ERIDANUS
INGENIERÍA EN RECURSOS HÍDRICOS

Determinación del Impacto del Cambio Climático en el Potencial Esperado de Generación Hidroeléctrica en la cuenca del río Maule

Informe Final

Preparado para

Subsecretaría de Energía

Ministerio de Energía
Gobierno de Chile

Marzo 2016

EQUIPO CONSULTOR

Cargo	Nombre	Título
Jefe de Proyecto	Ximena Vargas	Ing. Civil
Coordinadora de Proyecto	Maricel Gibbs	Ing. Civil, MBA
Ingeniero de Proyecto	Eduardo Rubio	Ing. Civil, MSc
Ingeniero de Proyecto	Mauricio Cartes	Ing. Civil, MSc
Ingeniero de Proyecto	Rodrigo Meza	Ing. Civil, MSc
Ingeniero de Proyecto	Gonzalo Cortes	Ing. Civil, MSc, PhD (c)

Este informe fue elaborado en el contexto de un estudio encomendado por el Ministerio de Energía titulado "Determinación del Impacto del Cambio Climático en el potencial esperado de generación hidroeléctrica en la Cuenca (o sub-cuencas) del Río Maule". El estudio forma parte de las etapas de análisis que el Ministerio está desarrollando con miras a generar un Plan de Adaptación del Sector Energía a los impactos del climático.

Las opiniones vertidas en este documento son de exclusiva responsabilidad del consultor y no representan necesariamente el pensamiento del Ministerio de Energía.

INDICE

1 INTRODUCCIÓN 7

2 OBJETIVOS Y RESUMEN DE ACTIVIDADES 7

2.1 Objetivo General 7

2.2 Objetivos Específicos 7

2.3 Actividades Asociadas a Objetivos Específicos 8

3 METODOLOGÍA GENERAL Y ESTRATEGIA 10

3.1 Fase I 10

3.2 Fase II 11

3.3 Fase III 11

3.4 Productos Comprometidos 12

4 DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN PRODUCTIVA DE LA CUENCA DEL RÍO MAULE 13

4.1 Caracterización Productiva Según Aporte al PIB Regional 14

4.2 Caracterización Productiva Según las Prioridades Establecidas por los Tomadores de Decisión 16

4.3 Según Demanda de Agua 17

4.3.1 Caracterización del Sector Silvoagropecuario 20

4.3.2 Caracterización del Sector Hidroeléctrico 22

4.4 Síntesis y Análisis de Resultados 26

5 CLASIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE SUBCUENCAS 28

5.1 Estaciones Hidrometeorológicas 28

5.2 Producción Silvoagropecuaria 36

5.3 Producción Hidroeléctrica 41

5.4 Turismo 47

5.5 Usos Domiciliarios 49
5.6 Subcuencas Seleccionadas 51
6 RECOPILACIÓN Y PROCESAMIENTO DE ANTECEDENTES 54
6.1 Ubicación de la Zona de Estudio 54
6.2 Hipsometría y Bandas de Elevación 55
6.3 Información Disponible 60
6.3.1 Fluviometría 60
6.3.2 Meteorología 67
6.3.2.1 Precipitación 67
6.3.2.2 Temperatura 71
6.3.3 Hidrogeología 74
6.3.4 Capacidad Hidroeléctrica Instalada 76
6.3.4.1 Relación entre caudal afluente y energía generada 76
6.3.5 Capacidad Hidroeléctrica Potencial 83
6.3.6 Manto Nival 88
6.3.6.1 Definición de la línea de nieves 90
6.3.6.2 Determinación del equivalente en agua de la nieve por banda de elevación 93
6.4 Modelos de Circulación General 101
6.4.1 Metodología de análisis 102
6.4.1.1 Análisis de la estacionalidad 102
6.4.1.2 Análisis de la variabilidad 106
6.4.1.3 Análisis del ensamble de MCG 107
6.4.2 Selección de MCGs 109
6.5 Modelo Hidrológico Conceptual 111
7 RESULTADOS 115
7.1 Organización del Capítulo de Resultados 115

7.1.1 Nomenclatura de las series de tiempo y variables 118
7.1.2 Indicadores de Ajuste 119
7.2 Proceso de Escalamiento Meteorológico 120
7.3 Calibración y Validación de Modelos 124
7.3.1 Melado 124
7.3.1.1 Caudales 124
7.3.1.2 Equivalente en agua de la nieve (SWE) 128
7.3.2 Invernada 132
7.3.2.1 Caudales 132
7.3.2.2 Equivalente en agua de la nieve (SWE) 136
7.3.3 Maule 139
7.3.3.1 Caudales 139
7.3.3.2 Equivalente en agua de la nieve (SWE) 143
7.3.4 Claro y Garzas 146
7.3.4.1 Caudales 146
7.3.4.2 Equivalente en agua de la nieve (SWE) 150
7.4 Hidrología de Escenarios Futuros 154
7.4.1 Validez de los MCG en línea base 154
7.4.2 Resultados de disponibilidad hídrica en escenarios futuros 160
7.4.2.1 Melado 161
7.4.2.2 Invernada 166
7.4.2.3 Maule 171
7.4.2.4 Claro y Garzas 176
7.4.2.5 Resumen de Resultados 183
7.5 Generación Hidroeléctrica de Escenarios Futuros 185
7.5.1 Capacidad Instalada 185

7.5.2 Capacidad Potencial 188
8 ANÁLISIS DE IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO 198
8.1 Disponibilidad Hídrica 198
8.1.1 Estacionalidad 198
8.1.2 Variabilidad 199
8.1.3 Acumulación Nival y Escorrentía 199
8.2 Generación Hidroeléctrica 201
8.2.1 Capacidad Instalada 201
8.2.2 Capacidad Potencial 203
8.3 Otros Impactos 206
8.3.1 Impactos en la Productividad 206
8.3.2 Impactos debido a un mayor riesgo hidrometeorológico 207
8.3.3 Impactos en la Sociedad 208
9 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES 209
9.1 Recomendaciones 210
10 BIBLIOGRAFÍA 212

ANEXOS

ANEXO 1: Base de Datos Bibliográfica
ANEXO 2: Base de Datos SIG
ANEXO 3: Resumen Ejecutivo
ANEXO 4: Guía Metodológica
ANEXO 5: Presentación Power Point del Estudio

1 INTRODUCCIÓN

La generación de energía hidroeléctrica depende en gran medida de los caudales afluentes a las obras de captación de cada central, lo cual explica la dependencia de este tipo de energía respecto a la variabilidad climática interanual y geográfica de Chile. La capacidad de almacenamiento asociada a algunos sistemas hidroeléctricos induce complejidades adicionales en su análisis. En efecto, la capacidad de regulación puede variar desde nula en el caso de centrales de pasada, regulación mensual o estacional en el caso de centrales al pie de embalses pequeños y medianos; y regulación interanual en el caso de centrales al pie de embalses de gran magnitud. En este último caso, la operación del sistema puede influir en forma importante en la generación hidroeléctrica.

Un sistema representativo de esta última situación es el sistema de generación ubicado dentro de la cuenca del río Maule. Esta cuenca, en particular el área afluente al embalse Colbún, constituye uno de los sistemas más complejos y a la vez más representativos a estudiar en Chile. Dentro de los componentes del sistema Maule se encuentran centrales de pasada y de embalses, las que dependen fuertemente de los regímenes nivales y nivo-pluviales de sus cuencas aportantes. Pese a la gran capacidad de regulación de este sistema, el déficit de precipitaciones en los últimos años lo ha afectado, resultando en menores almacenamientos, menores capacidades de generación y una mayor inseguridad energética para el futuro.

El presente estudio técnico ha sido solicitado por la Subsecretaría de Energía y está orientado principalmente a estimar los impactos del cambio climático en el potencial esperado de generación hidroeléctrica en subcuencas claves del río Maule, en base a los últimos modelos y escenarios IPCC disponibles.

2 OBJETIVOS Y RESUMEN DE ACTIVIDADES

2.1 Objetivo General

Determinar el impacto del cambio climático en el potencial esperado de generación hidroeléctrica en la cuenca del río Maule (en centrales existentes, en construcción y proyectadas).

2.2 Objetivos Específicos

1. Realizar una descripción y caracterización de la cuenca del Río Maule en términos de productividad energética y de otros usos importantes del recurso hídrico.
2. Proponer y aplicar una metodología de análisis y modelación hidrogeológica de la zona de estudio (incluyendo la interacción entre el aguas superficial y subterránea), que permita determinar el potencial hidroeléctrico considerando los impactos del cambio climático, que sea replicable en otras cuencas relevantes desde el punto de vista de la generación de energía.
3. Incorporar escenarios climáticos futuros en la modelación hidrogeológica, a objeto de determinar el potencial hidroeléctrico esperado en la zona de estudio.

4. Identificar, de manera somera, otros impactos que el cambio climático podría generar en la zona de estudio (redistribución/competencia de recursos hídricos hacia otros usuarios, impacto en flora y fauna, cambios en el uso de suelo, rediseño de obras hidráulicas ya existentes en la zona, entre otros), y plantear como consecuencia, áreas futuras de investigación y análisis en estas materias.

2.3 Actividades Asociadas a Objetivos Específicos

Conforme a los TdR, las actividades mínimas por objetivo se describen a continuación:

i. Actividades Asociadas al Objetivo Específico N° 1

Proponer, según información existente en la Región del Maule, una descripción y caracterización productiva de la cuenca del Río Maule, focalizando esta caracterización en términos de generación hidroeléctrica y otros usos relevantes. Para esto se deberá analizar en detalle la cuenca y sub cuencas presentes en el Río Maule, verificando y describiendo la presencia de proyectos hidroeléctricos (en funcionamiento, construcción y futuros), así como de otros emplazamientos con utilización importante del recurso hídrico.

Delimitar y justificar, en base a la caracterización de la cuenca y a la información existente, cuál será la zona de análisis. Para realizar esta delimitación de la zona de análisis, se escogerá y describirá una o un conjunto de subcuencas del río Maule con sus diferentes usos de agua, siendo primordial incluir el uso hidroeléctrico y considerar una localización que permita contar con la información de precipitaciones y temperaturas para realizar y analizar los impactos del CC.

ii. Actividades Asociadas al Objetivo Específico N° 2

Determinar la metodología de análisis, el modelo hidrológico a utilizar y los datos de entrada mínimos requeridos para efectuar el análisis demandado por la presente consultoría. Como parte de esta metodología, se deberá señalar en detalle cómo se realizará el proceso de “downscaling” y que modelo utilizará para ello, para poder resolver el problema de resolución horizontal de los modelos de circulación general.

Proponer el horizonte de análisis del estudio, identificar y justificar el escenario a simular para el futuro, en base a escenarios climáticos del IPCC. Se debe considerar al menos un escenario pesimista y otro optimista en relación a emisiones esperadas a futuro.

iii. Actividades Asociadas al Objetivo Específico N° 3

Aplicar la metodología de análisis y modelación propuesta, a objeto de determinar el impacto del cambio climático en el caudal disponible futuro de la cuenca o subcuencas seleccionadas, estableciendo flujos de caudales futuros, disponibilidad hídrica, entre otros.

Relacionar los flujos de caudal y la disponibilidad hídrica futura con la generación y el potencial hidroeléctrico, considerando en este análisis tanto centrales hidroeléctricas existentes, como aquellas en construcción y centrales futuras.

Estimar la variabilidad anual e interanual de la generación hidroeléctrica frente a los escenarios de cambio climático definidos en la zona de estudio.

Proponer y proyectar los usos de agua en los periodos futuros definidos para este estudio.

Determinar el impacto del cambio climático en el caudal disponible futuro la zona de estudio y la sensibilidad de los caudales futuros simulados y de la generación hidroeléctrica, a los cambios de precipitación.

Desarrollar una guía metodológica de análisis y modelación, que incorpore todos los pasos necesarios (incluida información de entrada, escenarios IPCC, etc.), a objeto de replicar el análisis de este estudio en otras cuencas del país.

iv. Actividades Asociadas al Objetivo Específico N° 4

Establecer cuáles son los mayores problemas respecto a la generación hidroeléctrica que implicará el cambio climático en la cuenca en estudio.

Identificar y proponer un listado con los distintos impactos que se puedan asociar al cambio climático (en otras áreas productivas) dentro de la cuenca o subcuencas seleccionadas del Río Maule, con el fin de identificar áreas futuras de investigación y análisis en estas materias.

El equipo consultor se ha comprometido a dar cumplimiento a estas actividades junto con elaborar algunos productos intermedios adicionales que le dan mayor robustez a los posibles análisis en estas materias, como son los productos complementarios indicados en la sección 2.4.

3 METODOLOGÍA GENERAL Y ESTRATEGIA

Se ha elaborado el siguiente esquema metodológico, con el fin de presentar de forma resumida la estrategia general elaborada para abordar este estudio.

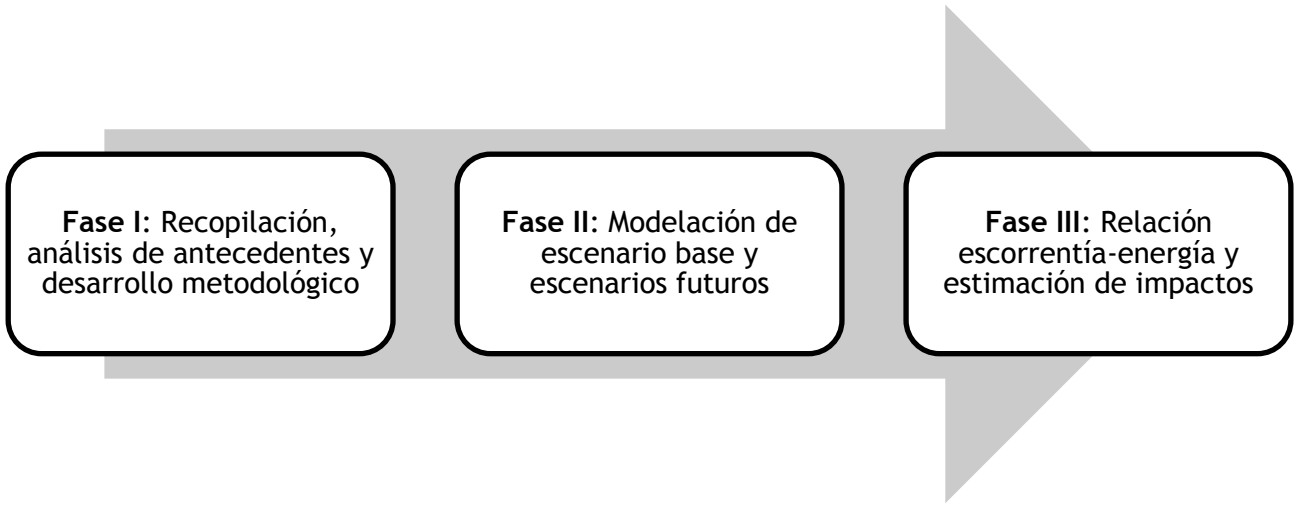


Figura 3.1. Esquema metodológico elaborado para este estudio.

Como se aprecia, las fases han sido concebidas como una cadena de hitos que dependen de la ejecución de la fase anterior para el avance de proyecto. En una primera fase se recopilan y analizan todos los antecedentes necesarios para la ejecución de la modelación, incluyendo el desarrollo de la metodología a emplear. En la siguiente fase se aplica la metodología elaborada para la modelación y evaluación de escenarios. Con estos dos hitos o fases cumplidas, la Fase III se enfoca específicamente en analizar la relación entre la escorrentía (obtenida en la Fase II) y la energía hidroeléctrica, así como la estimación de otros impactos solicitados en las bases técnicas.

Mientras el Informe N°1 contenía el desarrollo completo de la Fase I, el Informe N°2 y final contiene, además, el desarrollo completo de las Fases II y III. Esta división en fases toma como base los cuatro objetivos específicos indicados en este estudio y que se detallan en las bases técnicas.

A continuación se presenta el contenido específico de cada fase, a modo general y describiendo los elementos asociados a los objetivos específicos que se incorporan en cada caso. Hacia el final, se presenta un listado de los productos comprometidos, junto con los productos complementarios que se ofrecieron para un mejor desarrollo de la presente consultoría.

3.1 Fase I

Esta fase considera el desarrollo de los objetivos específicos 1 y 2, lo cual se presenta en el presente Informe Final.

El objetivo principal de esta fase es reunir y analizar los antecedentes que permiten seleccionar el área específica de estudio, dentro de la cuenca del río Maule, y alimentar

con datos el modelo hidrológico seleccionado. Para esto, se elaboró la metodología del análisis hidrológico, junto con una revisión de la información hidrometeorológica disponible, ya que estos elementos también forman parte de los aspectos esenciales para seleccionar la zona específica de estudio. Esto se debe a que la modelación posee ciertos requerimientos mínimos de información que deben ser incorporados al análisis de selección de sistemas.

También se incorporó una metodología de selección de modelos de circulación global (MGC), complementando la solicitud de selección de escenarios climáticos. De esta forma, la Fase I se plantea como una etapa de recopilación antecedentes, análisis y desarrollo metodológico como un todo, permitiendo sentar las bases para las siguientes fases, orientadas principalmente a la preparación de los datos definitivos a utilizar, la modelación y la evaluación de resultados e impactos previstos del cambio climático.

3.2 Fase II

Esta fase se compone por completo de actividades asociadas al objetivo específico 3. En primer lugar se utiliza el desarrollo metodológico presentado en la Fase I como base para la guía metodológica que se entrega en este Informe Final.

En paralelo, la información levantada previamente se adapta para su empleo en la modelación, la cual se realiza completamente en esta fase: calibración, validación y obtención de resultados de línea base para los distintos MGC y para los escenarios climáticos propuestos en la Fase I.

Aunque pertenece al objetivo específico 3, la estimación de los impactos en la generación hidroeléctrica a partir de los cambios en los recursos hídricos se ha considerado como primera actividad de la siguiente fase y final. De esta forma, la Fase II consiste fundamentalmente en todas las etapas requeridas para realizar la modelación hidrológica, a partir de los antecedentes obtenidos en la fase anterior.

Producto de la importancia de los regímenes nivo-pluviales y nivales presentes en la parte alta de la cuenca, en esta fase se incluye un estudio complementario, basado en el análisis de imágenes satelitales. Este análisis permite obtener estimaciones del equivalente en agua de la nieve observada en la cuenca. Esto complementa la revisión de la modelación realizada con información independiente, así como la elaboración de recomendaciones en la siguiente fase, en términos de evaluación y diagnóstico de los recursos hídricos de la zona.

3.3 Fase III

En esta fase se busca evaluar todos los impactos asociados al cambio climático, incluyendo la producción hidroeléctrica contemplada en el objetivo específico 3. Por lo tanto, en esta fase se contempla incluir el objetivo específico 4 y parte del objetivo específico 3 que no se incluyó en la fase anterior. De esta forma, esta fase final tiene el objetivo de evaluar los impactos del cambio climático asociados a los potenciales cambios en la escorrentía determinados en la fase anterior. En esta fase también se plantean futuras líneas de investigación y desarrollo de estudios, en base a los impactos que se pueden vislumbrar en otros sectores en la zona y cuya dependencia del recurso hídrico se ha considerado

predominante. Finalmente, como se señaló en la Fase II, se obtienen elementos de análisis que permitan elaborar recomendaciones de evaluación y diagnóstico de los recursos hídricos de la zona.

3.4 Productos Comprometidos

Los productos tienen directa relación con las etapas y los outputs antes indicados en el resumen metodológico, los que se pueden resumir como sigue:

- Revisión completa de los antecedentes entregados por la Subsecretaría de Energía.
- Guía metodológica de análisis de antecedentes, datos de entrada, downscaling y modelación.
- Caracterización y análisis productivo de usuarios y centrales hidroeléctricas existentes en la cuenca del río Maule.
- Selección de cuencas patrón y período de análisis.
- Propuesta y proyección de los usos de agua en las cuencas en estudio (para los períodos definidos).
- **Producto Complementario:** Además de los modelos propuestos, se realizó un análisis respecto a la utilidad del set de datos NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NASA NEX-GDDP, https://nex.nasa.gov/nex/projects/1356/) disponible a una resolución superior de 0,25 x 0,25 grados. Este dataset ha sido recientemente publicado por la NASA para fines de investigación relacionados al cambio climático, y consiste en las proyecciones climáticas de 21 modelos a escala diaria desarrollados para la última entrega del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC AR5).
- Modelación de las cuencas patrón, bajo distintos MCG (3) y escenarios de cambio climático (2), a objeto de determinar el impacto del cambio climático en el caudal disponible futuro de las cuencas bajo estudio.
- **Producto Complementario:** Análisis de imágenes satelitales para construir una serie de tiempo de la evolución del equivalente en agua de la nieve en la zona de estudio, de manera de evaluar la presencia de señales y tendencias.
- Análisis de cambios en el régimen de escorrentía (variación estacional y curvas de duración), precipitaciones y rendimientos de las cuencas.
- Análisis de la variabilidad anual e interanual de la generación hidroeléctrica frente a los escenarios de cambio climático definidos en la zona de estudio.
- Diagnóstico de la situación actual y estimar la situación futura y su posible impacto en la generación hidroeléctrica y otros usos.

