información para realizar un análisis del cambio de la frecuencia de tornados bajo cambio climático.

Vientos extremos

Se propone calcular el cambio de la frecuencia de episodios de viento horario y diario que superan los umbrales indicados en la Tabla 26. Los umbrales de 20 y 25 m/s corresponden a los niveles típicos en que las turbinas eólicas dejan de funcionar (*cut-out velocity*). Los cálculos se realizarán para la altura (o alturas) solicitadas para cada sitio donde se extrae información de viento.

Tabla 26: Umbrales para los eventos de viento fuerte.

Intervalo	Umbral de viento
Diario	10 m/s
Diario	15 m/s
Horario	15 m/s
Horario	20 m/s
Horario	25 m/s

Olas de calor

Se acoge la sugerencia de GIZ de caracterizar las olas de calor de acuerdo con la definición y umbrales utilizadas por la Dirección Meteorológica de Chile en su página web.⁷

En resumen, la metodología señala que se considera como ola de calor todo evento de tres días seguidos donde se supere el percentil 95 de las temperaturas diarias. Dicho percentil debe ser calculado con respecto a la climatología de los valores por medio del cálculo de un armónico que represente esta serie adecuadamente.

Invierno boliviano - Lluvias de verano

El Invierno Boliviano corresponde a un periodo lluvioso entre los meses de diciembre a marzo en la zona Altiplánica de Chile. Se propone generalizar este requerimiento a considerar la ocurrencia de lluvias fuertes independiente de la ubicación geográfica y estación del año, abarcando así el punto descrito en el siguiente acápite. La lluvia se define como la precipitación en un día, y donde además se cumpla que la temperatura media es mayor a 0°C. Se propone definir los umbrales según la Tabla 27.

⁷ <<https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/diario/mapaRecienteOlaDeCalor/>>

Tabla 27: Umbrales para episodios de lluvia intensa en verano.

Categoría	Umbral
Lluvias moderadas	> 10 mm / día
Lluvias intensas	> 20 mm / día
Lluvias muy intensas	> 30 mm /día

Tormentas de verano

Se considera que el punto anterior (Tabla 27) efectivamente toma en cuenta la ocurrencia de tormentas de verano, dado que el índice se calcula para todos los sitios incluidos en el análisis y para estaciones del año individualizados (ver Tabla 24).

Tormentas de arena

Las tormentas de arena no se pueden considerar en el presente estudio ya que no se cuenta con antecedentes sobre los factores que contribuyen a su ocurrencia. Además, dichos factores deberían incluir aspectos no-meteorológicas, como por ejemplo la disponibilidad de polvo o arenas en la superficie.

Heladas

Se propone calcular la frecuencia de días en que la temperatura mínima diaria es menor a 0°C.

Nevazones

Se propone calcular la ocurrencia de episodios de nieve fuertes, usando un esquema similar a lo propuesto para las lluvias intensas. En este caso, un episodio de nieve se define como la precipitación en un día en que la temperatura media es menor a 0°C. Se propone definir los umbrales según la Tabla 28:

Tabla 28. Umbrales para episodios de nevazón.

Categoría	Umbral
Nevazones moderadas	> 10 mm / día (agua equivalente)
Nevazones intensas	> 20 mm / día (agua equivalente)
Nevazones muy intensas	> 30 mm / día (agua equivalente)

Cabe señalar que 1 mm de nieve agua equivalente corresponde a la acumulación de un espesor de nieve fresca de aproximadamente 1 cm de altura.

Incendios

Se considera difícil realizar una estimación del cambio en la frecuencia de incendios dado que este variable depende de una combinación entre múltiples factores meteorológicos (temperatura, viento y precipitación) y no-meteorológicos (presencia de combustible, cercanía de actividades humanos, entre otros). Meteodata no conoce una metodología establecida para determinar la probabilidad de incendios que sea aplicable y validada para todo el país, basada exclusivamente en información desarrollada en este proyecto.

Aluviones

No se puede considerar los aluviones directamente ya que este tipo de eventos dependen de no solo de factores meteorológicos, sino que también de factores no meteorológicos, tales como la presencia de material de arrastre y la geomorfología de las cuencas hidrográficas. Se considera que los índices de caudal extremo (sección 4.5.1) y/o de lluvias intensas (sección 4.5.2), calculadas para las cuencas de interés, podrían servir como indicadores del riesgo de aluviones. Sin embargo, está fuera del alcance del presente proyecto intentar realizar un cálculo directo del cambio de la probabilidad de aluviones.

El Fenómeno del Niño

El fenómeno de El Niño es un fenómeno que asociado a la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico tropical oriental. No se puede incluir porque el proyecto considera sólo información para Chile.