4 DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN PRODUCTIVA DE LA CUENCA DEL RÍO MAULE

La cuenca del río Maule, definida hasta su desembocadura, posee una superficie aproximada de 20 mil km^2, lo cual corresponde al 2,72% de la superficie de Chile continental [DCA&RNR, 2009]. La cuenca se ubica en la Región del Maule, la cual tiene una superficie aproximada de 30 mil km^2, dividida administrativamente en 4 provincias y 30 comunas [CONICYT, 2010]. La cuenca representa cerca del 66% del total de superficie de la región. Esta consistencia en términos de área permite analizar las características productivas de la cuenca utilizando los antecedentes disponibles a nivel regional.

La población de la región del Maule representaba un 5,9% del total de Chile al año 2010, con cerca de 1 millón de personas [INE, 2011]. En la **Tabla 4.1** se presenta un resumen de la población urbana y rural. Se muestra además el total de la fuerza laboral en la región, la cual representa un 41% del total de la población. Las estimaciones del INE[1] al año 2015 indican que la población alcanza a un total de 1.042.989 personas, lo que significa una variación aproximada del 3% respecto al 2010.

Tabla 4.1. Población estimada al año 2010 en la región del Maule. Fuente: Elaboración propia a partir de [INE, 2011].

Item	N° Total de Personas	% Total
Población	1.007.831	100%
Urbana	676.615	67%
Rural	331.216	33%
Fuerza Laboral	414.000	41%

A continuación se presenta la descripción y caracterización productiva de la región del Maule desde tres perspectivas diferentes, entendiendo que cada una aporta elementos de análisis complementarios entre sí:

i. Según aporte al PIB regional de los sectores productivos.
ii. Según las prioridades establecidas por el sector público.
iii. Según su demanda de agua.

Este análisis se presenta en términos generales, en base a los antecedentes bibliográficos disponibles y con el fin de establecer los sectores dominantes en cada caso.

[1] Estadísticas en línea: http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/familias/demograficas_vitales.php

4.1 Caracterización Productiva Según Aporte al PIB Regional

Desde el punto de vista productivo, es posible caracterizar la economía de la Región de Maule empleando el aporte al PIB regional de cada sector económico como indicador de su importancia relativa.

De acuerdo a lo señalado por CONICYT [2010], al año 2010 se tiene que la Industria Manufacturera es uno de los principales sectores económicos de la región, siendo el segundo en importancia el sector Silvoagropecuario (Forestal, Agrícola y Ganadero). Dentro de este último sector, el rubro más importante es la Fruticultura, cuya producción se destina en gran medida a la exportación. En conjunto, estos sectores han atraído la presencia de importantes empresas a la región e inversiones en sector Transporte y Comunicaciones. En tercer lugar, se tiene al Turismo como un sector con altos niveles de aporte al PIB regional y ocupación de la fuerza laboral de la región.

Por otra parte, las cifras del Instituto Nacional de Estadística (**Tabla 4.2)** permiten apreciar la misma tendencia señalada por CONICYT [2010] para el período 2003-2009, donde existe un predominio y crecimiento de la Industria Manufacturera, seguida por el sector Silvoagropecuario, pero con una expansión menos importante de este último [INE, 2011].

Tabla 4.2. Variación del PIB y la contribución porcentual de cada sector, empleando como comparativa el PIB regional del año 2003 (1.799.450 millones de pesos del año 2003). Fuente: Elaboración propia a partir de [INE, 2011].

Actividad	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009 (1)
Silvoagropecuario	14,6%	17,1%	18,6%	20,7%	19,7%	19,4%	19,7%
Pesca	0,1%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
Minería	0,4%	0,6%	0,7%	0,7%	0,5%	0,5%	0,5%
Industria Manufacturera	20,3%	22,3%	23,9%	25,4%	26,9%	27,7%	27,2%
Electricidad, Gas y Agua	11,1%	9,8%	11,6%	12,8%	8,9%	9,1%	10,0%
Construcción	7,5%	8,0%	9,3%	9,7%	7,8%	9,6%	8,3%
Comercio, Restaurantes y Hoteles	5,6%	5,9%	6,3%	6,7%	7,3%	7,6%	7,4%
Transporte y Comunicaciones	10,1%	10,9%	11,6%	12,2%	12,7%	12,8%	12,5%
Servicios Financieros y Empresariales (2)	6,8%	7,3%	8,0%	8,0%	8,9%	9,2%	8,9%
Propiedad de Vivienda	6,0%	6,2%	6,3%	6,5%	6,8%	7,0%	7,2%
Servicios Personales (3)	14,2%	14,4%	14,8%	15,2%	15,4%	15,8%	16,2%
Administración Pública	4,7%	4,8%	5,0%	5,1%	5,3%	5,5%	5,6%
Menos: Imputaciones Bancarias	-1,5%	-1,7%	-2,0%	-1,9%	-2,2%	-2,3%	-2,2%
Producto Interno Bruto	100,0%	105,5%	114,2%	121,1%	118,1%	122,1%	121,4%
(1) Cifras provisionales							
(2) Incluye servicios financieros, seguros, arriendo de inmuebles y servicios prestados a empresas.							
(3) Incluye educación y salud -pública y privada- y otros servicios							

El escenario de predominio y expansión de los sectores en el periodo 2003-2009 cambia fuertemente en el periodo 2008-2013, dando cuenta de un escenario dinámico en el periodo

completo 2003-2013. En la **Tabla 4.3** se presenta un análisis similar al precedente, pero empleando como base comparativa el PIB regional del año 2008 (2.916.841 millones de pesos corrientes). Como puede verse, mientras el año 2008 el primer lugar de la región es compartido entre la Industria Manufacturera y el sector de Electricidad, Gas y Agua, hacia el año 2013 la Industria Manufacturera se estanca en su porcentaje de participación; el sector de Electricidad, Gas y Agua retrocede fuertemente, dando paso a los Servicios Personales [2] como el sector predominante en este último año de cifras disponibles, quedando muy cerca entre si la Industria Manufacturera y el sector Silvoagropecuario en el segundo y tercer lugar, respectivamente.

Tabla 4.3. Variación del PIB y la contribución porcentual de cada sector, empleando como comparativa el PIB regional del año 2008 (2.916.841 millones de pesos corrientes). Fuente: Elaboración propia a partir de [INE, 2015].

Actividad	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Silvoagropecuario	13,2%	12,6%	13,7%	15,5%	16,2%	17,5%
Pesca	0,1%	0,1%	0,1%	0,2%	0,2%	0,2%
Minería	1,0%	0,8%	0,8%	1,0%	1,1%	1,0%
Industria Manufacturera	17,4%	16,1%	17,8%	19,0%	17,8%	18,6%
Electricidad, gas y agua	17,4%	17,9%	15,7%	14,4%	11,4%	9,6%
Construcción	7,4%	8,6%	9,8%	11,5%	15,0%	13,1%
Comercio, Restaurantes y hoteles	7,3%	7,1%	8,8%	9,3%	10,8%	12,1%
Transporte y Comunicaciones	8,7%	8,7%	9,0%	10,3%	10,9%	12,0%
Servicios financieros y empresariales	5,1%	5,6%	5,9%	6,9%	7,8%	8,1%
Servicios de vivienda	4,6%	4,7%	4,1%	5,1%	5,6%	6,1%
Servicios personales	11,9%	13,6%	14,8%	17,1%	18,6%	20,8%
Administración pública	5,9%	6,8%	7,5%	8,1%	8,7%	9,6%
Producto Interno Bruto	100,0%	102,4%	108,2%	118,4%	124,1%	128,7%

Cabe señalar que las diferencias entre lo señalado entre INE [2011] e INE [2015], respecto a las contribuciones porcentuales de la Industria Manufacturera y el sector de Electricidad, Gas y Agua, no se explican en los informes revisados y pueden deberse a cambios metodológicos del INE en el cálculo de los aportes que cada sector realiza al PIB regional[3]. Pese a esto, se espera que estas cifras permitan observar el dinamismo e importancia relativa de los distintos sectores a la economía de la región del Maule, logrando de esta forma caracterizar en forma general el escenario productivo actual y su evolución.

[2] De acuerdo al Banco Central, los servicios personales se explicarían en cerca de un 70% por educación y salud: http://si3.bcentral.cl/estadisticas/Principal1/Metodologias/CCNN/imacec/serieestudios42.pdf

[3] Al respecto, se puede consultar Separata Técnica 2011 del INE en el sitio web: http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/territorio/inacer/pdf/separata_metodologica_inacer_20052015.pdf

4.2 Caracterización Productiva Según las Prioridades Establecidas por los Tomadores de Decisión

La Agencia Regional de Desarrollo Productivo (ARDP) del Maule comenzó en octubre de 2007 a levantar la línea base de información necesaria para estructurar la agenda de innovación de la región. La ARDP, en conjunto con los servicios públicos de fomento productivo y el sector privado, definieron cinco sectores estratégicos en los cuales se focalizaría la acción de fomento durante el año 2008, orientada principalmente a mejorar la competitividad y posicionamiento de esto sectores a nivel nacional e internacional: Frutícola, Vitivinícola, Turismo, Forestal y Ganadero [ARDP, 2009; CONICYT, 2010].

Empleando las categorías de sectores definidas por INE [2007], la mayor parte de estos subsectores pertenecen al sector denominado "Silvoagropecuario", mientras que el Turismo genera impactos en una serie de sectores, tales como "Comercio, Restaurantes y Hoteles" y "Transporte y Comunicaciones", de lo cual se desprende su importancia relativa en la región.

Desde el punto de vista de las prioridades establecidas únicamente por el sector público, es posible estudiar la institucionalidad pública presente en la región, destinada principalmente a la investigación y desarrollo tecnológico; la transferencia y difusión tecnológica; o bien el emprendimiento [CONICYT, 2010]. En la **Figura 4.1** se presenta un esquema de la institucionalidad pública destinada a los fines señalados, donde es posible ver el enfoque predominante: Sector Silvoagropecuario, Industria e investigación general (fondos concursables).

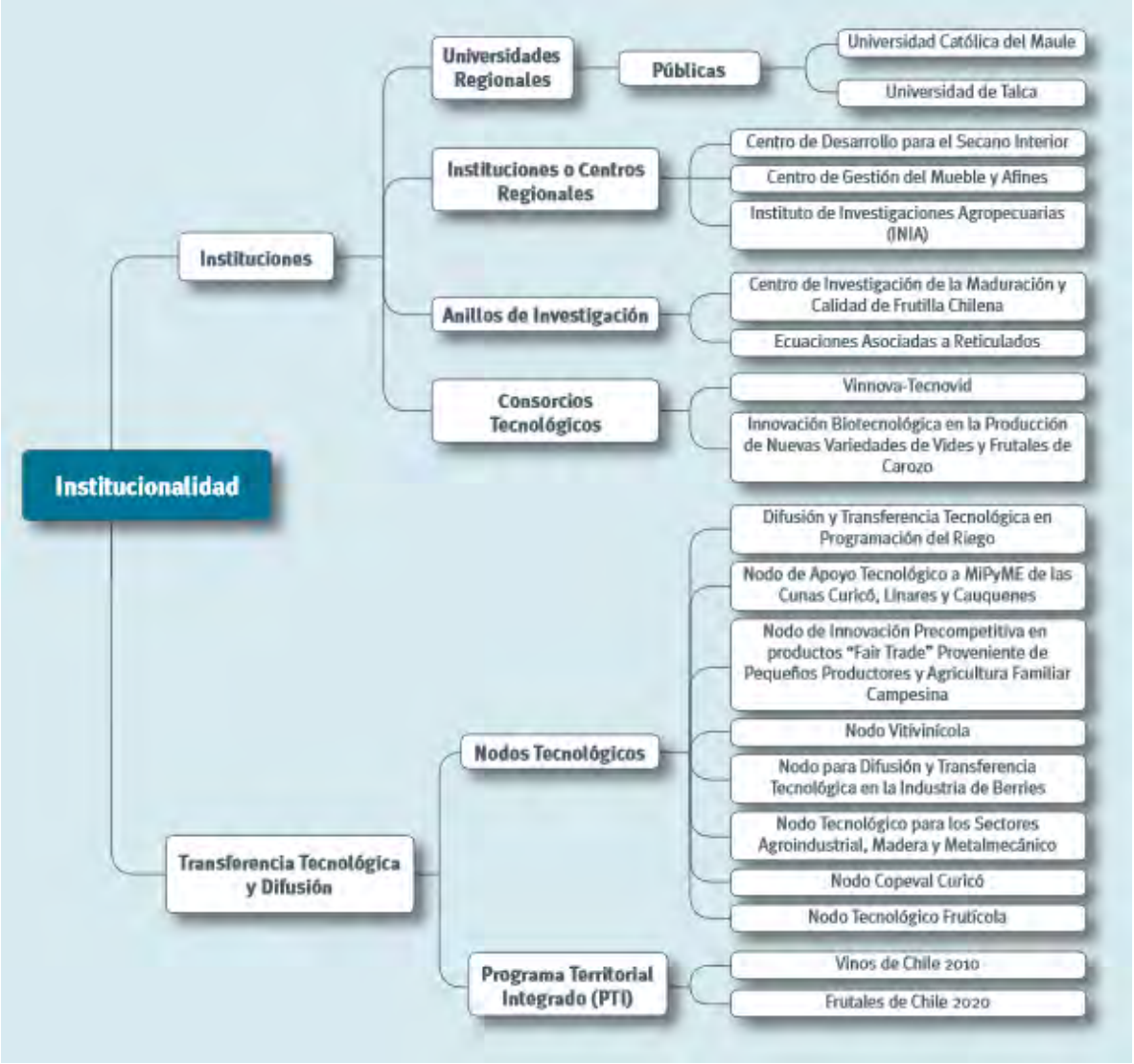


Figura 4.1. Institucionalidad pública en la región del Maule, destinada principalmente a la investigación y desarrollo tecnológico; la transferencia y difusión tecnológica; o bien el emprendimiento. Fuente: [CONICYT, 2010].

4.3 Según Demanda de Agua

Desde el punto de vista de la demanda consuntiva de agua, el sector más importante de la región es el Agropecuario. Como se observa en la **Tabla 4.4**, al año 2007 la demanda consuntiva agropecuaria y de agua potable e industrial alcanzaba los 132 m^3/s, de los cuales el sector agropecuario ocupa sobre el 95% del agua total (consuntivo) [CADE-IDEPE, 2004; DCA&RNR, 2009].

Por su parte, el principal usuario de agua de tipo no consuntivo corresponde a la industria de generación hidroeléctrica, lo cual permite que la cuenca del río Maule sea reconocida por una doble vocación en el consumo de agua, pese a que sean tipos de consumo y volúmenes diferentes entre sí [DCA&RNR, 2009]. En la **Tabla 4.4** se presentan los consumos actualizados al 2007 y proyectados hasta el 2027 asociados a los principales sectores

consumidores de agua de la región, mientras que en la **Tabla 4.5** se presenta esta misma información en términos porcentuales, separando entre derechos consuntivos (agropecuario, industrial y agua potable) y no consuntivos (energía).

Tabla 4.4. Demandas netas de agua por sector productivo. Fuente: Adaptado de [DCA&RNR, 2009].

Proyección	Demandas de Agua por Sector [m^3/s]				Caudal Total Anual [m^3/s]	Volumen Total Anual [Hm^3]
	Energía	Agropecuario	Industrial	Agua Potable		
Actual (2007)	1.342,41	128,33	2,57	1,43	1.474,74	46.507
2017	1.401,41	133,95	3,52	1,73	1.540,60	48.584
2027	1.401,41	133,95	5,63	2,06	1.543,05	48.661

Tabla 4.5. Demandas porcentuales de agua por naturaleza del derecho. Fuente: Adaptado de [DCA&RNR, 2009].

Proyección	Demandas de Agua por Tipo [m3/s]			
	No Consuntivo	% del Total	Consuntivo	% del Total
Actual (2007)	1.342,41	91%	132,33	9%
2017	1.401,41	91%	139,19	9%
2027	1.401,41	91%	141,63	9%

Como se observa en las tablas anteriores, existen dos actores dominantes en la región (Agropecuario y Energía), pero además se tienen dos naturalezas distintas de derechos de agua (consuntivo y no consuntivo).

Para conocer el estado actual de la demanda en la cuenca del río Maule, se ha empleado la información actualizada al año 2015 disponible en el Catastro Público de Aguas (CPA), obtenido desde el sitio oficial de la Dirección General de Aguas (DGA), para determinar los derechos otorgados en la zona de estudio, lo cual se presenta en la **Tabla 4.6**. Se han considerado todos los derechos asociados a la cuenca del río Maule, tanto subterráneos como superficiales permanentes y eventuales. Se han incluido además los derechos sin coordenadas en el cálculo, ya que se desea conocer el caudal total otorgado a nivel de cuenca.

Adicionalmente, se han convertido los derechos indicados en acciones mediante la siguiente equivalencia de caudal por acción: 1,5 l/s/acción. Esto considera lo señalado por DGA [2005b], pero por simplicidad del análisis se ha seleccionado el caso más desfavorable. Cabe señalar que la mayoría de las juntas de vigilancia establecen sus equivalencias entre 1,5 y 1,4 l/s, salvo por la Junta de Vigilancia del río Ancoa, que establece una equivalencia por acción de 1 l/s, representando un caudal total equivalente de 7,42 m^3/s, lo cual representa un bajo porcentaje respecto a los derechos totales de la cuenca del río Maule, los cuales se presentan en la **Tabla 4.6**.

Tabla 4.6. Resumen de derechos de agua otorgados por la DGA al año 2015 en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de Uso	Fuente	Cuenca	Naturaleza	Caudal Total Anual [m^3/s]
Consuntivo	Superficial	Río Maule	Permanente	230,53
			Eventual	164,2
	Subterráneo		Permanente	94,48
			Eventual	0,06
No Consuntivo	Superficial		Permanente	1.656,2
			Eventual	847,47
	Subterráneo		Permanente	0,058

Si se consideran solo los derechos superficiales y permanentes presentados en la **Tabla 4.6**, como referentes actuales de los sectores Agropecuario (consuntivo) y Energía (no consuntivo) mostrados en la **Tabla 4.4**, se tiene que en ambos sectores se han superado las proyecciones realizadas el 2007. La demanda consuntiva proyectada en la **Tabla 4.5** al futuro (2027) es de 141,63 m^3/s, mientras que el 2015 se tienen otorgados un total de 230,53 m^3/s (**Tabla 4.6**), lo cual significa un 63% de diferencia. Por su parte, la demanda de derechos no consuntivos proyectada en la **Tabla 4.5** al futuro (2027) es de 1.401,41 m^3/s, mientras que el 2015 se tienen otorgados un total de 1.656,2 m^3/s (**Tabla 4.6**), lo cual significa un 18% de diferencia.

Aunque los derechos de agua otorgados no son necesariamente los utilizados efectivamente, los resultados presentados indican que la demanda de agua podría seguir aumentando en el futuro, en la medida que se concreten nuevos proyectos en ambos sectores.

Siendo estos dos sectores los de mayor importancia relativa en términos de uso y derechos de agua, se presenta a continuación un análisis en detalle de cada uno, incluyendo una revisión de su importancia relativa respecto al contexto nacional.

Junto al sector Agropecuario se incluye también al sector silvícola o forestal como otra fuente de demanda consuntiva de agua, puesto que su demanda pasiva de agua ha sido bien investigada en Chile. El efecto de esta demanda puede llegar a ser relevante para los otros dos sectores en estudio (Agropecuario y Energía), ejerciendo una competencia por el agua que es muchas veces desconocida por los tomadores de decisión. Por ejemplo, Lara *et al*. [2009] estimó un incremento promedio del 14,1% en la escorrentía total de verano, por cada 10% de aumento en la cobertura de bosque nativo de una cuenca. El mismo incremento de superficie ocupada (10%) por plantaciones de *Eucalyptus spp*. y *Pinus radiata* reduce la escorrentía total en un 20,4%. Little *et al*. [2009] también reporta descensos en la escorrentía debido al cambio de uso de suelos, en el cual se reduce la cobertura de bosque nativo y se incrementa proporcionalmente la presencia de plantaciones forestales, principalmente compuestas por *Pinus radiata*.

4.3.1 Caracterización del Sector Silvoagropecuario

La Región del Maule concentra el 17,2% de la superficie nacional dedicada a cultivos, predominando las plantaciones forestales (17,6% de la superficie nacional), seguidas por cereales, frutales, plantas forrajeras y viñas y parronales, grupos que en su conjunto responden por el 94% de la superficie de cultivos en la región [Censo Agropecuario 2007 citado en ODEPA, 2013].

En la **Tabla 4.7** se presenta el detalle de las especies forestales a nivel nacional y regional, donde se aprecia que la mayor parte de la superficie de la región destinada al sector forestal está dominada por *Pinus radiata*, ocupando el 90% del total regional destinado a especies forestales. A nivel nacional, la región aporta el 24,2% del total destinado a *Pinus radiata*.

Tabla 4.7. Especies forestales cultivadas en Chile y la región del Maule, junto con la importancia relativa (%) del Maule respecto al resto del país. Fuente: Adaptado de [INE, 2007].

Participación	Especies Forestales	Álamo	Aromo	Eucaliptus nitens	Eucaliptus globulus	Pino radiata (insigne)	Otras Especies
	Total [ha]	Superficie [ha]	Superficie [ha]	Superficie [ha]	Superficie [ha]	Superficie [ha]	Superficie [ha]
Total país	1.805.977	5.193	1.607	158.347	377.014	1.187.744	76.071
Región del Maule	318.743	3.397	39	2.614	22.146	287.005	3.542
% de participación por Especie	17,6%	65,4%	2,4%	1,7%	5,9%	24,2%	4,7%

En el caso de la ganadería, se puede destacar a los caballares de la región (56 mil cabezas), que representan el 17,5% de la producción nacional, mientras que en el resto de las especies la participación del Maule está por debajo del 10% a nivel país. En relación a la cantidad de cabezas, el mayor número de cabezas de ganado de la región corresponde a los bovinos (265 mil cabezas), seguido por los ovinos (163 mil cabezas), lo cual representa el 7% y 4,2% de la producción nacional, respectivamente [ODEPA, 2013].

Dentro de los cultivos agrícolas se puede destacar el cultivo de arroz en la región, que corresponde al 80% de la superficie total nacional. La importancia de los frutales en la región es especialmente relevante a nivel nacional, lo cual se ve reflejado en los casos de las frambuesas y manzanas rojas, que corresponden al 60% y 58% de la producción total nacional. Otros frutales cuya producción regional es importante son los siguientes (porcentajes indican relación con producción nacional): kiwi (51%), cerezo (44%), manzanas verdes (37%) y arándanos (25%). Finalmente, se debe destacar la importancia de la región en el cultivo de viñas y parronales, donde posee cerca de un tercio (35%) de la participación nacional de viñas viníferas [ODEPA, 2013].

Pese a la importancia del sector agrícola a escala nacional, los datos del VII Censo Agropecuario y Forestal 2007 indican que existe un elevado uso del riego gravitacional o tradicional en la región del Maule, respecto al resto del país. En la **Tabla 4.8** se presenta la

superficie en hectáreas regada según distintas técnicas, a nivel nacional y regional, donde se aprecia que la región del Maule concentra la mayor parte del riego gravitacional que se realiza en el país, a la vez que representa el 27,3% de la superficie regada total de Chile.

Tabla 4.8. Superficie regada a nivel nacional y regional, por sistema de riego. Fuente: Adaptado de [INE, 2007].

Participación		Gravitacional (Tradicional)			Mecánico Mayor		Microriego	
	Total	Tendido	Surco	Otros	Aspersión tradicional	Carrete o pivote	goteo y cinta	Microaspersión y microjet
Superficie Chile [ha]	1.093.812,9	453.325,8	311.152,1	25.362,5	30.071,6	26.426,7	209.348,9	38.125,3
Superficie Región del Maule [ha]	299.059,8	150.605,2	90.420,0	14.829,4	3.415,3	2.160,0	27.477,6	10.152,3
% Participación por Superficie Regada con cada Sistema	27,3%	33,2%	29,1%	58,5%	11,4%	8,2%	13,1%	26,6%

En la **Tabla 4.9** se presenta un análisis relativo al porcentaje de uso de cada sistema, respecto al total cultivado en cada caso (nacional y regional), del cual se concluye que el 86% de la región aún es regada en forma gravitacional, dominando el riego por tendido (50%) y el riego por surco (30%), mientras que solo el 13% es regado por sistemas de micro riego y un 2% por sistemas mecánicos mayores [INE, 2007]. A nivel nacional el riego tradicional solo representa el 72% del total.

Tabla 4.9. Porcentaje de uso de los principales sistemas de riego, a nivel nacional y regional. Fuente: Adaptado de [INE, 2007].

Participación		Gravitacional (Tradicional)			Mecánico Mayor		Microriego	
	Total	Tendido	Surco	Otros	Aspersión tradicional	Carrete o pivote	goteo y cinta	Microaspersión y microjet
Superficie Chile [%]	100%	41,4%	28,4%	2,3%	2,7%	2,4%	19,1%	3,5%
Superficie Región del Maule [%]	100%	50,4%	30,2%	5,0%	1,1%	0,7%	9,2%	3,4%

En la **Tabla 4.10** se presentan distintos tipos de eficiencias por tipo de riego. Considerando que la mayor parte de la demanda de agua para cultivos de la región se utiliza con riego por tendido y surco, de la **Tabla 4.10** se aprecia que significa una eficiencia del 30% al 45%, muy por debajo del 85% de eficiencia esperado con sistemas de micro riego.

Tabla 4.10. Eficiencias por tipo de riego. Fuente: [INIA, 2010]

Método	Eficiencia Riego [%]
Tendido	30
Surcos	45
Californiano	65
Aspersión	75
Microjet	85
Microaspersión	85
Goteo	90

En el contexto de la eficiencia de uso del agua, resulta interesante constatar un aumento sostenido de las contribuciones de este sector al PIB regional (ver **Tabla 4.3**), pese a que se ha producido una reducción del 6% de la superficie cultivada en el Maule, entre los dos censos Agropecuario y Forestal, pasando de 318 mil há en 1997 a 299 mil há en 2007 [INE citado en PLC, 2014]. Esto indica que la introducción de nuevas tecnologías y mejores técnicas de riego dan lugar a cada vez mayores aportes del sector a la economía de la región.

No obstante, el potencial de crecimiento del sector se ve amenazado por la variación de la situación hídrica en la región. De acuerdo a datos de la Comisión Nacional de Riego (CNR), la macrozona de la VI a la VII región ha visto reducida su disponibilidad hídrica entre 1996 y 2010, pasando de 16,5 millones de m^3 anuales a 15,2 millones de m^3 anuales, respectivamente. La proyección es que hacia 2025 esta reducción sea mayor, llegando a los 12,7 millones de m^3 anuales [PLC, 2014]. En este sentido, las mejoras en las tecnologías de riego y otro tipo de innovaciones serán esenciales para el desarrollo de este sector productivo y de la región.

4.3.2 Caracterización del Sector Hidroeléctrico

El sector hidroeléctrico en Chile se caracteriza por presentar una importancia relativa alta respecto al contexto nacional de producción de energía, representando cerca del 50% de la capacidad instalada total del Sistema Interconectado Central (SIC) [CDEC SIC, 2015b]. Pese a esto, no existen fuentes de información únicas respecto a sus características generales.

De acuerdo a la información proporcionada por el Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central (CDEC SIC), en la actualidad (octubre de 2015) dicho sistema cuenta con una capacidad instalada de 15.771,7 MW, de los cuales el 23,6% corresponde a energía proporcionada por embalses y un 17,1% corresponde a centrales de pasada, con un total de 3.728,8 MW y 2.695 MW, respectivamente [CDEC SIC, 2015b]. Esta información se indica en la **Tabla 4.11**, donde se presenta además el total de energías renovables no convencionales (ERNC), que incluye tanto mini-hidro como otras tecnologías (solar, biomasa, etc.).

Tabla 4.11. Capacidad total instalada en el SIC, junto con la capacidad hidroeléctrica instalada, a octubre de 2015. Fuente: [CDEC SIC, 2015b].

Tipo de Central	Potencia Total [MW]	Potencia Total [%]
Embalse	3.728,8	23,6%
Pasada	2.695,0	17,1%
ERNC	2.049,6	13,0%
Centrales No Hidráulicas	7.298,3	46,3%
Total	15.771,7	100,0%

A septiembre de 2015, la Comisión Nacional de Energía (CNE) proporciona cifras diferentes, señalado una capacidad instalada de 15.433 MW, es decir, 254 MW adicionales. Por otra parte, la potencia y el porcentaje de energía proporcionada por embalses y centrales de pasada muestran diferencias importantes, como se muestra en la **Tabla 4.12**. Notar que la diferencia de potencia asociada a embalses es mayor que la diferencia total de potencia instalada del SIC [CDEC SIC, 2015b; CNE, 2015].

Tabla 4.12. Capacidad total instalada en el SIC, junto con la capacidad hidroeléctrica instalada, a septiembre de 2015. Fuente: [CNE, 2015].

Tipo de Central	Potencia Neta Total [MW]	Potencia Neta Total [%]	N° Centrales
Hidráulica Embalse	4.033,6	26,1%	13
Hidráulica Pasada	1.998,8	13,0%	40
Mini Hidráulica Pasada (Convencional)	67,4	0,4%	14
Mini Hidráulica Pasada (ERNC)	333,8	2,2%	72
Potencia Total Instalada	**15.433,0**	**100,0%**	**321**

Al estudiar la composición actual de centrales hidroeléctricas en la región del Maule, tanto las convencionales como las denominadas como ERNC, se aprecian diferencias y vacíos entre las diferentes fuentes consultadas. Las mayores diferencias observadas se encuentran entre las potencias y caudales indicados por los titulares en sus estudios y declaraciones de impacto ambiental, respecto a lo que es posible encontrar en las fuentes oficiales.

En la **Tabla 4.13** se presenta el resumen de centrales de embalse y pasada denominadas convencionales, que en conjunto suman 1.500 MW de potencia bruta instalada en la región del Maule. Una de las discrepancias observadas en esta información se relaciona con la potencia de Los Hierros, que en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) se indica igual a 19,85 MW, lo cual la califica como ERNC, sin embargo, CNE [2015] señala que su potencia es de 25 MW, lo cual la clasifica como tipo convencional.

Tabla 4.13. Resumen de centrales hidroeléctricas de embalse y de pasada (convencionales) existentes en la región del Maule. Fuente: Elaboración propia a partir de [CEPAL, 2009a; CDEC SIC, 2015b; CNE, 2015].

Central	UTM Este	UTM Norte	Titular	Año Término	Tipo	Potencia Bruta [MW]	Caudal de Diseño [m^3/s]
Cipreses	336.571	6.038.143	Endesa	1955	Embalse	106	36
Pehuenche	305.068	6.043.440	Pehuenche S.A.	1991	Embalse	566	300
Colbún	285.546	6.048.363	Colbún S.A.	1985	Embalse	474	280
Machicura	283.131	6.043.077	Colbún S.A.	1985	Embalse	95	280
Isla	334.149	6.035.523	Endesa	1963	Pasada	68	84
Curillinque	324.615	6.035.929	Pehuenche S.A.	1993	Pasada	89	84
Loma Alta	320.870	6.037.435	Pehuenche S.A.	1997	Pasada	40	84
San Ignacio	269.825	6.055.821	Colbún S.A.	1996	Pasada	37	194
Los Hierros*	313.640	6.029.856	Empresa Eléctricas Aguas del Melado S.A.	2014	Pasada	25	28

*Central actualizada con información de [CNE, 2015]. Caudal obtenido del Servicio de Evaluación Ambiental en sitio web: http://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=4138671

En la **Tabla 4.14** se presenta el resumen de mini centrales de pasada denominadas de tipo ERNC, que en conjunto suman 84,5 MW de potencia bruta instalada actualmente en la región del Maule. De construcción más reciente, la información relativa a potencias fue obtenida principalmente de CDEC SIC [2014], mientras que para los caudales fue necesario utilizar diversas fuentes, desde los sitios oficiales de los Titulares hasta lo informado en el SEIA. Cuando la información presentó discrepancias, se utilizaron valores alternativos a los disponibles en el SEIA.

Para analizar la importancia de la producción hidroeléctrica de la región del Maule, respecto al contexto hidroeléctrico nacional (SIC), es posible emplear como referencia la información detallada en la **Tabla 4.12** (nacional) y lo indicado en la **Tabla 4.13** y **Tabla 4.14** (Maule). De esta forma, se obtiene lo siguiente:

1. La producción de las centrales tipo embalse en el Maule representa cerca de un tercio del total nacional instalado (30,8%).
2. En relación a las centrales convencionales de pasada en Chile, el Maule tiene un aporte menos significativo (12,5%) que en el caso de los embalses, pero igualmente relevante.
3. La producción de mini-hidro (ERNC) en el Maule representa cerca de un cuarto del total nacional instalado (25,3%).

Tabla 4.14. Resumen de centrales hidroeléctricas calificadas como ERNC, existentes en la región del Maule. Fuente: Elaboración propia a partir de [CNE, 2015], [CDEC SIC, 2014] y otras fuentes.

Central	UTM Este	UTM Norte	Titular	Primera Sincronización	Tipo	Potencia Bruta [MW]	Caudal de Diseño [m^3/s]
Chiburgo	286.821	6.051.045	Colbún S.A.	13-07-2007	ERNC	19,4	20(1)
San Clemente	286.600	6.058.066	Colbún S.A.	29-07-2010	ERNC	5,9	17(2)
MCH Dosal*	336.571	6.038.143	Dosal Hnos. y Cia. Ltda.	17-06-2015	ERNC	0,27	5(3)
Ojos de Agua	336.641	6.038.286	ENDESA ECO S.A.	27-06-2008	ERNC	9	14,5(4)
Purísima	301.362	6.102.367	Enerbosch S.A.	31-01-2011	ERNC	0,43	6(5)
Mariposas	294.883	6.058.494	Hidroeléctrica Rio Lircay	01-12-2010	ERNC	6,3	20(6)
Lircay	294.988	6.065.023	Hidromaule S.A.	07-10-2008	ERNC	19	25(7)
Providencia	293.770	6.072.494	Hidroeléctrica Providencia S.A.	01-12-2012	ERNC	14,2	28(8)
Roblería	294.046	6.030.259	Generadora Eléctrica Roblería S.A.	09-04-2013	ERNC	4,0	3,6(9)
Los Hierros 2	312.244	6.031.826	Empresa Eléctrica Portezuelo S.p.A.	En Pruebas	ERNC	6,0	28(10)

*Dosal no informada por [CDEC SIC, 2014]. Obtenida de [CNE, 2015].

(1) Fuente: http://www.latinomineria.com/wp-content/uploads/sites/2/2014/09/CCPE-muestra.pdf. En SEIA se señala que serán 14 m^3/s y 14 MW.

(2) Fuente: http://www.svs.cl/documentos/hes/hes_2009060060524.pdf

(3) Fuente: http://repositoriodigital.corfo.cl/handle/11373/9213

(4) Fuente: http://www.latinomineria.com/wp-content/uploads/sites/2/2013/10/Catastro-Energetico-2012.pdf. En SEIA se señala que serán 13.3 m^3/s.

(5) Fuente: http://www.mcapital.cl/purisima.html

(6) Fuente: http://www.hidromaule.cl/es/central-mariposas

(7) Fuente: http://www.hidromaule.cl/es/central-lircay

(8) Fuente: http://www.hidromaule.cl/es/central-providencia

(9) Fuente: http://www.hidroelectricarobleria.cl/presentacion_robleria.pdf

(10) Fuente: http://www.besalco.cl/inversionistas/documentos/EncuentroInversionistas2013/BesalcoEnergia.pdf. En esta fuente se indica que potencia es de 5.5 MW.

A este contexto de generación hidroeléctrica instalada en la región del Maule, se deben añadir 4 proyectos actualmente en construcción por un total de 195 MW, de acuerdo a lo informado por CNE [2014]. Adicionalmente, existe el proyecto en construcción denominado Túnel Melado, de 3,9 MW de potencia y un caudal de diseño de 17 m^3/s [Besalco, 2013]. Estos proyectos se muestran en la **Tabla 4.15**.

Además de los proyectos en construcción indicados en la **Tabla 4.15**, recientemente se ha evaluado el potencial hidroeléctrico sin explotar en la cuenca del río Maule, el cual alcanza los 1442 MW, representando un 7,5% del potencial total sin explotar estimado en Chile, dando cuenta de la importancia de la cuenca en términos de generación hidroeléctrica [MINENERGIA - DGA – DGF, 2014]. En el **Capítulo 5.3** se presenta con más detalle el potencial hidroeléctrico distribuido en la cuenca [MINENERGIA - DGA – DGF, 2014], así como

los antecedentes disponibles de centrales hidroeléctricas que se han proyectado en la cuenca.

Tabla 4.15. Proyectos hidroeléctricos en construcción en la región del Maule. Fuente: [Besalco, 2013; CNE, 2014].

Proyecto	Propietario	Fecha estimada de puesta en marcha	Tipo	Potencia [MW]
La Montaña I	VHC	01-05-2015	Hidro - Pasada	3
Río Colorado	GPE - Hidroeléctrica Río Colorado S.A.	01-06-2016	Hidro - Pasada	15
Ancoa	GPE	01-06-2016	Hidro - Pasada	27
Los Cóndores	Endesa	01-12-2018	Hidro - Pasada	150
Túnel Melado	Besalco Energía Renovable S.A.	2016	Sin información	3,9

4.4 Síntesis y Análisis de Resultados

Una vez realizada la descripción y caracterización productiva de la cuenca del río Maule, en la presente sección se analizan los sectores más relevantes según cada una de las tres perspectivas empleadas:

i. Según aporte al PIB regional de los sectores productivos.
ii. Según las prioridades establecidas por el sector público.
iii. Según su demanda de agua.

En la **Tabla 4.16** se presenta un resumen de los sectores destacados en cada caso, pero empleando una terminología transversal a todos los criterios considerados, debido a que no existe una denominación unificada para cada sector. Se ha omitido el sector de Servicios Personales, pues pese a su relevancia actual en el aporte al PIB regional, no es mencionado en los demás criterios.

Tabla 4.16. Sectores productivos relevantes según cada uno de los criterios empleados en el análisis de las características productivas de la región del Maule. Fuente: Elaboración propia.

Sectores Productivos Relevantes	Criterios de Análisis de Sectores Productivos Relevantes		
	Aporte al PIB Regional	Prioridades de los Tomadores de Decisión	Demanda de Agua
Silvoagropecuario	x	x	x
Industria	x	x	
Energía	x		x
Turismo	x	x	

Considerando los antecedentes analizados, es posible ubicar en primer lugar de importancia en la región del Maule al sector Silvoagropecuario. No solo tiene un rol destacado en términos económicos o de aporte al PIB regional, sino que a nivel nacional tiene gran

relevancia en una serie de productos forestales, agrícolas y, en menor medida, ganaderos. Adicionalmente, es posible constatar la elevada demanda de agua del sector en su conjunto, tanto desde el punto de vista de los derechos de agua consuntivos (subsector agropecuario) como desde la perspectiva de las demandas pasivas de agua (forestal).

Considerando que este estudio se enfoca en analizar el impacto del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos, es posible dar un mayor peso al criterio de demanda de agua, lo cual permite señalar al sector Energía como el segundo más relevante.

Por su parte, el Turismo y la Industria parecen ser igualmente relevantes, aunque en ninguno de los antecedentes técnicos empleados se indica una relación directa entre el Turismo y los recursos hídricos. Pese a esto, diversas actividades relacionadas con el turismo, tales como pesca y paisajismo, pueden ser empleadas como indicadores al momento de establecer un caudal ecológico [DGA, 2011], lo cual indica que este sector puede ser determinante en la disponibilidad de agua para nuevos proyectos de energía. En este sentido, se requiere avanzar hacia un análisis espacial de las actividades turísticas, que permita dar cuenta de competencias y superposiciones espaciales entre las distintas actividades productivas y el turismo.

En el siguiente capítulo se presenta la información espacial de distintas actividades productivas que ha sido posible recopilar en el marco de este estudio, con lo cual se reúnen todos los antecedentes necesarios para seleccionar la zona definitiva de estudio.

5 CLASIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE SUBCUENCAS

Además de una descripción y caracterización productiva de la cuenca del río Maule, abordada en el **Capítulo 4** mediante los antecedentes disponibles para la región del Maule, se requiere analizar a nivel espacial la presencia de proyectos hidroeléctricos en funcionamiento, construcción y futuros, así como el emplazamiento de otras actividades productivas (económicas) con utilización importante del recurso hídrico.

Como se indicó en el **Capítulo 4**, los sectores con mayor demanda de agua son el silvoagropecuario e hidroeléctrico, no obstante, se considera adecuado incluir otros usos prioritarios de la cuenca, por ejemplo, aquellas zonas identificadas como turísticas, dada su importancia reportada en términos de empleos y aportes al PIB regional, así como su posible competencia por los espacios utilizados habitualmente por la industria hidroeléctrica.

Por otra parte, es necesario evaluar la disponibilidad de información hidrometeorológica en la zona, lo cual es un insumo fundamental para la modelación hidrológica requerida para evaluar el impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica.