ANEXO B: Evaluación de la simulación de la estadística diaria

Laguna Maule

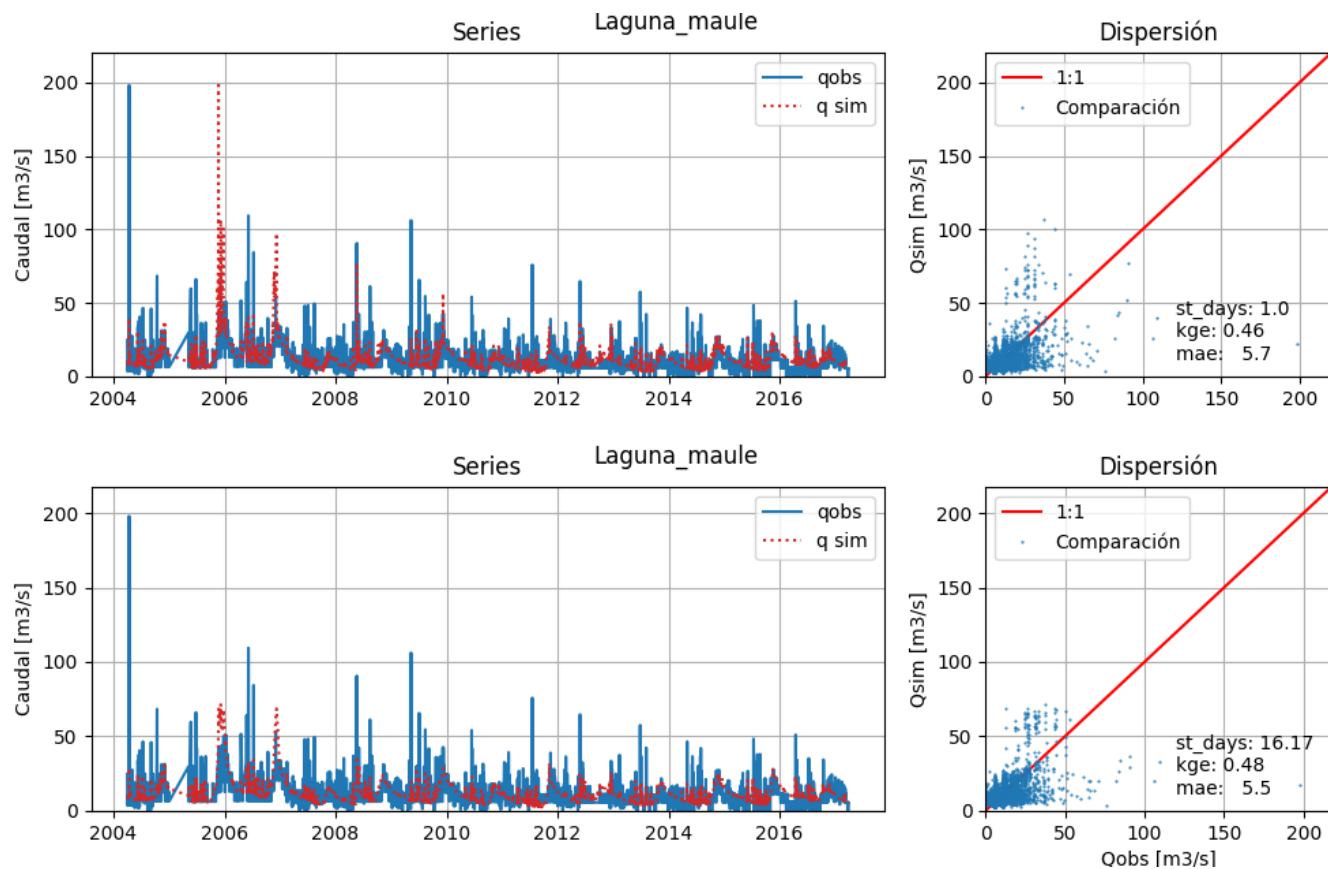


Ilustración 29: Comparación de caudales simulados con parámetros de escurrimiento directo modificados (panel superior) y originales (panel inferior) en la cuenca Laguna Maule.

Laguna Invernada

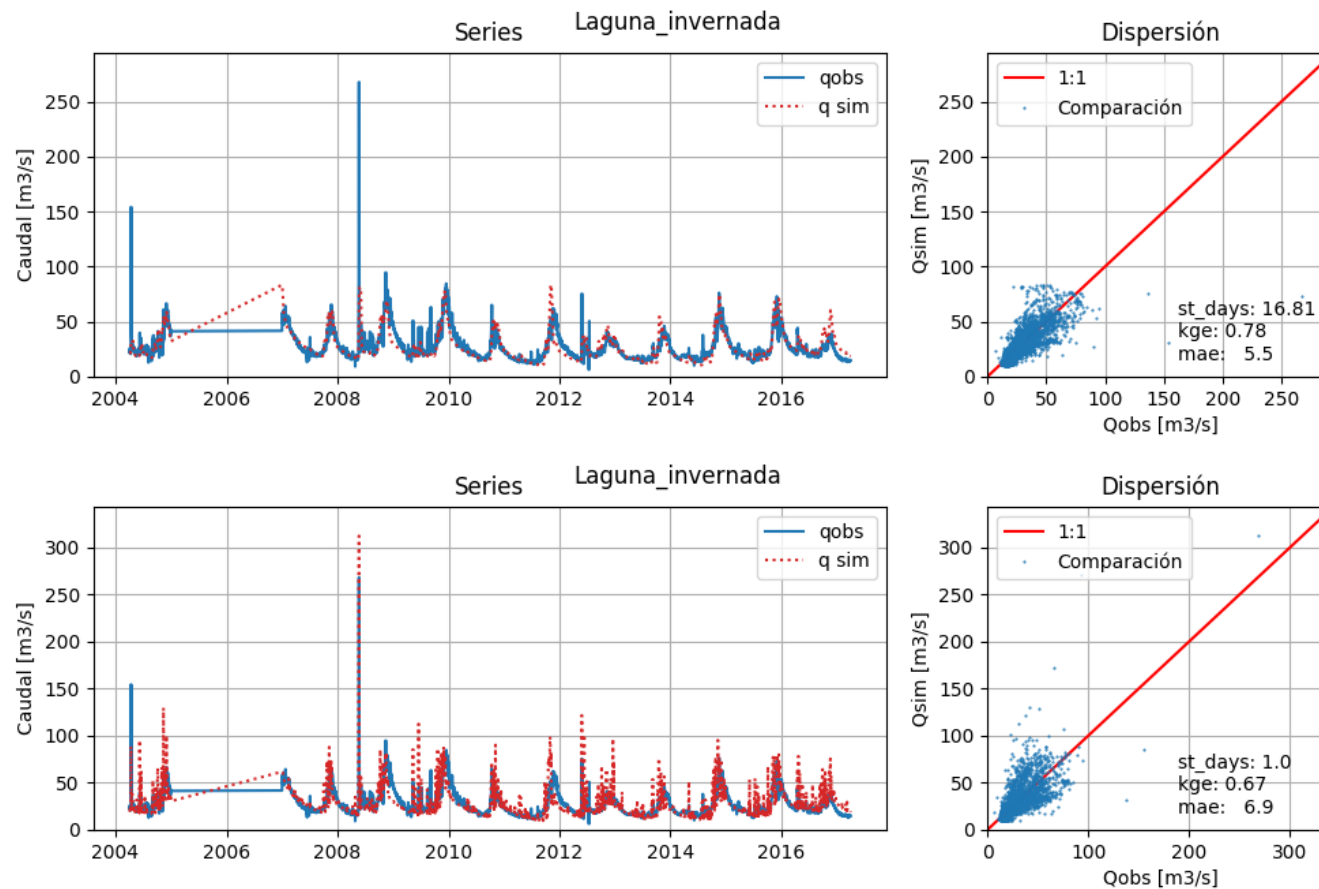


Ilustración 30: Comparación de caudales simulados con parámetros de escurrimiento directo modificados (panel superior) y originales (panel inferior) en la cuenca Laguna Invernada.