A continuación se presenta una serie de mapas temáticos, en los cuales se reúne la información espacial disponible para diferentes actividades productivas, así como la distribución de las estaciones e información hidrometeorológica en la cuenca. Cada mapa ha sido elaborado para este estudio y contiene en su interior las fuentes de la información empleadas. Adicionalmente, se incluyen las bases de datos y mapas SIG utilizados, como parte de los anexos que acompañan a este estudio.

5.1 Estaciones Hidrometeorológicas

Los antecedentes de registros hidrometeorológicos han sido obtenidos de dos fuentes complementarias:

i. La primera corresponde a la base de datos nacional de estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA), obtenida en 2015.
ii. La segunda fuente de información pertenece a la base de datos de caudales, precipitaciones y temperaturas (1940-2013) del Centro del Clima y la Resiliencia[4] (CR2), un centro de investigación nacional que pone a disposición de la comunidad científica las bases de datos señaladas (715[5] estaciones a lo largo de Chile).

Mientras la primera fuente (DGA) permite analizar la vigencia y ubicación oficial de las estaciones, el CR2 ofrece sus bases de datos en un formato de trabajo distinto al oficial, el

[4] *Center of Excellence* FONDAP-CONICYT n.15110009
[5] Durante la elaboración de este estudio se actualizó la base de datos hasta septiembre de 2015, sin embargo, el número de estaciones totales se redujo a 553, sin que fuese posible obtener a tiempo una versión oficial del CR2 respecto a este cambio en el número total de estaciones.

que permite procesar rápidamente mediante rutinas computacionales las longitudes de registro, promedios, desviaciones estándar, entre otros parámetros de interés. De esta forma, ambas fuentes de información son complementarias en el análisis de disponibilidad de datos hidrometeorológicos.

Si bien existen diferencias entre ambas fuentes de información, estas se limitan al número de estaciones totales de la red nacional y a algunas coordenadas de ubicación. Al respecto, la División de Estudios y Planificación de la DGA considera que la base de datos del CR2 es válida desde el punto de vista de la estadística que contiene (información obtenida en el marco de reuniones anteriores con la DGA).

A continuación se presentan los mapas temáticos por cada una de las estaciones hidrometeorológicas de interés: fluviometría (registros de caudal) y meteorología (registros de precipitación y temperatura).

- **Fluviometría**

En la **Figura 5.1** se presentan las estaciones fluviométricas existentes al interior de la cuenca del río Maule, indicando si se encuentran vigentes o suspendidas según las bases de datos de la DGA. En la **Figura 5.2** se presentan las estaciones separadas en dos grupos, de acuerdo al análisis de las bases de datos del CR2:

i. Estaciones con 30 años o más de registro.
ii. Estaciones con menos de 30 años de registro.

Como se aprecia al comparar ambas figuras o fuentes de información, si bien existe un gran número de estaciones vigentes en la cuenca, aquellas que pueden ser empleadas en este estudio (con 30 años o más de registro) representan una minoría, no existiendo ninguna estación con estas características en la zona alta (subcuencas 0730 y 0731) y en la desembocadura (subcuenca 0738) de la cuenca del Maule. Esto indica que se requieren métodos indirectos para estimar la escorrentía en estos sistemas.

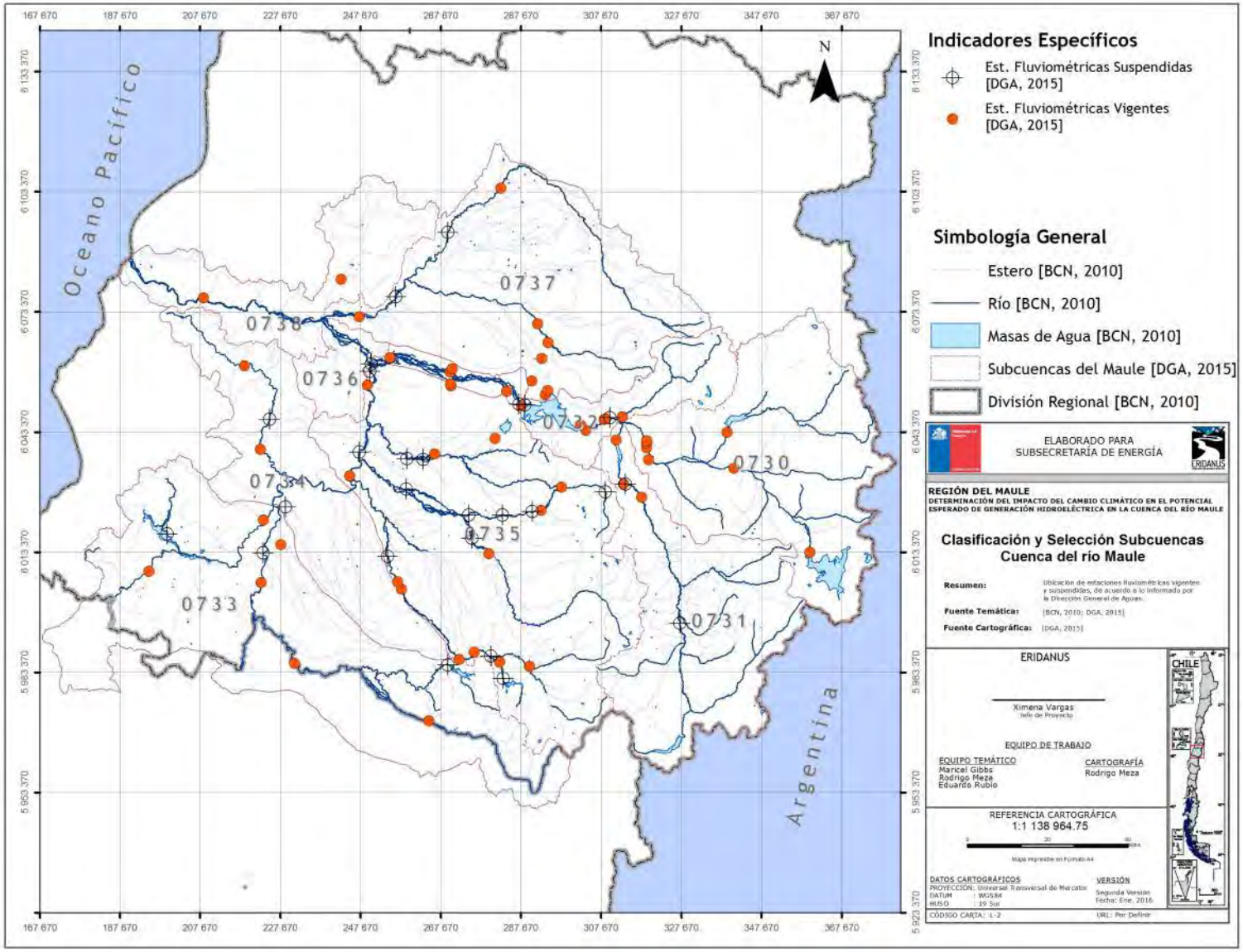


Figura 5.1. Estaciones fluviométricas vigentes y suspendidas. Fuente: Elaboración propia.

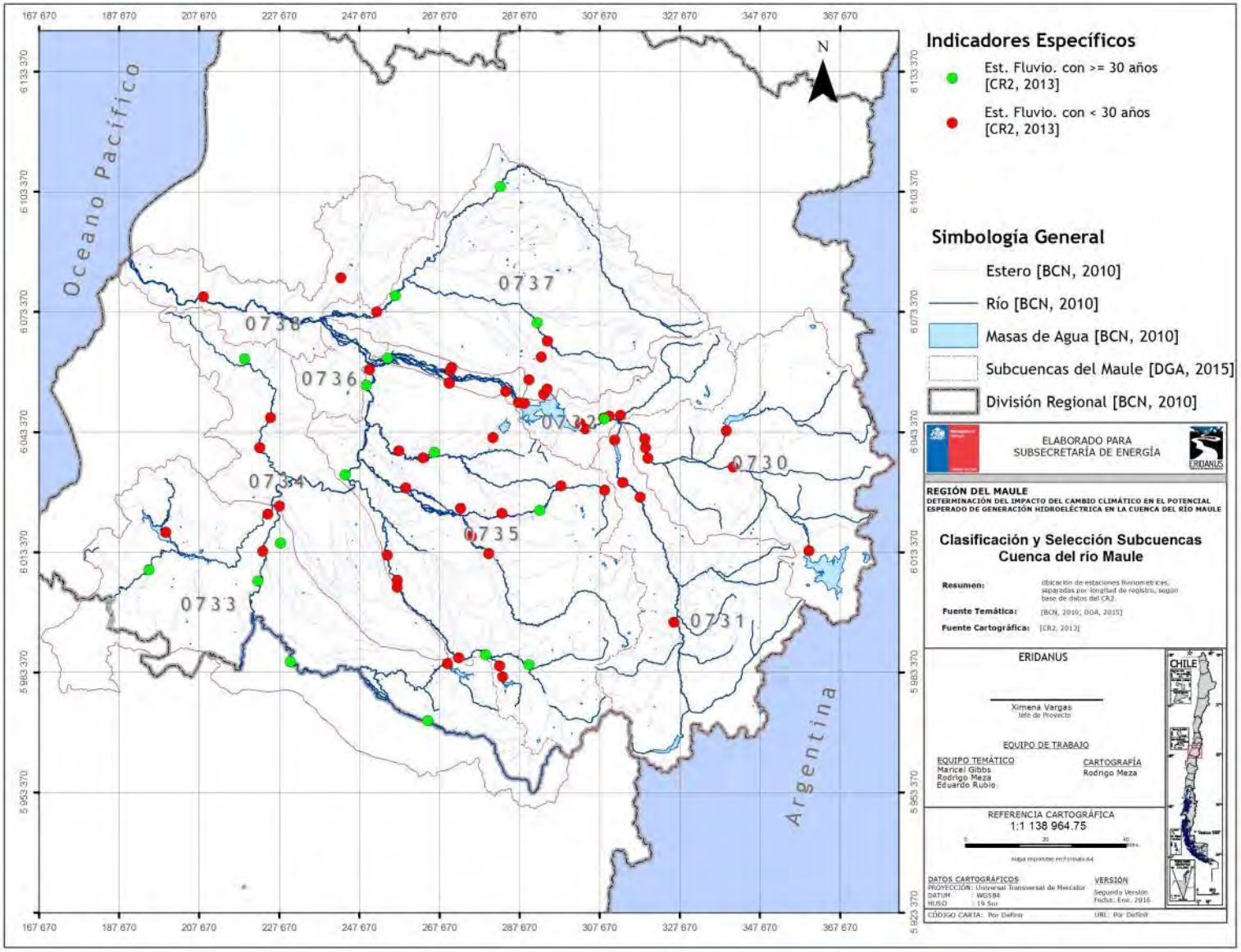


Figura 5.2. Estaciones fluviométricas según su longitud de registro. Fuente: Elaboración propia.

- **Meteorología**

En la **Figura 5.3** se indican las estaciones meteorológicas vigentes y suspendidas que informa la DGA, mientras que en la **Figura 5.4** y **Figura 5.5** se presentan respectivamente las estaciones con registros de precipitación y temperatura obtenidos del CR2, separados por longitud de registro en cada caso.

Como se observa en la **Figura 5.3**, existe un gran número de estaciones meteorológicas vigentes en la cuenca del Maule, siendo las subcuencas 0730 y 0731 las que presentan menor densidad de estaciones. Por otra parte, las estaciones con 30 años o más de información de precipitaciones se encuentran principalmente en el valle intermedio de la cuenca, como se aprecia en la **Figura 5.4**.

Los datos de temperatura son importantes para los modelos de acumulación y derretimiento de nieve, sin embargo, se tienen solo 5 estaciones con 30 años o más de registros, no existiendo ninguna estación en la parte alta de la cuenca, como se observa en la **Figura 5.5**.

Desde el punto de vista meteorológico, las subcuencas de cabecera (0730 y 0731) y desembocadura (0738) de la cuenca del río Maule están pobremente caracterizadas, lo cual indica que se requieren métodos indirectos para estimar las condiciones climáticas de estos sistemas.

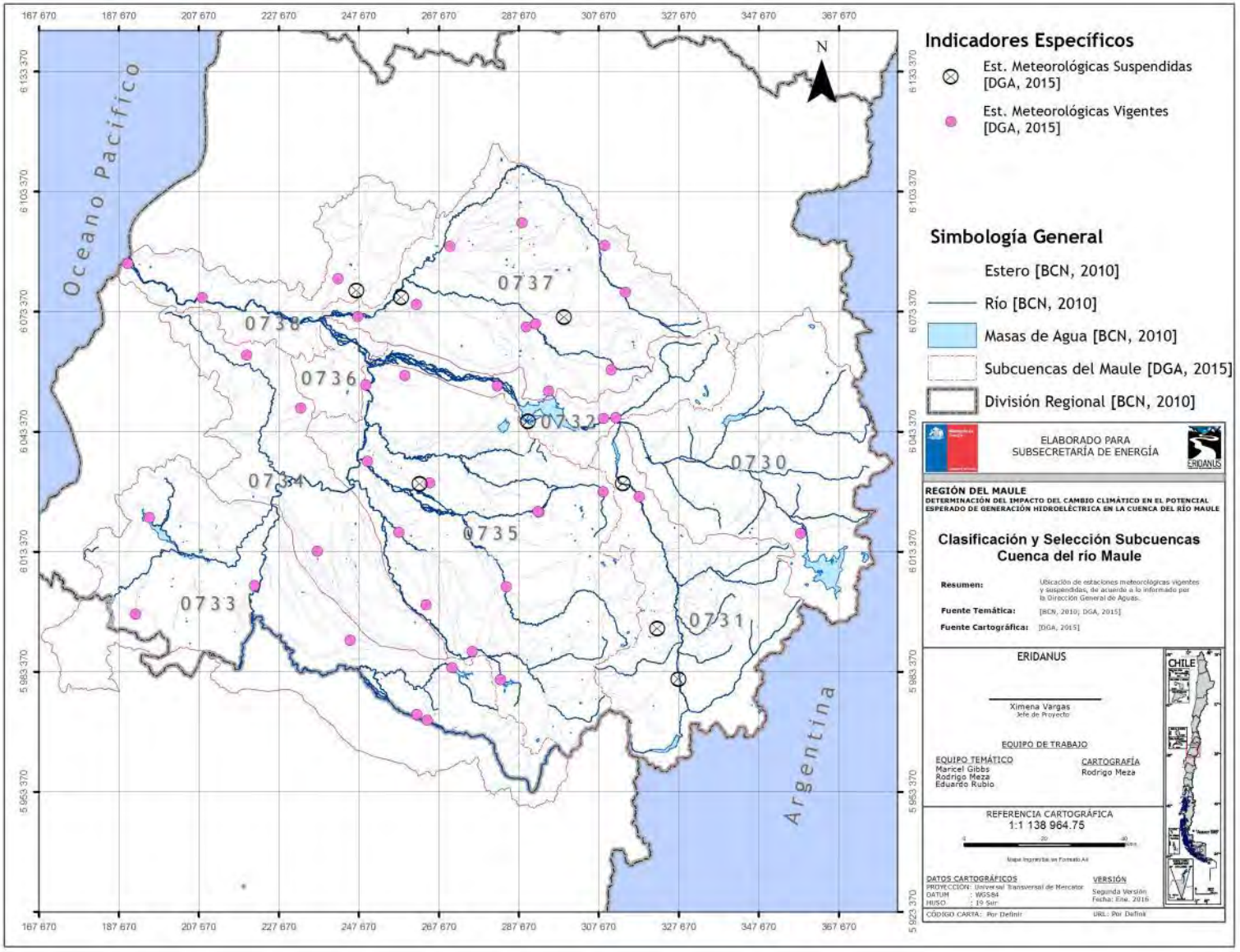


Figura 5.3. Estaciones meteorológicas vigentes y suspendidas. Fuente: Elaboración propia.

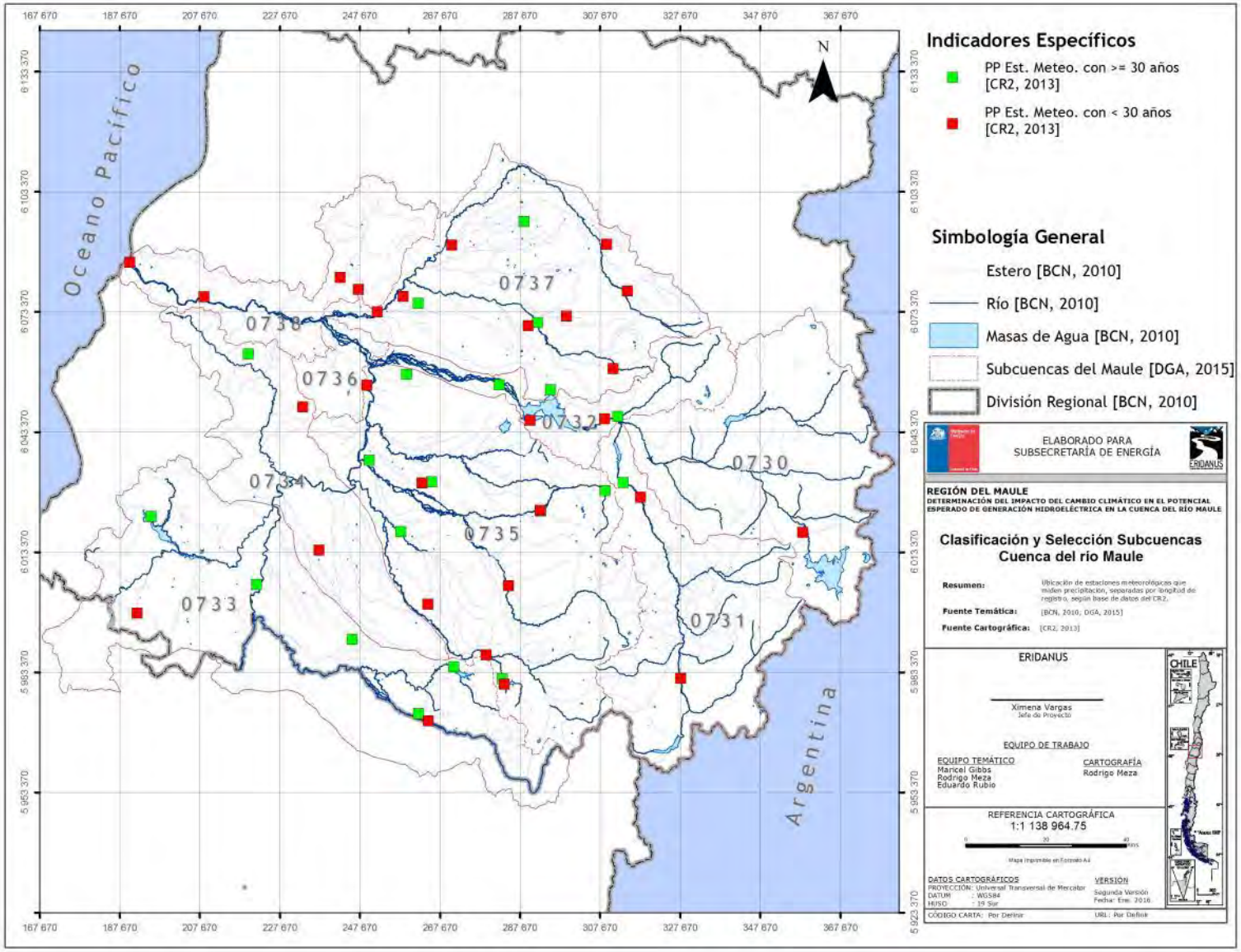


Figura 5.4. Registro de precipitaciones en estaciones meteorológicas, según su longitud de registro. Fuente: Elaboración propia.

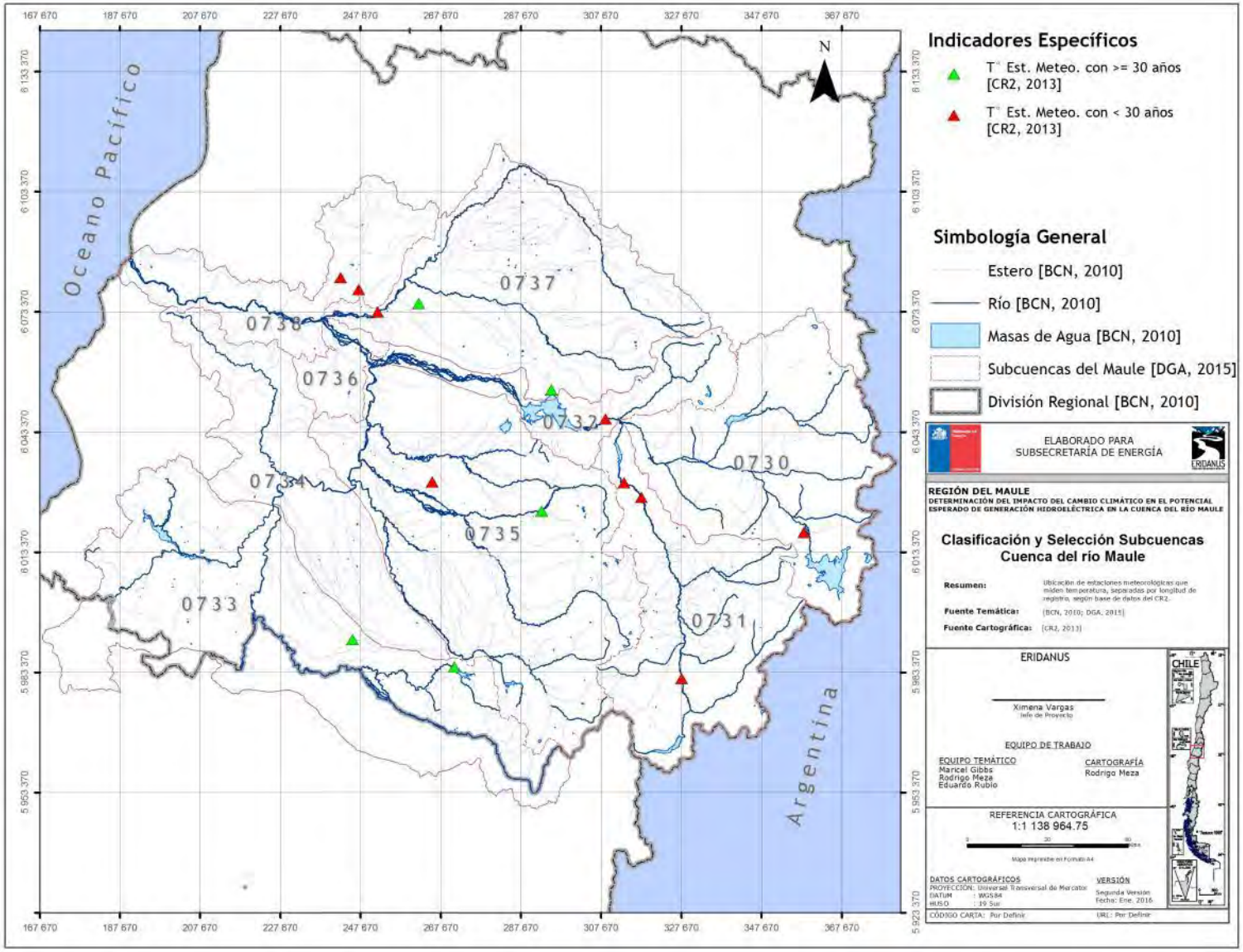


Figura 5.5. Registro de temperaturas en estaciones meteorológicas, según su longitud de registro. Fuente: Elaboración propia.

5.2 Producción Silvoagropecuaria

En el **Capítulo 4.3.1** se presentó el carácter productivo de la región del Maule, así como su importancia a nivel nacional, indicando las principales cifras que describen a este sector.

Por otra parte, el análisis espacial requiere conocer la ubicación y extensión de las zonas destinadas a riego, plantaciones forestales y bosque nativo, información que se encuentra disponible en distintas fuentes o servicios sectoriales. Por ejemplo, es posible encontrar información georeferenciada de los sectores dedicados al riego en la Comisión Nacional de Riego, Corporación Nacional Forestal y Dirección General de Aguas, por nombrar las principales fuentes consultadas. De esta forma, se ha debido seleccionar la información a presentar en los mapas temáticos que se muestran más adelante, indicándose en cada caso la fuente de la información empleada.

En la **Figura 5.6** se presenta la red de canales y zonas de riego empleadas en la modelación hidrológica y operacional realizada en el Plan Director del Maule [DGA, 2008]. Por otro lado, en la **Figura 5.7** se muestra el uso de suelo forestal, donde también se incluye la zona de uso agrícola que posee [CONAF, 2015]. Como se aprecia, no existen diferencias significativas entre ambas zonas de riego, pese a la diferencia de años que existe entre ambas fuentes de información. Si se considera a la infraestructura de canales de riego como estática en el tiempo, es posible concluir que la evolución de los cultivos y las actividades agrícolas en general se producen aproximadamente sobre la misma área a través de los años, lo cual permite establecer con cierto nivel de certeza que la mayor parte de esta actividad se circunscribe al valle central de la cuenca. También es posible indicar que prácticamente todas las subcuencas del río Maule aportan con recursos hídricos al riego, sin embargo, las únicas cuencas que aparecen libres de cultivos sobre su superficie son las subcuencas 0730 y 0731.

La **Figura 5.7** permite observar que la mayor parte del bosque nativo (renoval) de la cuenca se encuentra a los pies de la cordillera de Los Andes, con una aparente tendencia al retroceso debido a las plantaciones forestales que ocupan terrenos precordilleranos. Al mismo tiempo, se aprecia una gran extensión de superficies de la cuenca dedicadas a plantaciones (monocultivos forestales), de terrenos recién cosechados o plantados recientemente. La extensión de estos terrenos sería similar al terreno dedicado al riego, como se pude ver en las cifras indicadas en el **Capítulo 4.3.1** (ver superficies en **Tabla 4.7** y **Tabla 4.8**), lo cual coincide con lo que se aprecia en la **Figura 5.7**.

Hacia la desembocadura del río Maule y cordillera de la Costa se observa un equilibrio relativo entre plantaciones y terrenos recién cosechados o plantados recientemente, con parches o terrenos aislados de renovales (nativos) o bosque nativo mezclado con especies exóticas. Hacia la cordillera se observan más plantaciones que terrenos recién cosechados o recientemente plantados, lo que indicaría que la producción en la zona precordillerana podría ser más reciente.

Se ha incluido en la **Figura 5.8** la ubicación de los acuíferos empleados en la modelación hidrológica y operacional realizada en el Plan Director del Maule [DGA, 2008]. Esto permite observar que existe una relación importante entre la presencia de acuíferos y las zonas de

riego de la cuenca. Si se consideran los antecedentes de técnicas de riego que se emplean en la región, indicadas en el **Capítulo 4.3.1**, entonces es posible establecer una relación directa entre la recarga y niveles de los acuíferos, respecto a la actividad agrícola. Con el potencial de mejora en las técnicas de riego que posee la región, es posible estimar una reducción considerable de la recarga de los acuíferos en el futuro.

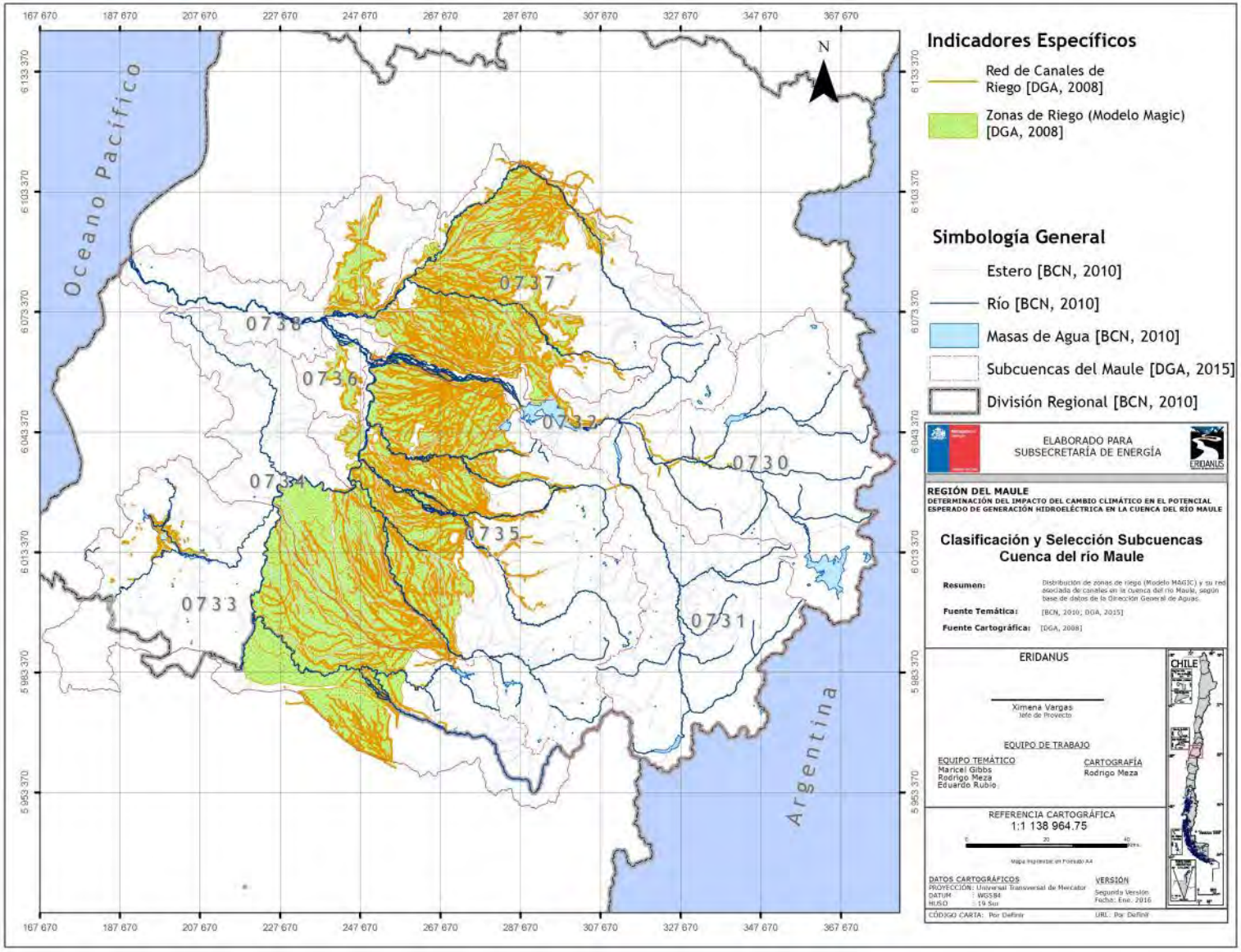


Figura 5.6. Red de canales y zonas de riego en la cuenca del río Maule. Fuente: Elaboración propia.

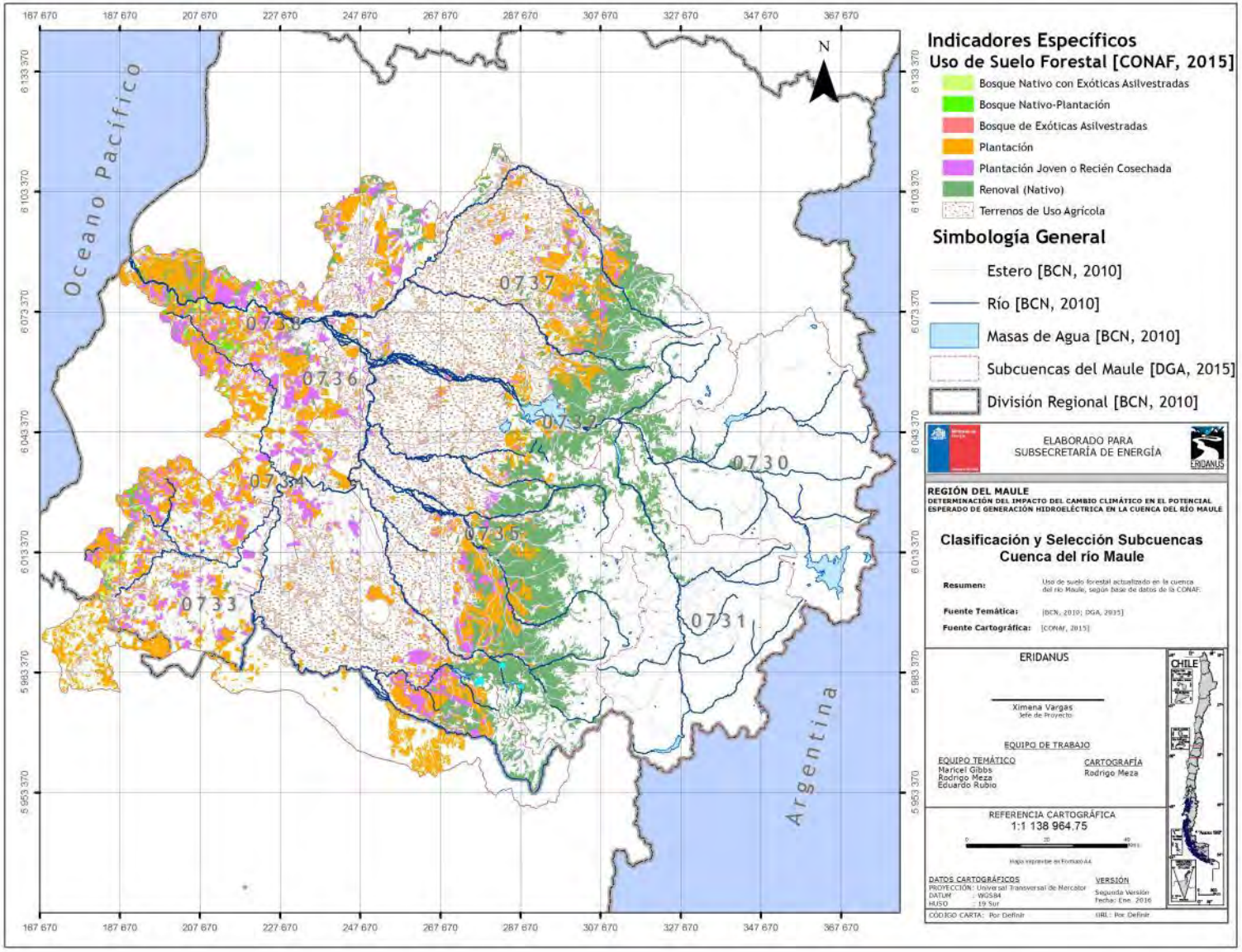


Figura 5.7. Uso de suelo forestal en la cuenca del río Maule. Fuente: Elaboración propia.

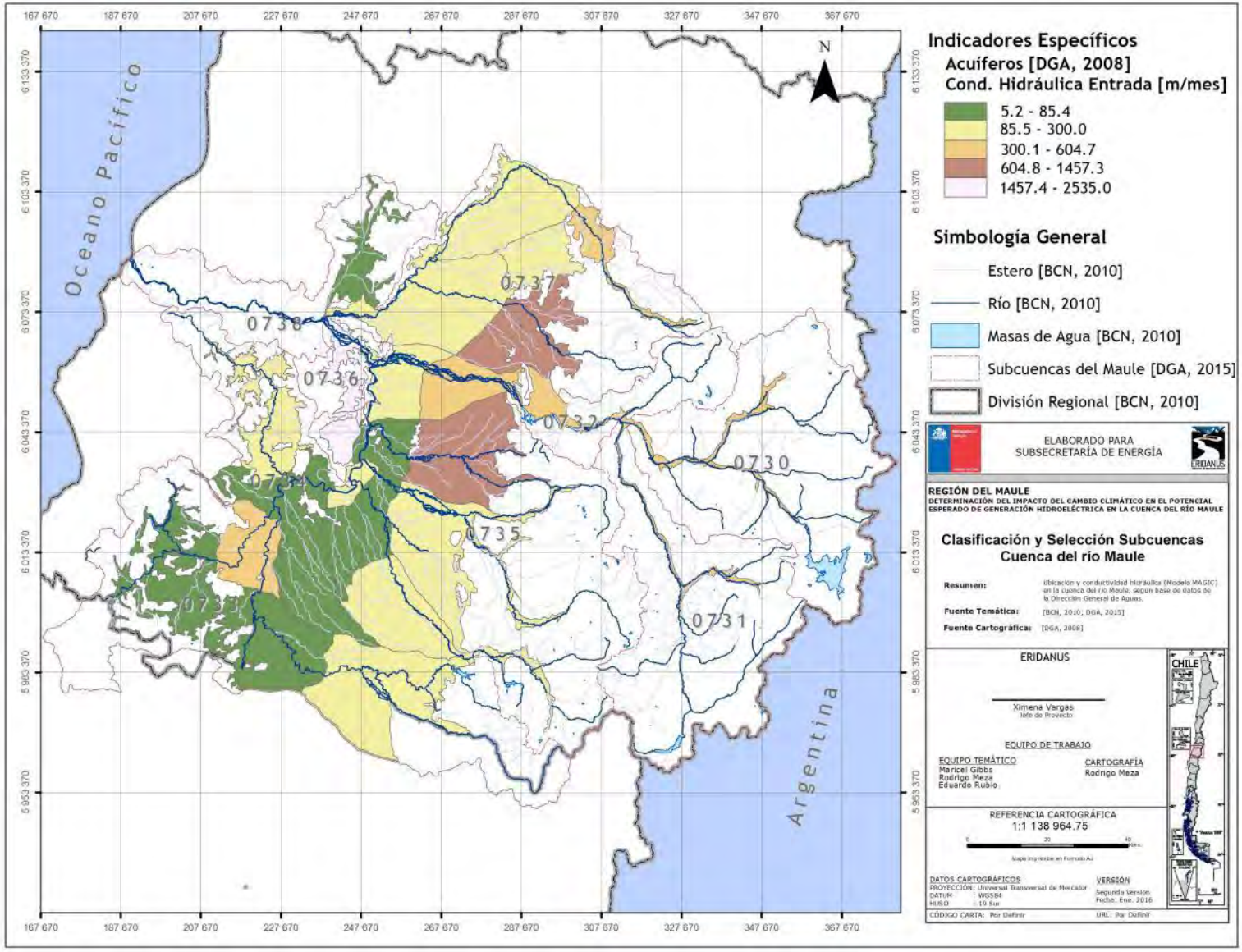


Figura 5.8. Ubicación de los acuíferos y conductividades hidráulicas de entrada del modelo Magic. Fuente: Elaboración propia.

5.3 Producción Hidroeléctrica

En el **Capítulo 4.3.2** se presentó la capacidad hidroeléctrica instalada, tanto de centrales convencionales de pasada y embalse (ver **Tabla 4.13)**, como de centrales clasificadas como ERNC (ver **Tabla 4.14**). La recopilación de esta información utilizó diversas fuentes de información, debido a la ausencia de registros consolidados que incluyan la ubicación exacta junto con la potencia bruta y el caudal de diseño.

En la **Figura 5.9** se presenta la capacidad instalada total (convencional y ERNC), diferenciando por rangos de potencia para analizar la ubicación de los centros de generación más importantes de la cuenca del río Maule. Así, es posible ver que la mayor potencia instalada de generación hidroeléctrica se encuentra en las subcuencas 0730, 0731 y 0732. La subcuenca 0737 está cobrando relevancia en la actualidad, en el espectro de potencias menores a los 25 MW. En base a la capacidad instalada actual, es posible constatar que la principal fuente hídrica de generación hidroeléctrica se produce en las subcuencas de cabeceras del río Maule, lo cual es consistente con la realidad del resto del país.

Otra fuente de información relevante es el potencial hidroeléctrico existente (no explotado), lo cual se presenta en la **Figura 5.10**. Como se aprecia, las subcuencas de cabecera 0730 y 0731 presentan el mayor potencial actual de la cuenca del Maule, seguidas por la subcuenca 0735, que actualmente presenta un bajo desarrollo hidroeléctrico. Por su parte, la subcuenca 0737 presenta un perfil orientado al desarrollo de ERNC (mini-hidro), como también se aprecia en la **Figura 5.9**. La subcuenca 0732 posee una superficie menor respecto a las anteriormente señaladas, sin embargo, presenta un potencial elevado, considerando su área total.

Como se indicó en el **Capítulo 4.3.2**, existen al menos 4 proyectos en construcción y otros dos proyectos en estudio, con lo cual se tiene un total de 6 proyectos que aún no forman parte de la capacidad instalada, por lo que se pueden denominar ***Proyectos Futuros***, de los cuales no se tiene una ubicación oficial. Para suplir esto, se utiliza la base de datos georeferenciada de ***Proyectos Futuros*** de energía que presenta DGA [2008] en el "Plan director para la gestión de los recursos hídricos cuenca del río Maule", lo cual se muestran en la **Figura 5.11** junto con la capacidad hidroeléctrica instalada.

Como se puede ver, algunos de los proyectos proyectados en 2008 se encuentran operativos y cercanos al emplazamiento proyectado originalmente (Lircay y San Clemente). En el caso de Los Cóndores no se encontró la ubicación en la cual se está construyendo, pero en el caso de la central Ojos de Agua se puede constatar que se encuentra junto a la central Cipreses, es decir, aguas abajo del emplazamiento proyectado originalmente en [DGA, 2008]. Estos antecedentes dan cuenta de los cambios que se producen entre la proyección inicial y su desarrollo final, por lo cual se considera adecuado utilizar el potencial hidroeléctrico existente como una fuente de información confiable para evaluar la idoneidad de las subcuencas a modelar.