Riego Melado

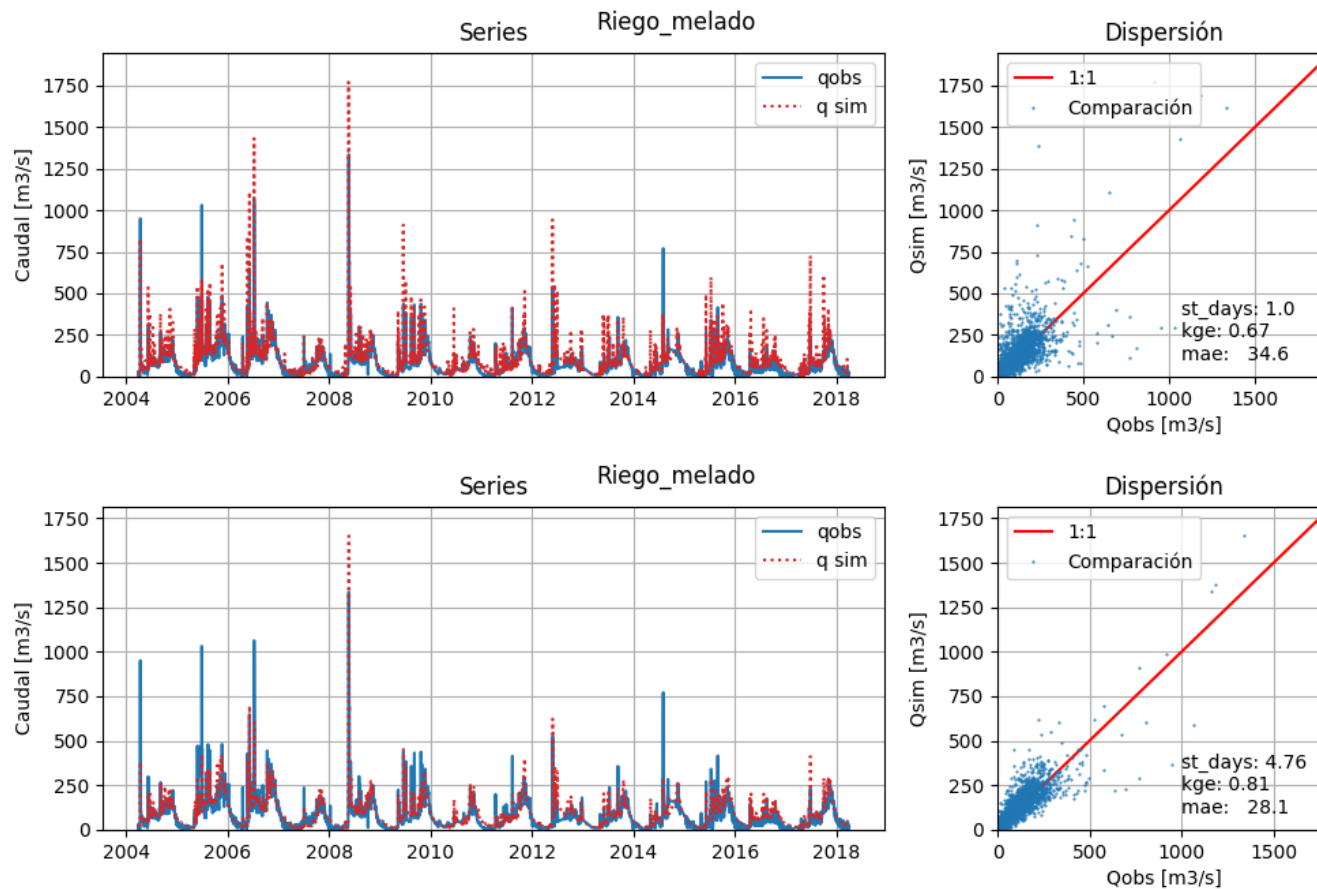


Ilustración 31: Comparación de caudales simulados con parámetros de escurrimiento directo modificados (panel superior) y originales (panel inferior) en la cuenca Riego Melado.

Bocatoma Maule Isla

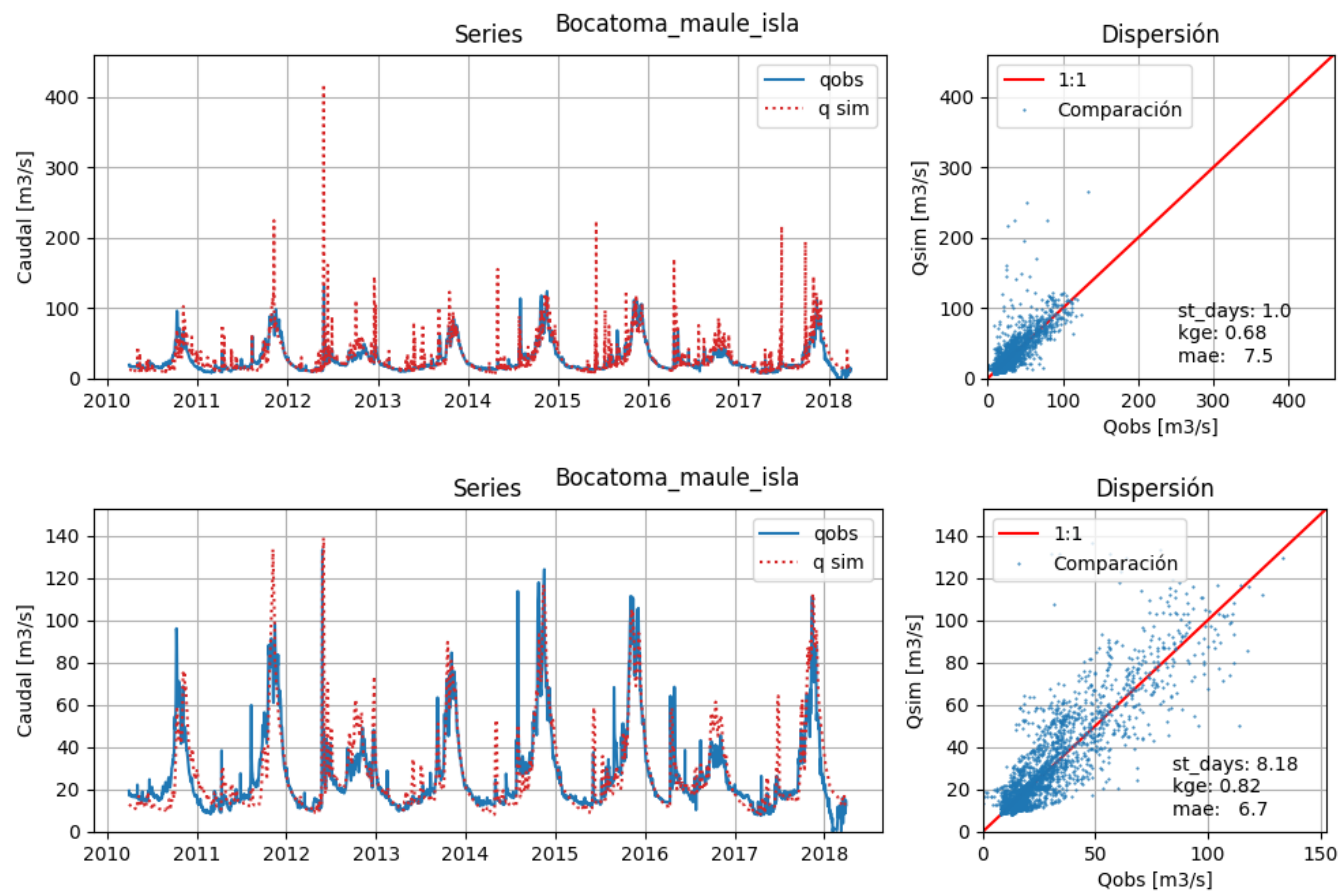


Ilustración 32: Comparación de caudales simulados con parámetros de escurrimiento directo modificados (panel superior) y originales (panel inferior) en la cuenca Bocatoma Maule Isla.