Por ejemplo, es posible observar en la **Figura 5.11** que las centrales Los Hierros y Los Hierros 2 se ubican aproximadamente donde estaba proyectado Melado Bajo, mientras que

Travesía, Melado Alto y Guaiquivilo estarían en el área de influencia del proyecto Guaiquivilo-Melado que actualmente está evaluando Colbún[6].

Cabe señalar que la compleja red de generación hidroeléctrica del Maule Alto se encuentra proyectada al menos desde 1980, cuando solo se habían construido Cipreses e Isla (ver años de puesta en marcha en **Tabla 4.13**). En la **Figura 5.12** se muestra la proyección de esta red presentada por Edwards [1980], donde se puede apreciar, por ejemplo, que Pehuenche (1991), Colbún (1985) y Machicura (1985) se proyectaban en los mismos puntos donde fueron finalmente construidas. Inclusive, de acuerdo a lo señalado por DGA [2008], la central Los Cóndores se ubicaría aproximadamente en el mismo punto proyectado hace 25 años. Pese a esto, también es posible comprobar que el desarrollo del río Melado no ha avanzado hasta la fecha, pese a que su potencial se conoce hace décadas, lo cual reafirma que la información más consistente se encuentra en el potencial hidroeléctrico existente.

[6] Fuente: http://www.colbun.cl/declaracion-de-colbun-frente-a-proyecto-guaiquivilo-melado-2/

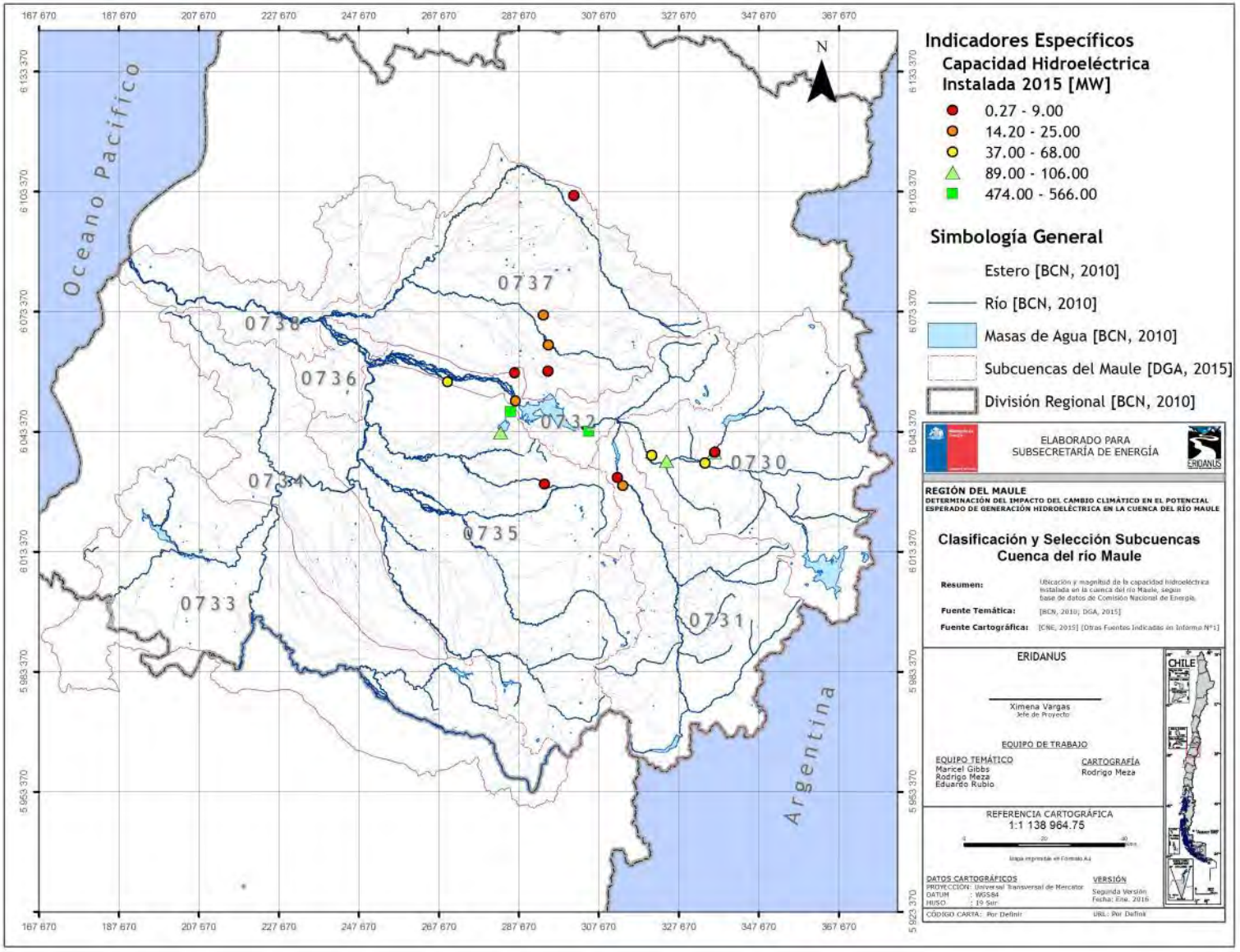


Figura 5.9. Capacidad hidroeléctrica instalada en la cuenca del río Maule. Fuente: Elaboración propia.

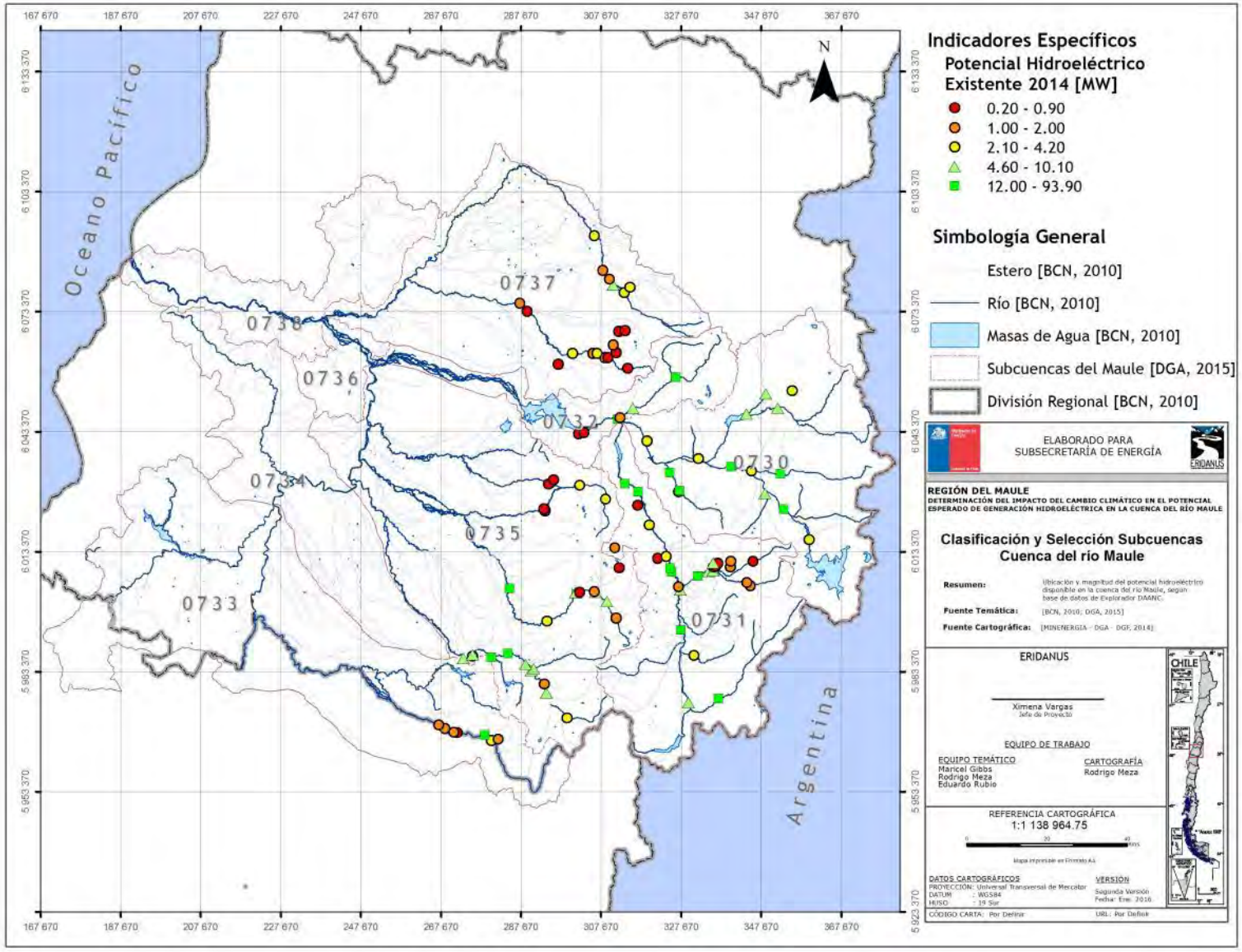


Figura 5.10. Potencial hidroeléctrico existente en la cuenca del río Maule. Fuente: Elaboración propia.

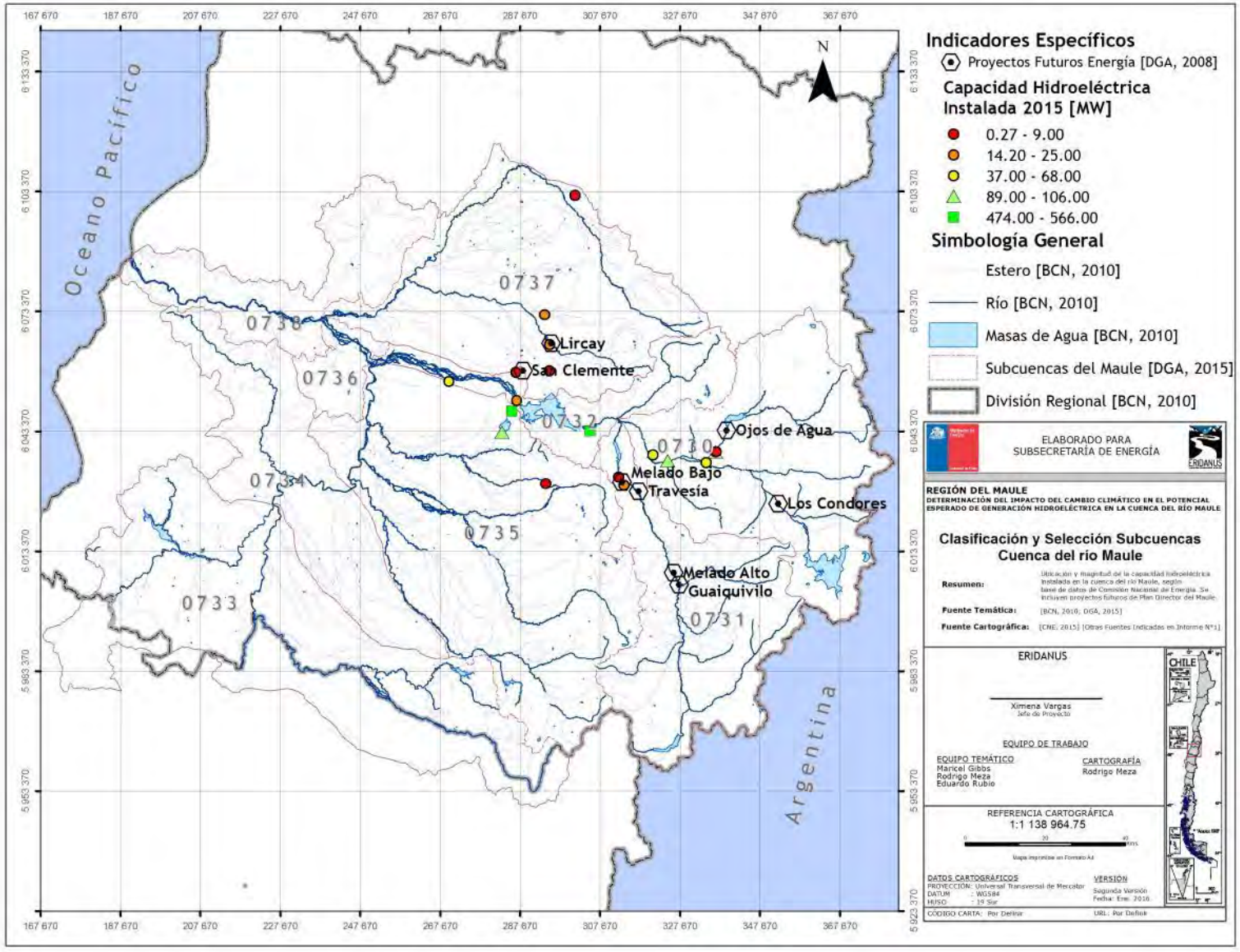


Figura 5.11. Capacidad hidroeléctrica instalada y proyectos futuros en la cuenca del río Maule. Fuente: Elaboración propia.

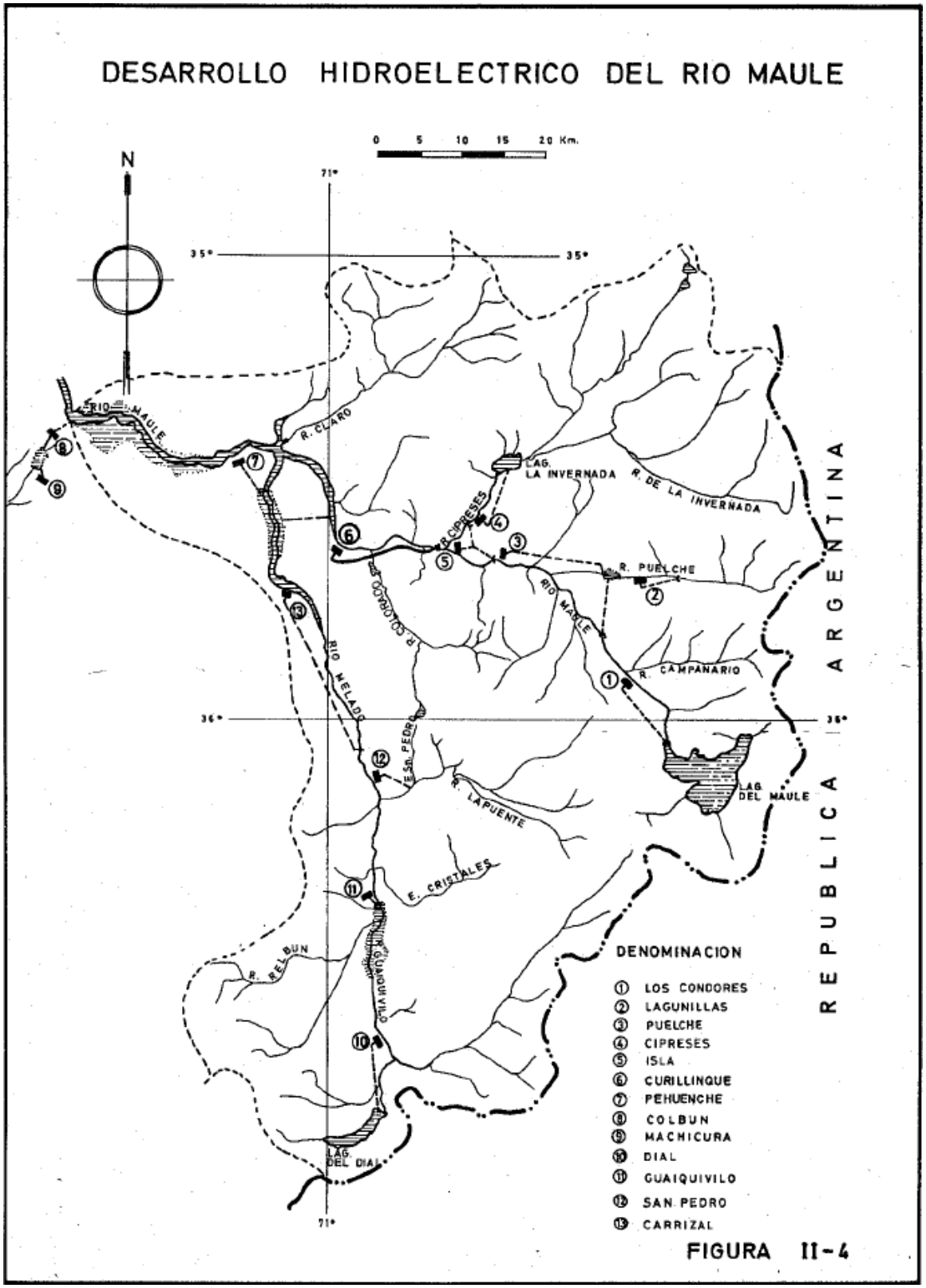


Figura 5.12. Desarrollo hidroeléctrico del río Maule, proyectado en 1980. Fuente: [Edwards, 1980].

5.4 Turismo

El estudio "Plan director para la gestión de los recursos hídricos cuenca del río Maule" [DGA, 2008] presentó una base de datos georeferenciada de distintas actividades turísticas que se realizan en diversos puntos de la cuenca. En la **Figura 5.13** se resaltan las actividades consideradas como afines al uso de recursos hídricos (pesca, rafting y termas), así como aquellas que pueden ser asociadas al paisajismo (cabalgata, camping y excursión). Esta información ha sido cruzada con las áreas del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE), ubicadas en las subcuencas 0735 y 0737, siendo también relevante la información de los sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad, los cuales se ubican principalmente en la zona precordillerana y cuencas de cabecera del río Maule.

Como se aprecia, existe una relación espacial entre las diversas actividades turísticas destacadas y los sitios prioritarios ubicados en la cuenca, con una importante presencia del excursionismo y camping, lo cual se relaciona con el uso paisajista de zonas con características naturales destacadas. La cabalgata parece estar ampliamente distribuida en la región, lo cual es consistente con la producción ganadera de caballares que se destaca en el **Capítulo 4.3.1**. Finalmente, desde el punto de vista del uso directo de recursos hídricos, las termas y la pesca también presentan varios puntos en la cuenca, mientras que el rafting aparece solo en tres lugares de la región, asociados a zonas precordilleranas y cordilleranas que presentan condiciones de pendiente adecuados para practicar este deporte.

En general, se puede concluir que las zonas precordilleranas presentan los atributos turísticos más difundidos, en particular las subcuencas 0732, 0735 y 0737. En segundo lugar destacan las subcuencas de cabecera 0730 y 0731 como áreas relevantes para el turismo.

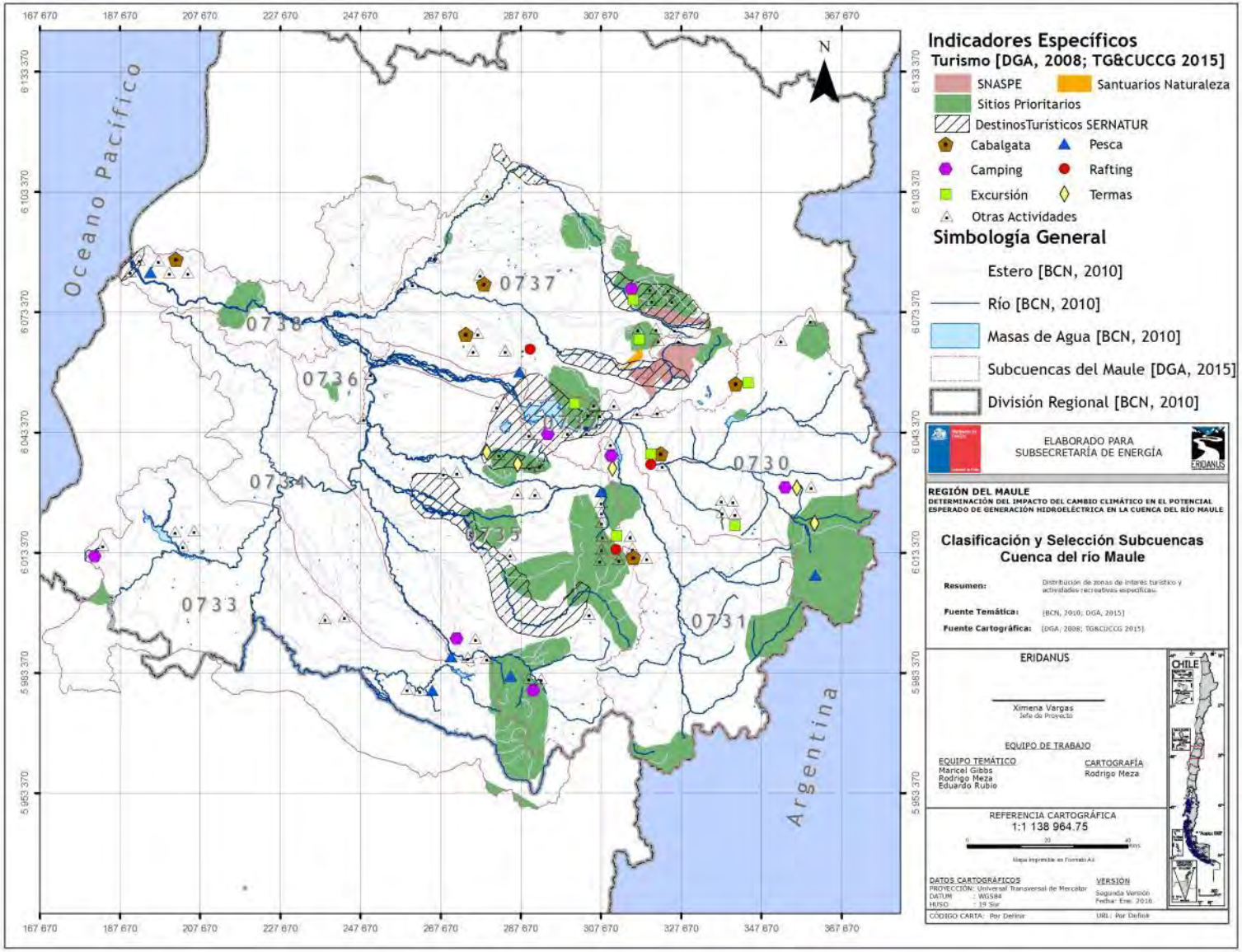


Figura 5.13. Actividades turísticas y zonas de interés en la cuenca del río Maule. Fuente: Elaboración propia.