Laguna Laja

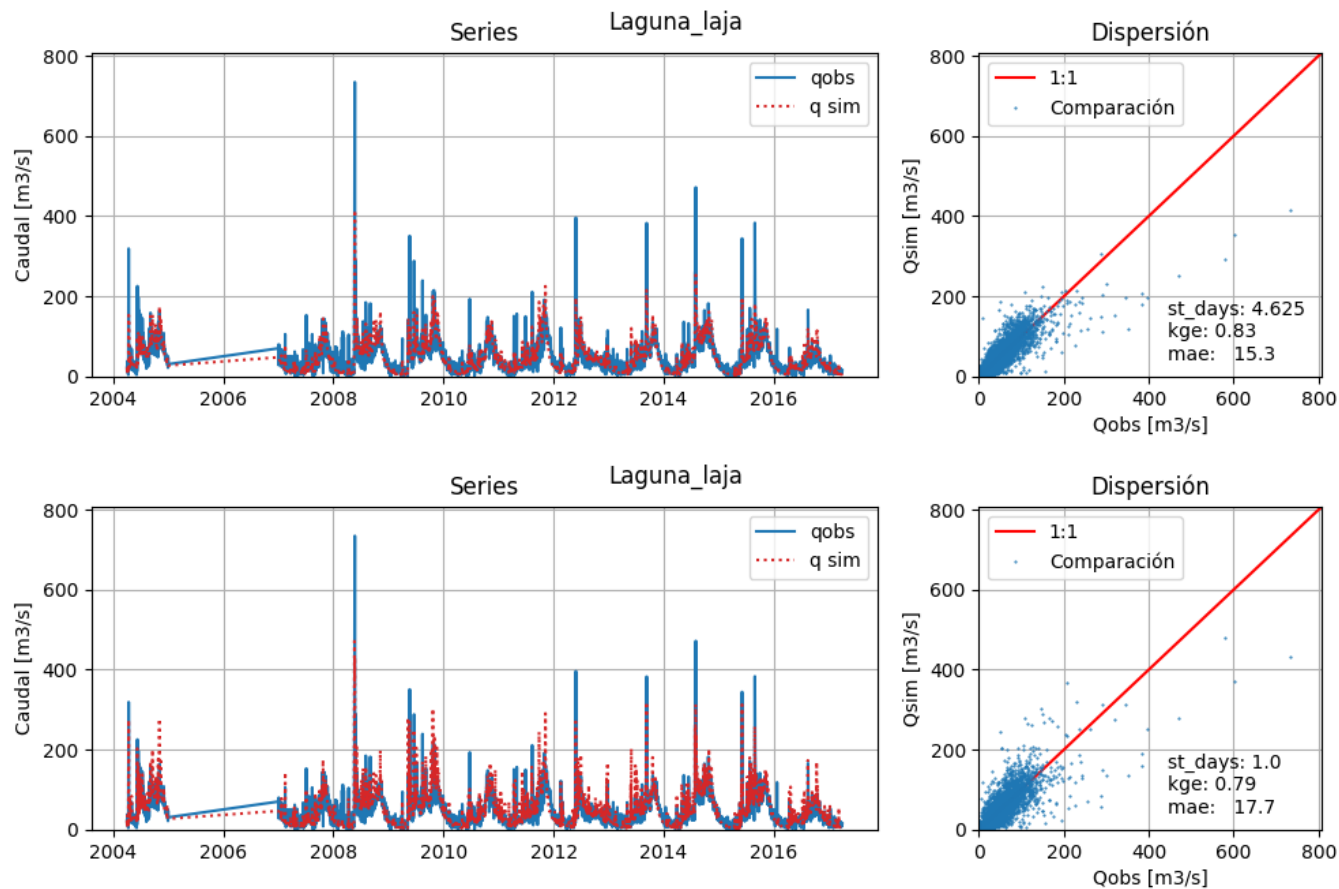


Ilustración 33: Comparación de caudales simulados con parámetros de escurrimiento directo modificados (panel superior) y originales (panel inferior) en la cuenca Laguna Laja.

Bocatoma Canal Alto Polcura

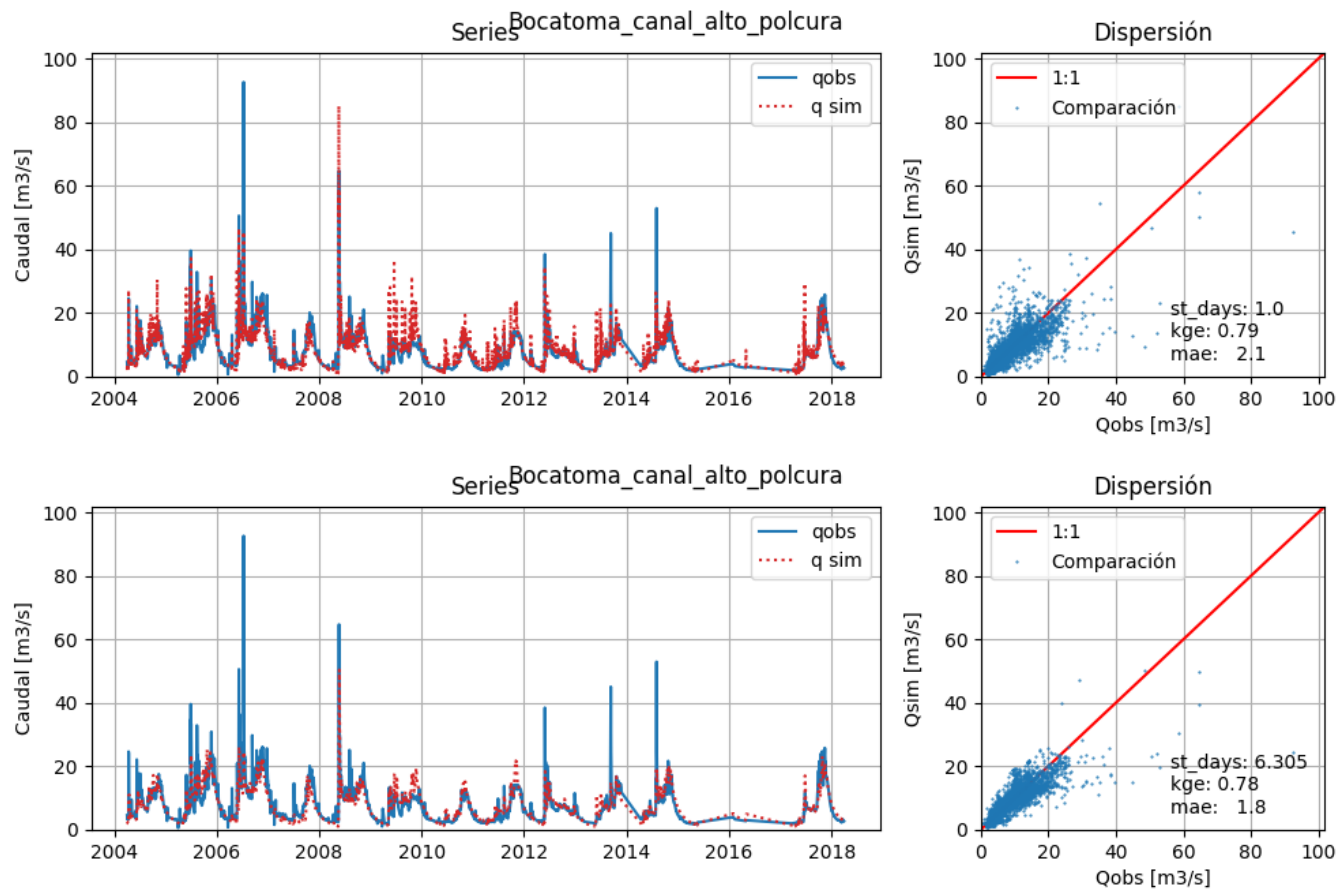


Ilustración 34: Comparación de caudales simulados con parámetros de escurrimiento directo modificados (panel superior) y originales (panel inferior) en la cuenca Bocatoma Canal Alto Polcura.

Bocatoma Polcura

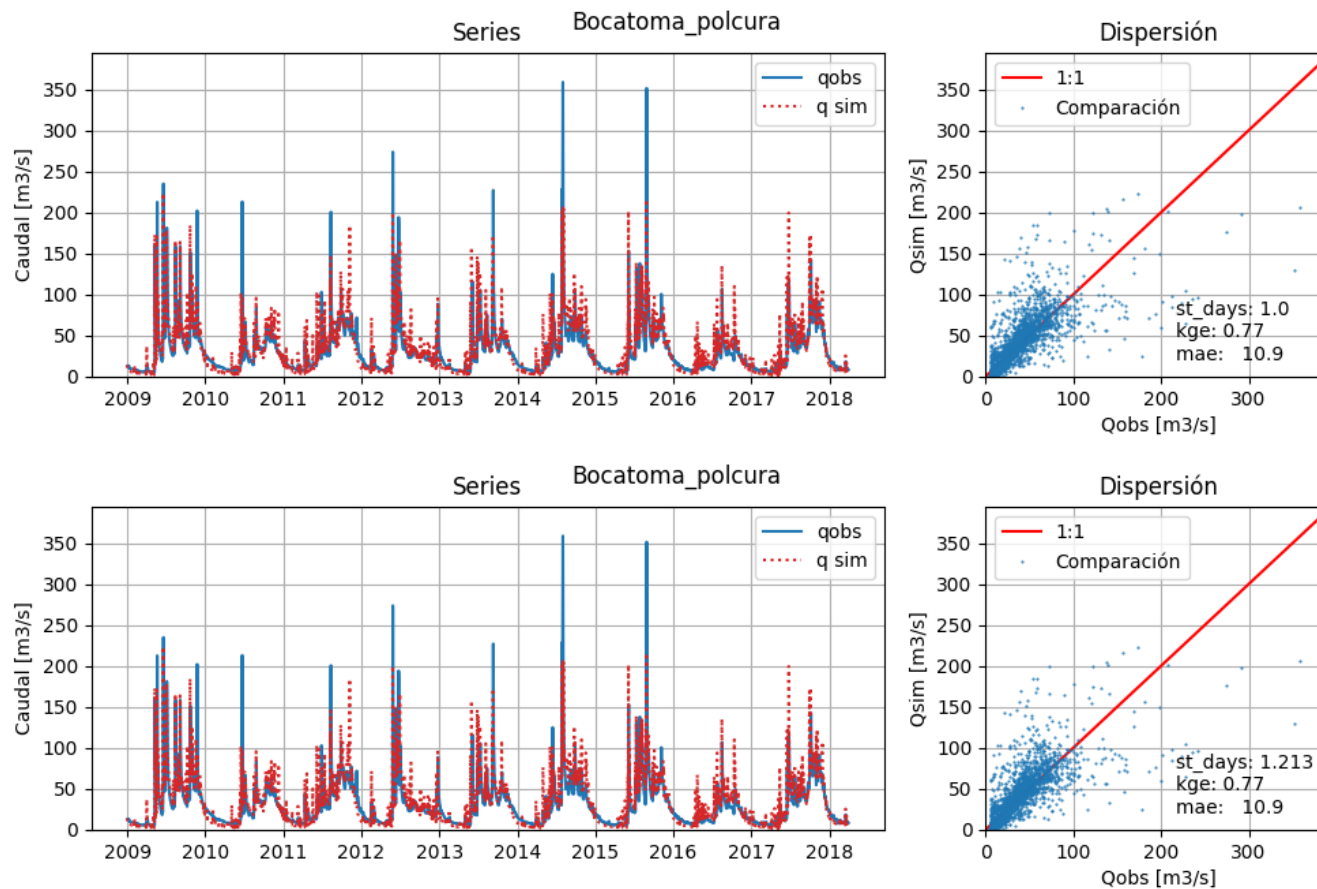


Ilustración 35: Comparación de caudales simulados con parámetros de escurrimiento directo modificados (panel superior) y originales (panel inferior) en la cuenca Bocatoma Polcura