5.5 Usos Domiciliarios

Como se indicó en el **Capítulo 4.3**, el agua potable no representa una demanda de agua relevante en la cuenca, sin embargo, fue posible determinar la ubicación de las plantas de tratamiento de aguas servidas (AS), lo cual da cuenta de la presencia de los principales centros urbanos de la región, indicando de forma indirecta donde se encuentra ubicada la mayor población al interior de la cuenca. Esta información se muestra en la **Figura 5.14**, donde adicionalmente se indican los ***Proyectos Futuros*** de Agua Potable Rural (APR), indicando de forma indirecta parte de los principales poblados rurales de la cuenca.

No fue posible encontrar información espacial sobre la actividad industrial en general, sin embargo, es posible indicar que esta se encuentra en torno a los centros de producción agrícola y forestal, así como en torno a los centros urbanos más importantes. En efecto, las comunas que poseen el mayor porcentaje de participación en el empleo industrial son Talca, Curicó y Linares [ASICENT, 2013], todas ubicadas en el valle central de la cuenca.

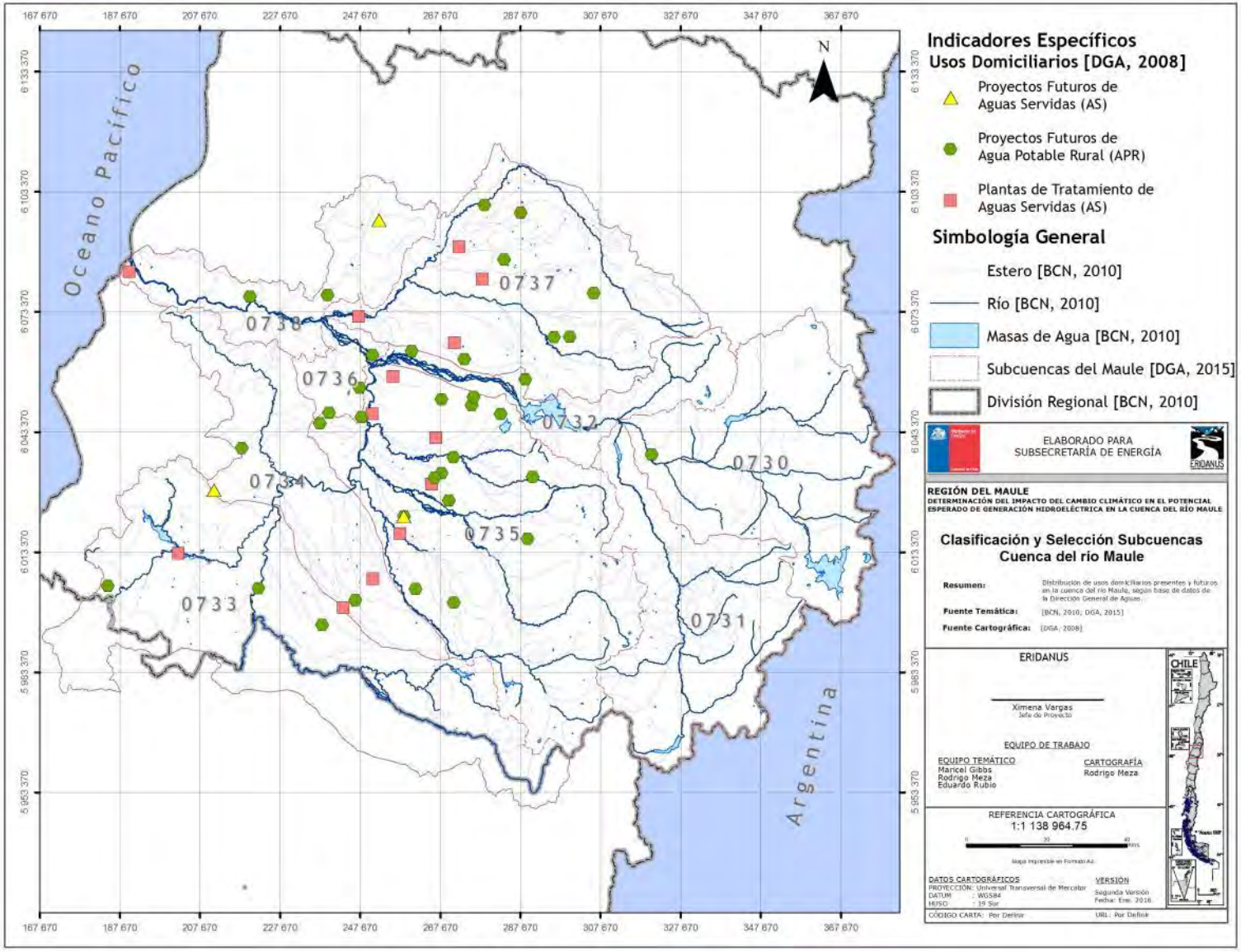


Figura 5.14. Tratamiento de aguas servidas y proyectos futuros de agua potable rural en la cuenca del río Maule. Fuente: Elaboración propia.

5.6 Subcuencas Seleccionadas

Para realizar la selección de las subcuencas definitivas de este estudio se han tenido presente los siguientes criterios, por orden de prioridad:

i. Las subcuencas deben ser relevantes desde la perspectiva de la producción hidroeléctrica, con el fin de que el análisis de la disponibilidad hídrica presente y futura pueda ser relacionada con su generación de energía.

ii. Para realizar la modelación y análisis de los impactos del cambio climático en la disponibilidad hídrica se necesita que las cuencas posean el menor grado de intervención humana posible y/o con alteraciones conocidas a los regímenes de caudales.

iii. Se requiere que exista información hidrometeorológica en las subcuencas a seleccionar o bien que existan métodos indirectos de estimación que aporten información adecuada.

En base a los criterios anteriores, se concentró la búsqueda de sistemas idóneos en las subcuencas 0730, 0731 y 0732, debido al bajo nivel de intervención silvoagropecuaria que presentan respecto al resto de la cuenca del río Maule, así como a su importancia desde el punto de vista de la generación hidroeléctrica.

Cabe señalar que se requiere un bajo nivel de intervención silvoagropecuaria porque la variabilidad espacial y temporal de los cultivos agrícolas y forestales es elevada y no logra ser capturada mediante los censos realizados por el INE cada 10 años, siendo necesario para esto realizar estudios específicos y enfocados en restituir los consumos históricos de agua (activos y pasivos) que se generan debido a la actividad del sector silvoagropecuario.

Por otra parte, el análisis espacial de información hidrometeorológica mostró una baja densidad de información en las subcuencas propuestas, lo cual representa una limitación para la modelación en el área. La única estación oficial (DGA) identificada con estadística mayor a 30 años es Maule en Armerillo, la cual posee un registro de régimen intervenido de los caudales, considerando que parte de las aguas del río Maule y del río Melado son restituidas aguas abajo de esta estación. También se aprecia un déficit importante de información de precipitaciones y temperaturas en las zonas altas de las subcuencas de interés, lo cual dificulta la modelación de los procesos de acumulación de nieve, derretimiento y escorrentía.

Considerando lo anterior, se analizó como segundo sistema candidato la subcuenca 0737, aguas arriba de las estaciones fluviométricas con más de 30 años de registro (ver estaciones en **Figura 5.2**). Si bien se aprecia un grado de intervención mayor que en el caso anterior, debido a la producción silvoagropecuaria, posee mejor nivel de información hidrometeorológica. Sin embargo, tanto su capacidad instalada como su potencial hidroeléctrico no son relevantes respecto a las subcuencas 0730, 0731 y 0732, lo cual agrega complejidad al estudio del impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica de la cuenca del río Maule. Siendo éste el principal objetivo del presente

estudio, no se estimó conveniente sustituir las subcuencas 0730, 0731 y 0732 mediante el uso de la subcuenca 0737.

La falta de información en las subcuencas 0730, 0731 y 0732 fue abordado en [CEPAL, 2009b], donde se generaron series sintéticas que permitieron obtener un gradiente de variación de la precipitación con la altura. Los datos de temperatura también fueron completados, lo cual permitió obtener gradientes de variación de la temperatura con la altura. Respecto a la información fluviométrica, se utilizaron series entregadas por el CDEC SIC, provenientes de sus estadísticas de operaciones de las centrales de pasada que operan en las subcuencas 0730 y 0731. En conjunto, esta reconstrucción climática y fluviométrica generó buenos resultados, permitiendo a su vez obtener correlaciones aceptables con la generación hidroeléctrica de la cuenca, como se puede ver en [CEPAL, 2009a]. Considerando esta experiencia previa y los resultados obtenidos, tanto en el modelo hidrológico como de generación hidroeléctrica, se recomienda utilizar los mismos sistemas modelados en dicha oportunidad, los cuales se muestran en la **Figura 5.15**, donde se aprecia su ubicación dentro de las subcuencas 0730 y 0731.

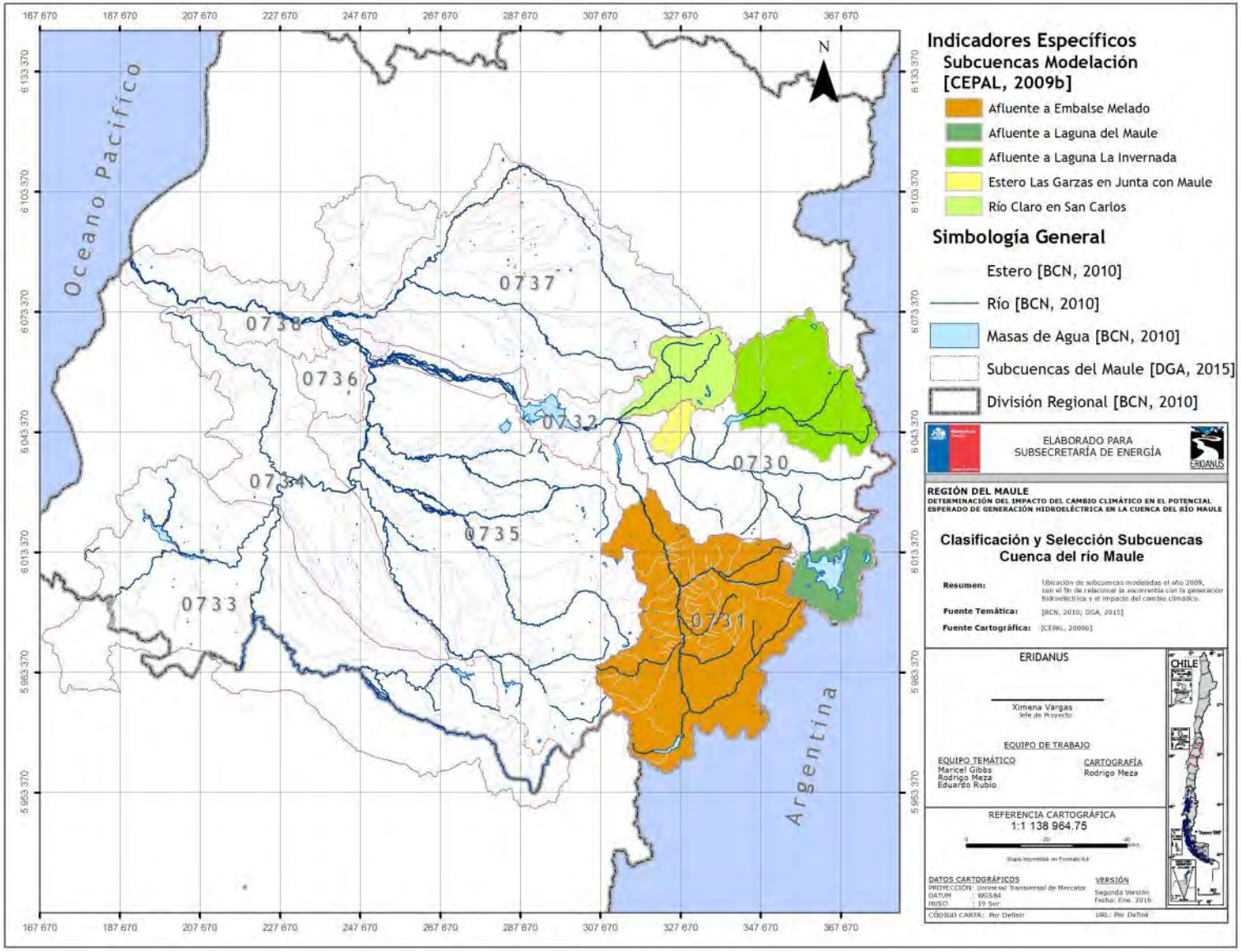


Figura 5.15. Subcuencas modeladas hidrológicamente el año 2009 en la cuenca del río Maule. Fuente: Elaboración propia.

6 RECOPILACIÓN Y PROCESAMIENTO DE ANTECEDENTES

Una vez definida la zona de estudio en el **Capítulo 5**, se presenta a continuación la recopilación y procesamiento de los antecedentes necesarios para realizar la modelación hidrológica y la posterior evaluación de impactos del cambio climático en la generación hidroeléctrica.

6.1 Ubicación de la Zona de Estudio

La zona de estudio ha sido definida en el **Acápite 5.6** y está compuesta de 5 subcuencas, las cuales se presentan en la **Figura 5.15**, en el contexto de la cuenca completa del río Maule. En la **Figura 6.1** se presenta un acercamiento de la zona, denominada en adelante Maule Alto, donde se destacan las subcuencas en estudio. El nombre de las subcuencas proviene de la información fluviométrica disponible, la cual se presenta más adelante en el **Acápite 6.3.1**.

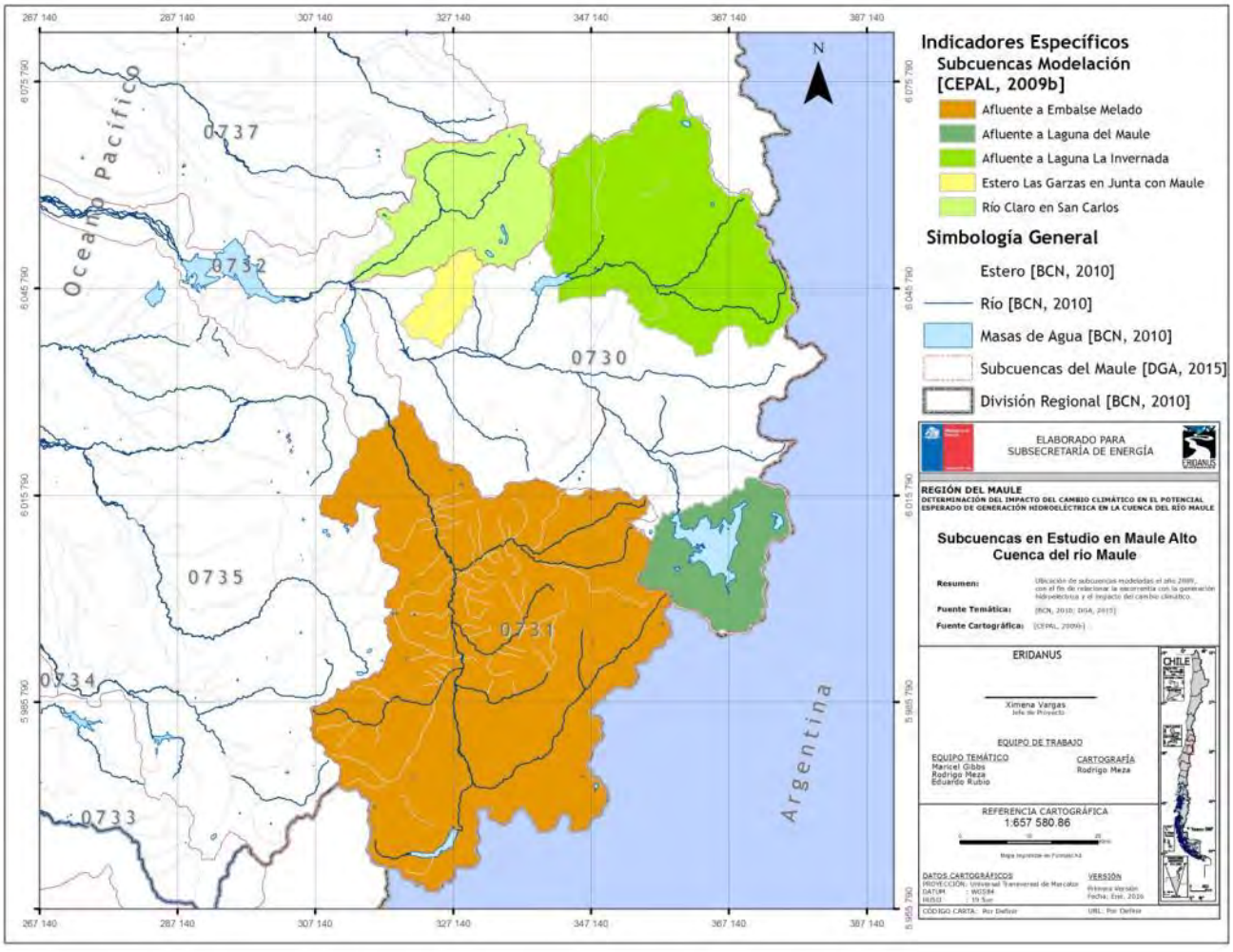


Figura 6.1. Subcuencas que serán modeladas en la zona de Maule Alto. Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de facilitar su referencia durante el desarrollo del informe, en la **Tabla 6.1** se indican las abreviaciones que se emplearán en cada caso, junto con las coordenadas de los puntos de salida. En la **Tabla 6.2** se presentan el área y las elevaciones características de cada subcuenca.

Tabla 6.1. Nombre completo de subcuencas en estudio, abreviación y coordenadas UTM de los puntos de salida. Fuente: Elaboración propia.

Subcuencas en Estudio	Abreviación	UTM Norte	UTM Este	Datum
Afluente a Embalse Melado	Melado	6.026.602	317.731	WGS84
Afluente a Laguna del Maule	Maule	6.013.475	359.722	WGS84
Afluente a Laguna La Invernada	Invernada	6.046.476	341.918	WGS84
Estero Las Garzas en junta con río Maule	Garzas	6.040.747	319.359	WGS84
Río Claro en San Carlos	Claro	6.046.835	312.599	WGS84

Tabla 6.2. Área y elevaciones características de las subcuencas en estudio. Fuente: Elaboración propia.

Sistema	Área Total [km^2]	Cota Inferior [msnm]	Cota Superior [msnm]	Cota 50% Area [msnm]
Melado	2.128	719	3.306	2.007
Invernada	827	1.285	3.936	2.552
Maule*	308	2.121	3.153	2.407
Claro	402	512	3.901	1.964
Garzas	84	622	2.809	1.431

*Esta área incluye la superficie de laguna del Maule

6.2 Hipsometría y Bandas de Elevación

La hipsometría corresponde a una característica morfológica básica de la cuenca pues permite relacionar las elevaciones del terreno en función de las superficies correspondientes a dichas elevaciones. Esta relación entre la altura (o altura relativa) y la superficie asociada a dicha elevación se le conoce como la curva hipsométrica o curva de área-elevación del sistema en cuestión, la cual se ejemplifica en la **Figura 6.2**. La construcción de una curva hipsométrica permite, entre otras cosas:

- Caracterizar el relieve y estudiar su influencia sobre la respuesta hidrológica de una cuenca.
- Evaluar el nivel de erosión y el grado de equilibrio dinámico de la cuenca [Strahler, 1964; citado por Mardones *et al.*, 2007].