Angostura

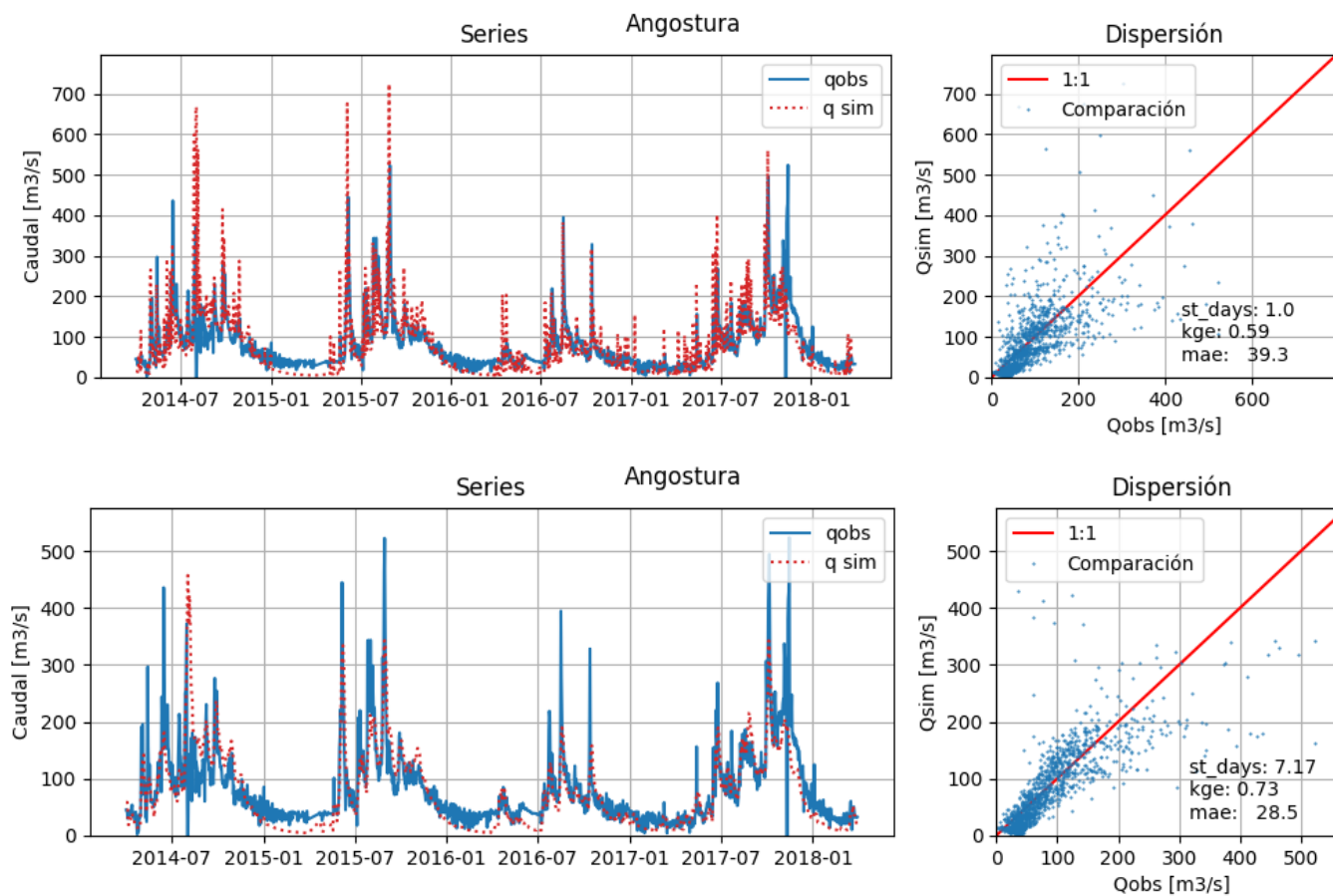
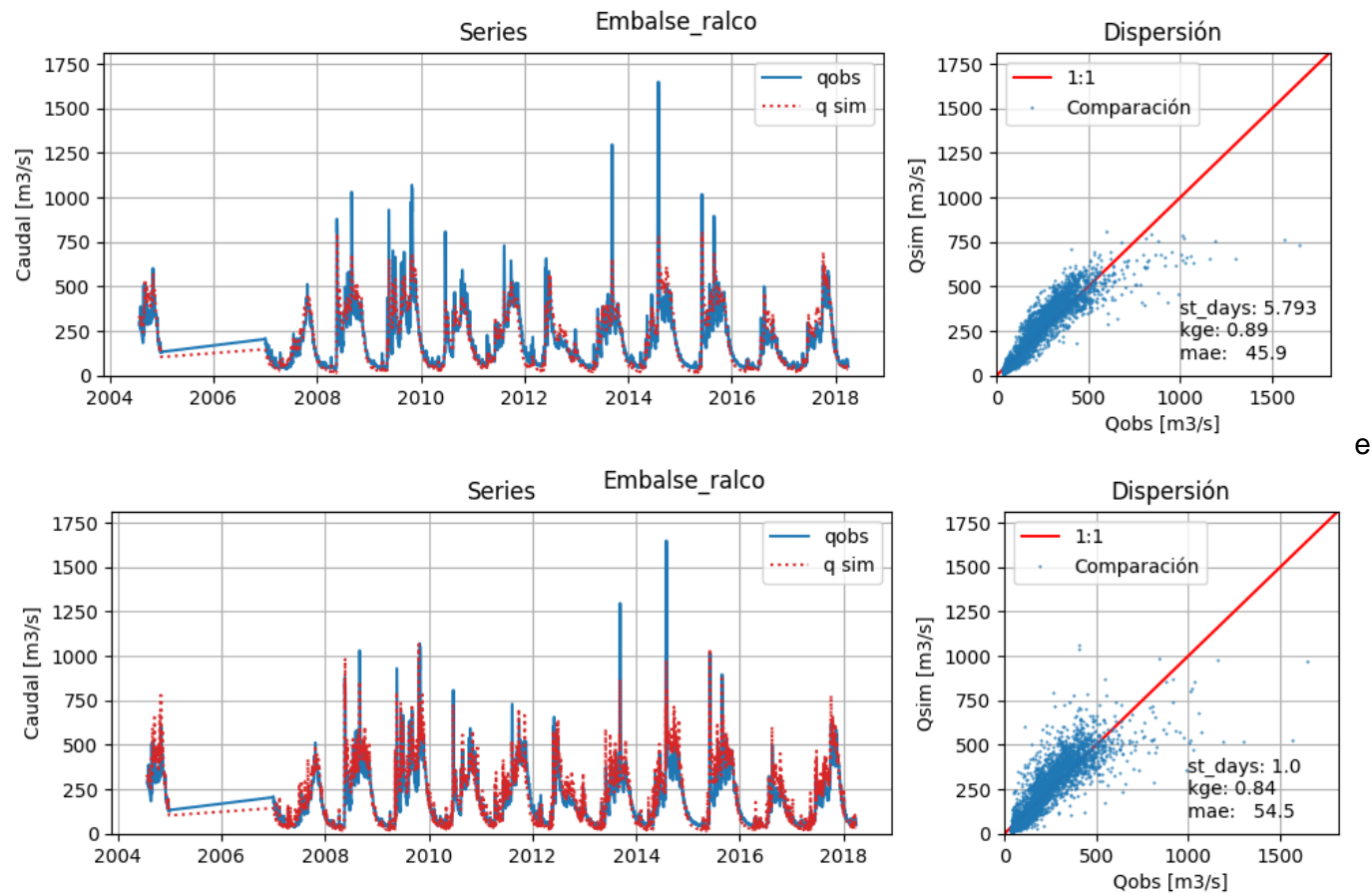


Ilustración 36.: Comparación de caudales simulados con parámetros de escurrimiento directo modificados (panel superior) y originales (panel inferior) en la cuenca Angostura

Embalse Ralco



e

Ilustración 37: Comparación de caudales simulados con parámetros de escurrimiento directo modificados (panel superior) y originales (panel inferior) en la cuenca Embalse Ralco

Mampil

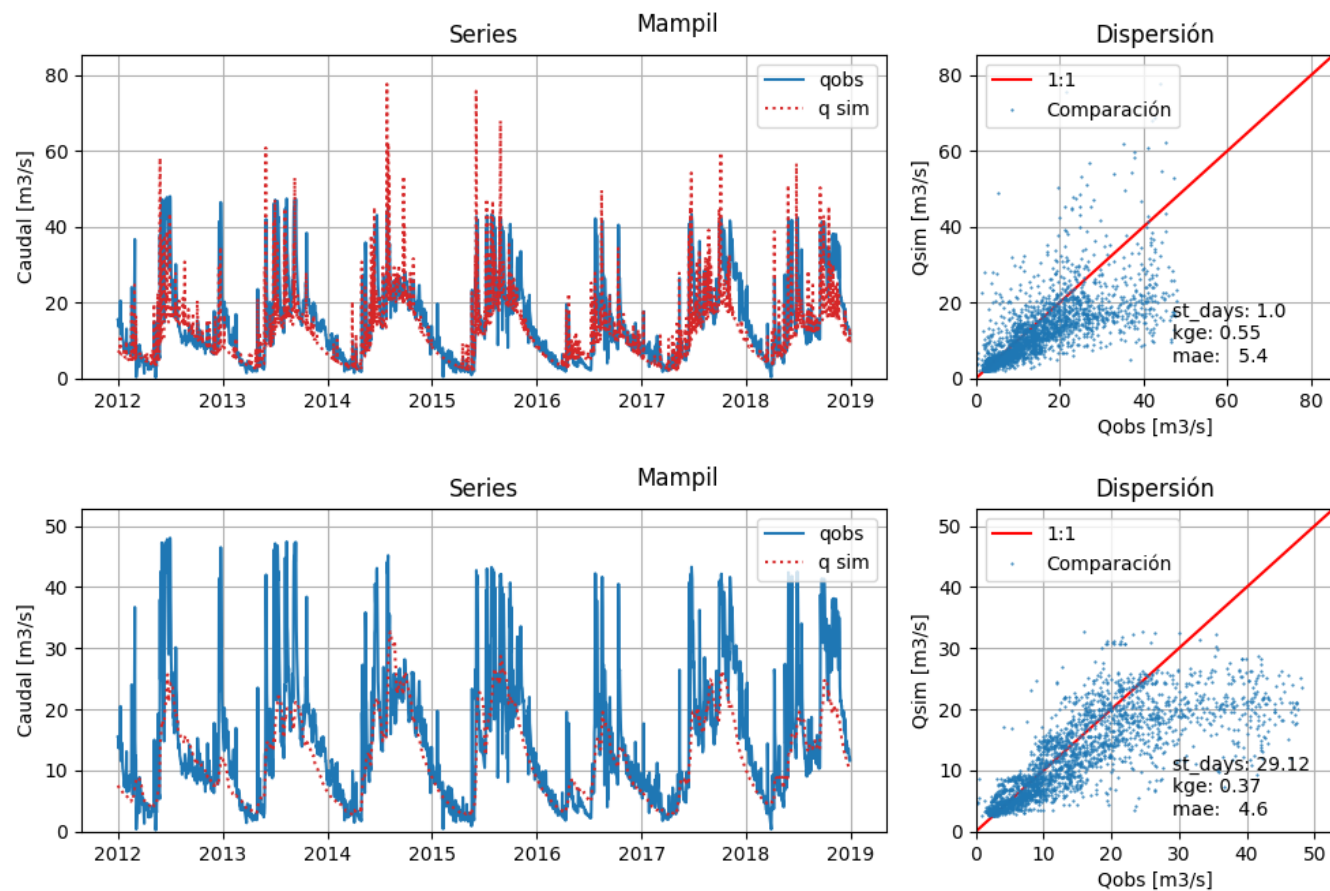


Ilustración 38: Comparación de caudales simulados con parámetros de escurrimiento directo modificados (panel superior) y originales (panel inferior) en la cuenca Mampil

Lago Chapo

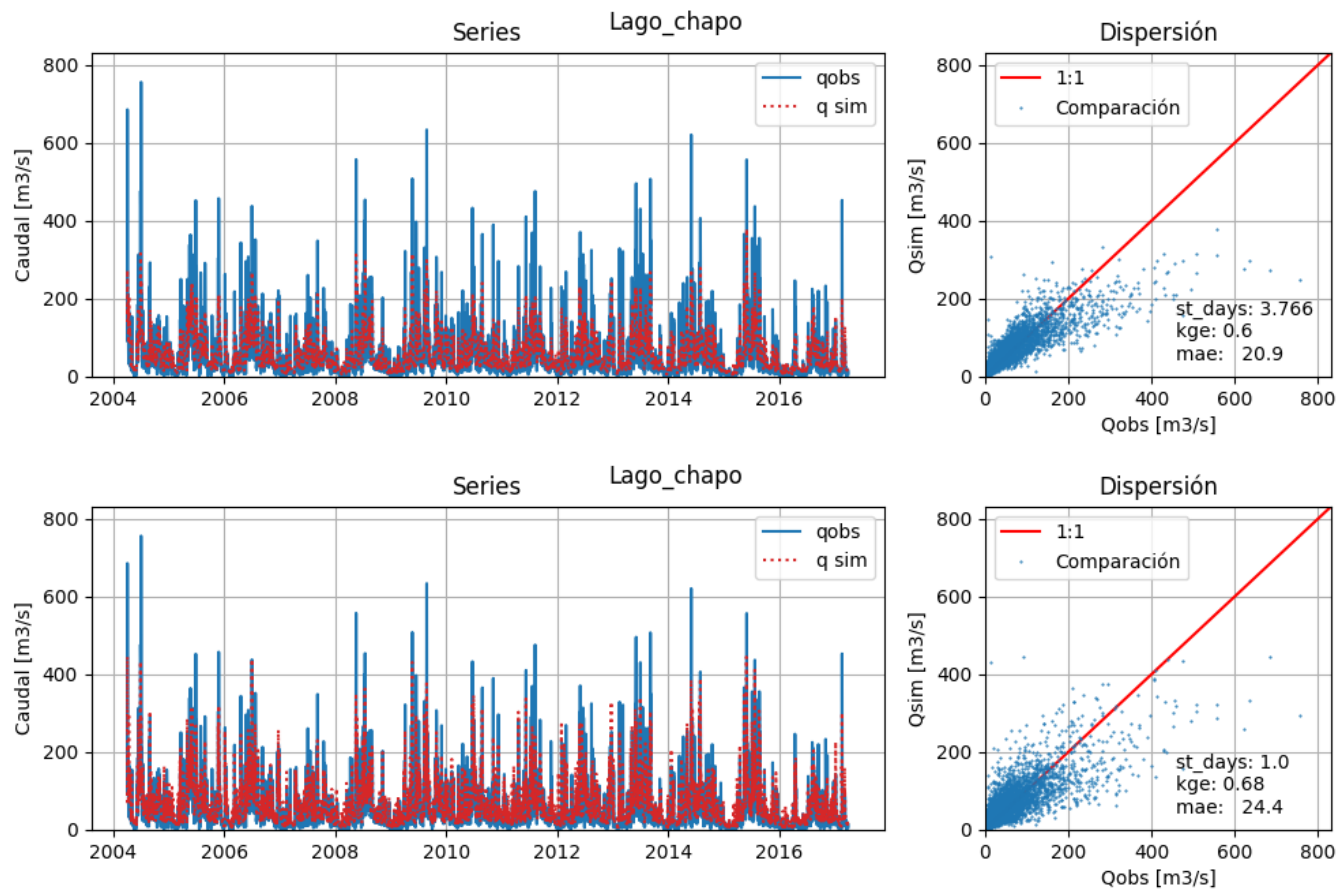


Ilustración 39: Comparación de caudales simulados con parámetros de escurrimiento directo modificados (panel superior) y originales (panel inferior) en la cuenca Lago Chapo

ANEXO C: Hoja resumen de elementos relevantes de la base de datos.

VARIABLES					INDICADORES EVENTOS EXTREMOS		
Código	Descripción	Unidad	REFERENCIA	Mejor Intervalo	Indicador	Descripción	Unidad
Q	Caudal	m ³ /s	Simulación VIC	Diario	spl	Standardized Precipitation Index	adimensional
fp_hidro	Gen. Hidroeléctrica	Factor 0-1	Derivado de q	Diario	ssi	Standardized Streamflow Index	
vel_005	Vel viento a 5m	m/s	API Energía renovable	Horario	lluvia_moderada	Días con lluvia acumulada sobre 10 mm	Número de días por año
vel_120	Vel viento a 120m	m/s		Horario	lluvia_intensa	Días con lluvia acumulada sobre 20 mm	
dir_120	Dir viento a 120m	°		Horario	lluvia_muy_intensa	Días con lluvia acumulada sobre 50 mm (agua equivalente)	
rho	Densidad del aire	kg/m ³		Horario	nieve_moderada	Días con nieve acumulada sobre 10 mm (agua equivalente)	
fp_eolo_120	FP de turbina a 120m	Factor 0-0	Derivado de vel_120 y rho	Horario	nieve_intensa	Días con nieve acumulada sobre 20 mm (agua equivalente)	
ghi	Rad global horizontal	W/m ²	API Energía renovable	Horario	nieve_muy_intensa	Días con nieve acumulada sobre 50 mm (agua equivalente)	m ³ /s
dni	Rad directa normal	W/m ²		Horario	qd_retp_01	Caudal diario periodo retorno 1 año	
dif	Rad difusa	W/m ²		Horario	qd_retp_05	Caudal diario periodo retorno 5 años	
glb_tilt	Rad global en panel inclinado	W/m ²		Horario	qd_retp_10	Caudal diario periodo retorno 10 años	
glb_hsat	Rad global con seguimiento HSAT	W/m ²		Horario	qd_retp_30	Caudal diario periodo retorno 30 años	
fp_tilt	FP de panel FV inclinado	Factor 0-1	Derivado de glb_tilt y temp	Horario	qd_retp_01	Caudal diario periodo retorno 1 año	Número de días por año
fp_hsat	FP de panel FV con seguimiento HSAT	Factor 0-1	Derivado de glb_tilt y temp	Horario	qd_retp_05	Caudal diario periodo retorno 5 años	
temp	Temperatura horaria	°C	API energía renovable	Horario	qd_retp_10	Caudal diario periodo retorno 10 años	
tmax	Temperatura máxima diaria	°C		Diario	qd_retp_30	Caudal diario periodo retorno 30 años	
tmin	Temperatura mínima diaria	°C		Diario	vel_diario_10ms	Viento diario sobre 10 m/s	
pr	Precipitación diaria	mm	CR2MET	Diario	vel_diario_15ms	Viento diario sobre 15 m/s	Número de días por año
rain	Lluvia diaria	mm		Diario	vel_horario_15ms	Viento horario sobre 15 m/s	
snow	Nieve diaria	mm (agua equiv.)		Diario	vel_horario_20ms	Viento horario sobre 20 m/s	
hrel	Humedad relativa	%	ARCLIM	Diario	vel_horario_25ms	Viento horario sobre 25 m/s	
evap	Evapotranspiración potencial	mm		Diario	ola_calor	Índice olas de calor	

GCMS DESTACADOS	
Pesimista	CanESM2_r1i1p1
Neutro	ACCESS1-3_r1i1p1
Optimista	MRI-CGCM3_r1i1p1

FORMATO CSV
<p>\$ID_SITIO_\$CODIGO_VARIABLE.csv</p> <p>Cada archivo una variable de un PC</p> <p>Cada columna es un GCM</p> <p>Cada fila es un periodo de tiempo.</p>

Código	FORMATO JSON: \$ID_SITIO_\$VAR.JSON
\$VAR_HIS	Valor en el periodo histórico de 1981 a 2010. Mediana (percentil 50) de los resultados de cada GCM.
\$VAR_HIS_p10	Rango inferior de confianza (10%) en periodo histórico de 1981 a 2010. Es el percentil 10 de la distribución de todos los GCM disponibles.
\$VAR_HIS_p90	Rango inferior de confianza (90%) en periodo histórico de 1981 a 2010. Es el percentil 90 de la distribución de todos los GCM disponibles.
\$VAR_FUT	Valor de la mediana de todos los GCM para el periodo 2031 a 2060.
\$VAR_FUT_p10	Rango inferior de confianza (10%) de los valores, para el periodo 2031-2060. Es el percentil 10 de la distribución de los resultados de todos los GCM disponibles.
\$VAR_FUT_p90	Rango superior de confianza (10%) de los valores, para el periodo 2031-2060. Es el percentil 90 de la distribución de los resultados de todos los GCM disponibles.
\$VAR_DIF	Valor de la diferencia entre el periodo histórico y el periodo futuro. El valor es la mediana (percentil 50) de las diferencias calculadas para de cada GCM.
\$VAR_DIF_p10	Rango inferior de confianza (10%) para la diferencia entre el periodo histórico y el periodo futuro. El valor es el percentil 10 de la distribución de diferencias calculadas para de cada GCM.
\$VAR_DIF_p90	Rango superior de confianza (90%) para la diferencia entre el periodo histórico y el periodo futuro. El valor es el percentil 90 de la distribución de diferencias calculadas para de cada GCM.