En la **Figura 6.3** se presentan las curvas hipsométricas de las subcuencas en estudio, obtenidas a partir de Modelos de Elevación Digital (DEM) de la USGS, donde se pueden observar características de ríos viejos en las cabeceras y de ríos jóvenes en los puntos de salida, salvo por Maule, que posee la curva hipsométrica de un río viejo. Esto muestra los importantes procesos de erosión que han experimentado las subcuencas, sobre todo en las zonas altas.

A partir de las curvas hipsométricas obtenidas, es posible analizar la desagregación espacial más conveniente para cada subcuenca, con el fin de capturar en forma adecuada los fenómenos hidrológicos más relevantes para la zona. Para este caso se decidió dividir el sistema en bandas de elevación, considerando las elevaciones mínimas y máximas de las subcuencas (ver **Tabla 6.2**). La subdivisión de los sistemas en estudio en bandas de elevación debe ser propuesta de tal modo que los procesos hidrológicos que ocurran dentro de cada una de las bandas sean también similares.

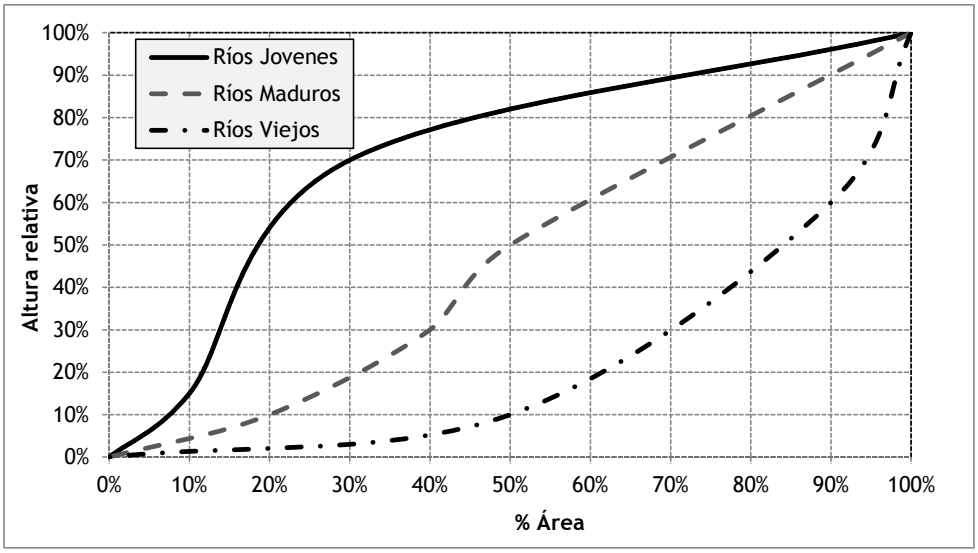


Figura 6.2: Curva hipsométrica según edad del río. Fuente: [Llamas, 1993].

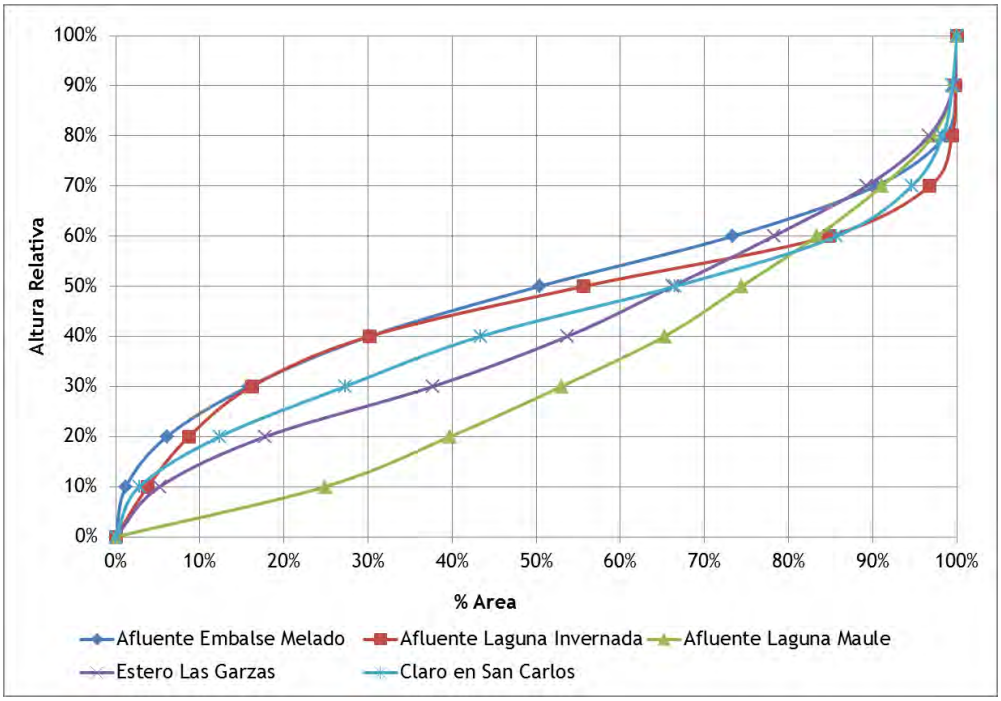


Figura 6.3. Curvas Hipsométricas de las subcuencas en estudio. Fuente: Elaboración propia.

Se han utilizado diversas fuentes de información para estudiar los distintos procesos hidrológicos. En primer lugar se analiza información cartográfica de uso de suelos según CONAF [2015], CONAMA [2011] y CNR [2000]. En el **Anexo 2** se incluyen las figuras empleadas en el análisis del uso de suelos, del cual se desprende lo siguiente:

- Los distritos agroclimáticos que conforman la zona de estudio son 6 [CNR, 2000], observándose en algunas subcuencas la influencia de la orografía en su distribución. En general se observan entre 2 y 5 distritos agroclimáticos, dependiendo de la subcuenca analizada.
- Existen 3 tipos de cobertura vegetal [CONAMA, 2011] que cubren la superficie total de la zona de estudio, siendo dominante el "matorral bajo de altitud".
- Los sistemas Claro y Melado presentan los 3 tipos de vegetación, con un cierto equilibrio de dos tipos en Claro (bosque caducifolio y matorral bajo de altitud), en desmedro de la menor presencia de herbazal de altitud, el cual se encuentra concentrado en las mayores cumbres de la subcuenca. En el caso de Melado, se observa un claro predominio del matorral bajo de altitud, con presencia menor de bosque caducifolio en la zona baja de la salida de la cuenca y herbazal de altitud en puntos aislados en altura.
- Garzas presenta un predominio de bosque caducifolio, con presencia de matorral bajo de altitud en la zona alta de la cuenca.
- Finalmente, Invernada y Maule presentan una distribución similar de matorral bajo de altitud (dominante) y herbazal de altitud.
- La información de [CONAF, 2015] permite observar una importante heterogeneidad del uso de suelos, indicando además que todos los sistemas son diferentes entre sí, a diferencia de las similitudes encontradas a partir de CNR [2000] y CONAMA [2011].
- En la información de coberturas de CONAF [2015] no se observan patrones relacionados con la elevación, lo cual no permite relacionar esta información con el método de bandas de elevación. Sin embargo, es posible establecer la presencia de cierto número de usos de suelo dominantes en cada caso, con el fin de dar una medida de la heterogeneidad de cada sistema.
- La información de coberturas de CONAF [2015] presenta una mayor heterogeneidad de uso de suelos en la misma superficie que CONAMA [2011] asocia a bosque caducifolio. Los otros usos de suelo reportados por CONAMA [2011] no muestran una relación clara con los usos reportados por CONAF [2015], siendo esto más evidente en los casos de Melado y Maule.

Otra fuente de información empleada para la definición de la desagregación espacial corresponde al número de orden de los ríos, en base los ríos principales indicados en la **Figura 6.1**. En la **Tabla 6.3** se presenta el resumen de los distintos tipos de usos de suelo y del número de orden de los ríos presentes en las subcuencas en estudio.

Tabla 6.3. Resumen del análisis espacial realizado en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Subcuenca	N° de Usos de Suelo Distintos			N° Orden Río
	CNR 2000	CONAMA 2011	CONAF 2015	
Melado	3	3	7	2
Maule	2	2	4	1
Invernada	5	2	6	2
Garzas	2	2	6	1
Carlos	4	3	7	2

Finalmente, otra fuente de información utilizada se basa en el análisis de imágenes satelitales que se presenta más adelante en el **Acápite 6.3.6**. Este análisis permite estudiar el área donde se produce precipitación sólida (nieve) con mayor frecuencia. La línea de nieves se determina usualmente en base a información bibliográfica para una latitud específica. En este caso fue posible estimarla de forma precisa para cada subcuenca a partir de la información proveniente de imágenes satelitales Landsat.

Considerando la disponibilidad de información histórica observada de imágenes satelitales, se optó por privilegiar esta fuente de información como criterio para decidir acerca de la distribución final de las bandas de elevación. El número de bandas se ha estimado en base a la heterogeneidad obtenida a partir de CONAF [2015].

Como se indica en la **Tabla 6.2**, la elevación del 50% del área (elevación media) se ubica sobre los 1.500 [msnm] en todas las subcuencas, salvo en Garzas, por lo tanto, se tiene que la acumulación y derretimiento de nieve es uno de los procesos hidrológicos más relevantes dentro de las subcuencas de estudio. La desagregación espacial de las subcuencas debe ser tal que permita capturar este proceso mediante la modelación hidrológica. De esta forma, para cada subcuenca se definió un área de influencia netamente nival y un área nivo-pluvial (áreas sobre y bajo la línea de nieves, respectivamente), mientras que el número total de bandas se definió en base a: la heterogenedidad del uso de suelos [CONAF, 2015] y que cada zona (nival y nivo-pluvial) posea bandas de igual área. En la **Tabla 6.4** se resumen las bandas de elevación determinadas, destacándose en negro la elevación a la cual se ha definido la ubicación de la línea de nieves en cada subcuenca, para el periodo 1985-2015 (ver más detalles en **Acápite 6.3.6**). Maule no presenta línea de nieves, pues toda la subcuenca se encuentra sobre ésta.

Tabla 6.4. Resumen de áreas y cotas estimada para cada una de las bandas en las subcuencas en estudio. Nota: Z_{INF} = Cota inferior; Z_{SUP} = Cota superior; Z_{MED} = Cota media. Fuente: Elaboración propia.

Subcuenca	Banda	Tipo Banda	Area Individual [km^2]	Area Acumulada [km^2]	Z_{INF}	Z_{SUP}	Z_{MED}
					[msnm]		
Melado	B7	Nivo-pluvial	442,8	442,8	719	1584	1152
	B6	Nivo-pluvial	442,8	885,6	1584	1900	1742
	B5	Nival	248,4	1134,0	**1900**	2045	1972
	B4	Nival	248,4	1382,4	2045	2176	2111
	B3	Nival	248,4	1630,8	2176	2321	2249
	B2	Nival	248,4	1879,3	2321	2498	2409
	B1	Nival	248,4	2127,7	2498	3306	2902
Invernada	B6	Nivo-pluvial	71,3	71,3	1285	1809	1547
	B5	Nivo-pluvial	71,3	142,6	1809	2100	1955
	B4	Nival	171,2	313,7	**2100**	2426	2263
	B3	Nival	171,2	484,9	2426	2637	2532
	B2	Nival	171,2	656,1	2637	2826	2732
	B1	Nival	171,2	827,3	2826	3937	3381
Maule	B4	Nival	76,9	76,9	2121	2225	2173
	B3	Nival	76,9	153,9	2225	2407	2316
	B2	Nival	76,9	230,8	2407	2643	2525
	B1	Nival	76,9	307,8	2643	3153	2898
Claro	B5	Nivo-pluvial	105,6	105,6	512	1505	1008
	B4	Nivo-pluvial	105,6	211,1	1505	2000	1752
	B3	Nival	63,7	274,8	**2000**	2237	2119
	B2	Nival	63,7	338,6	2237	2518	2377
	B1	Nival	63,7	402,3	2518	3901	3209
Garzas	B5	Nivo-pluvial	22,7	22,7	622	1162	892
	B4	Nivo-pluvial	22,7	45,4	1162	1508	1335
	B3	Nivo-pluvial	22,7	68,2	1508	2000	1754
	B2	Nival	7,7	75,9	**2000**	2197	2099
	B1	Nival	7,7	83,6	2197	2809	2503

6.3 Información Disponible

A continuación se resume la información disponible que es utilizada en la modelación hidrológica y posterior evaluación de impactos.

6.3.1 Fluviometría

Como se indicó en el **Acápite 5.6** la selección de las subcuencas de estudio se basa en los resultados obtenidos en CEPAL [2009a], donde la reconstrucción climática y fluviométrica permitió obtener una modelación hidrológica consistente con los caudales proporcionados por el CDEC SIC [CEPAL, 2009b], permitiendo a su vez obtener correlaciones aceptables con la generación hidroeléctrica de la cuenca [CEPAL, 2009a].

En esta oportunidad, la información fluviométrica ha sido proporcionada por CDEC SIC [2015c] para el periodo hidrológico 1960/61-2014/15, lo cual permite actualizar las relaciones entre el caudal y la generación hidroeléctrica, presentadas en el **Anexo 4**. Debido a limitaciones en la disponibilidad de información meteorológica (ver **Acápite 6.3.2**), se definió el periodo hidrológico de interés para la modelación como aquel comprendido entre los años hidrológicos 1976/77 y 2013/14. En la **Figura 6.4** se presentan los caudales medios mensuales promedio para dicho periodo, junto con su desviación estándar, donde se aprecian las diferencias en magnitud y estacionalidad de los sistemas analizados. Como se observa, Melado es la subcuenca más relevante desde el punto de vista de los caudales.

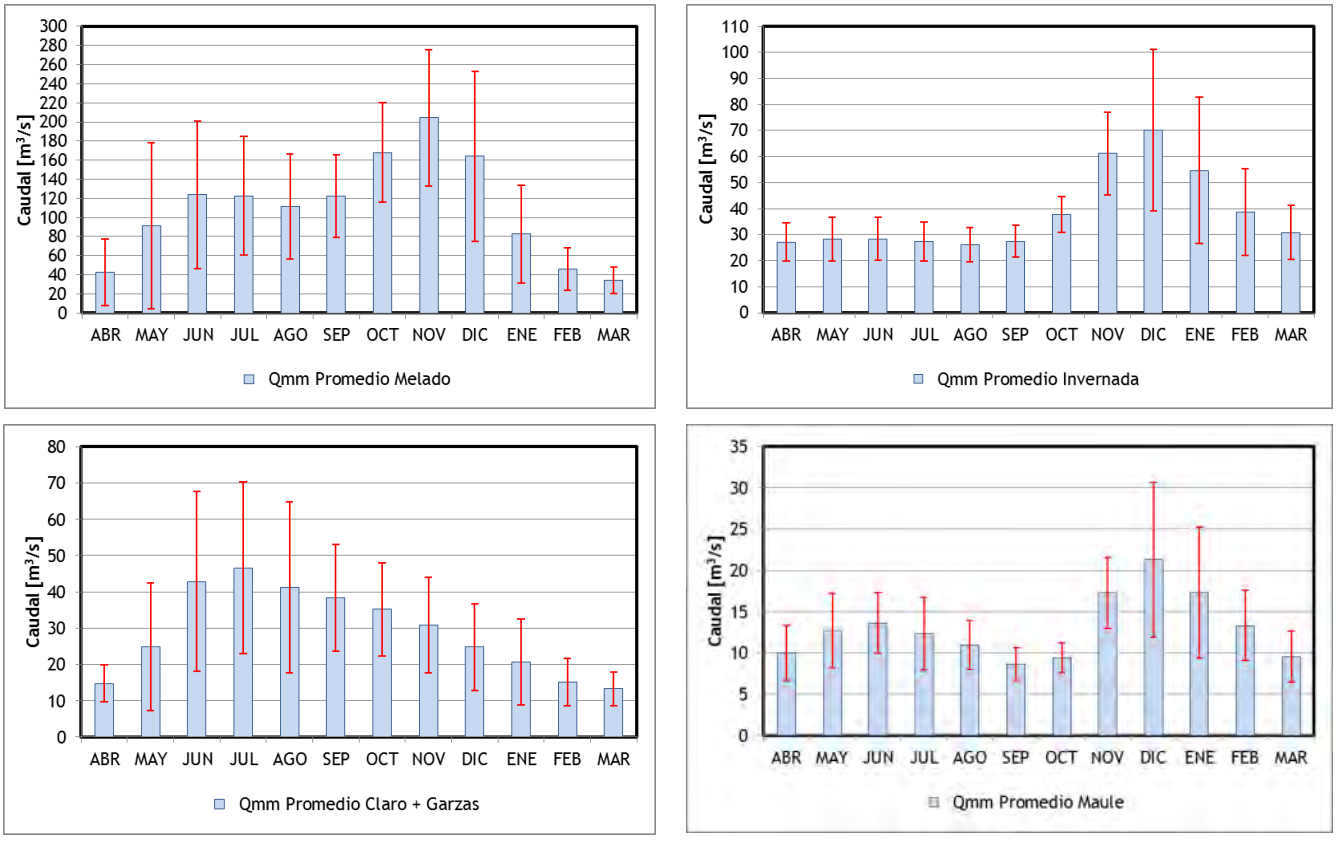


Figura 6.4. Caudales medios mensuales promedio y desviación estándar de las subcuencas en estudio, para el periodo 1976/77-2013/14. Fuente: Elaboración propia a base de CDEC SIC [2015c].

Cabe señalar que la información de Garzas y Claro se encuentra agregada en la base de datos de CDEC SIC [2015c], por lo cual su modelación hidrológica se debe realizar en forma conjunta.

En la **Tabla 6.5** se presenta un resumen de los principales estadísticos de los caudales disponibles en los puntos de salida de las cuencas, indicados previamente en la **Tabla 6.1**.

Por otra parte, resulta de interés comparar los caudales disponibles con las mediciones de precipitación y temperatura de las estaciones bases seleccionadas para la zona de estudio. La selección y la descripción de las estaciones meteorológicas se detalla en el **Acápite 6.3.2**.

Tabla 6.5. Resumen de caudales [m3/s] promedio, máximos, mínimos y desviación estándar, del periodo 1976/77-2013/14. Fuente: Elaboración propia a partir de información proporcionada por CDEC SIC [2015c].

Subcuenca	Indicador	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Melado	Promedio	42,6	91,2	123,9	122,7	111,2	122,6	168,0	204,5	164,3	82,6	45,8	34,3
	Máximo	225,0	347,0	354,0	252,0	246,8	254,6	303,0	321,0	395,8	251,4	129,9	67,0
	Mínimo	14,4	20,9	23,8	30,3	25,3	34,3	44,5	29,2	24,0	22,0	15,5	13,1
	Desv. Estándar	34,5	87,0	77,3	62,4	54,9	43,3	52,3	71,4	89,0	51,2	22,4	14,0
Invernada	Promedio	27,1	28,2	28,4	27,4	26,0	27,4	37,7	61,2	70,2	54,6	38,7	30,9
	Máximo	45,2	54,9	48,9	46,9	41,9	43,9	49,2	89,9	136,1	131,6	91,8	61,3
	Mínimo	14,1	14,0	14,6	13,9	14,5	18,4	23,0	21,9	19,1	17,3	15,8	15,1
	Desv. Estándar	7,4	8,4	8,3	7,6	6,6	6,1	6,8	15,9	30,9	28,1	16,6	10,5
Garzas + Claro	Promedio	14,8	24,9	42,9	46,6	41,1	38,4	35,2	30,8	24,9	20,7	15,1	13,3
	Máximo	28,1	79,1	107,9	107,6	139,2	72,1	62,2	65,8	58,2	51,6	38,4	27,5
	Mínimo	6,5	8,2	12,9	12,2	11,5	13,5	9,9	10,0	9,2	7,1	6,8	6,3
	Desv. Estándar	5,0	17,5	24,8	23,7	23,6	14,6	12,8	13,1	11,9	11,9	6,5	4,6
Maule	Promedio	10,0	12,8	13,6	12,3	11,0	8,6	9,4	17,2	21,3	17,3	13,3	9,5
	Máximo	20,0	24,4	20,4	21,1	16,5	12,5	13,4	23,9	36,1	43,3	32,6	18,9
	Mínimo	5,5	5,1	5,6	5,9	6,0	5,5	6,5	7,8	8,0	7,3	6,8	3,5
	Desv. Estándar	3,3	4,5	3,7	4,4	2,9	1,9	1,8	4,3	9,4	7,9	4,3	3,1

En la **Figura 6.5** se presenta la información fluviométrica histórica junto con la precipitación de la estación Armerillo y la temperatura de la estación Colorado, para el periodo 1976/77 – 2013/14. En ambos casos se incluye el indicador de la anomalía de temperatura de la superficie del mar (SST) Niño 3.4[7], lo cual permite identificar aquellos años normales, Niño o Niña. En la **Figura 6.6** se presentan las mismas series de tiempo, pero a nivel de promedios mensuales.

[7] Información descargada de: http://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/Nino34/

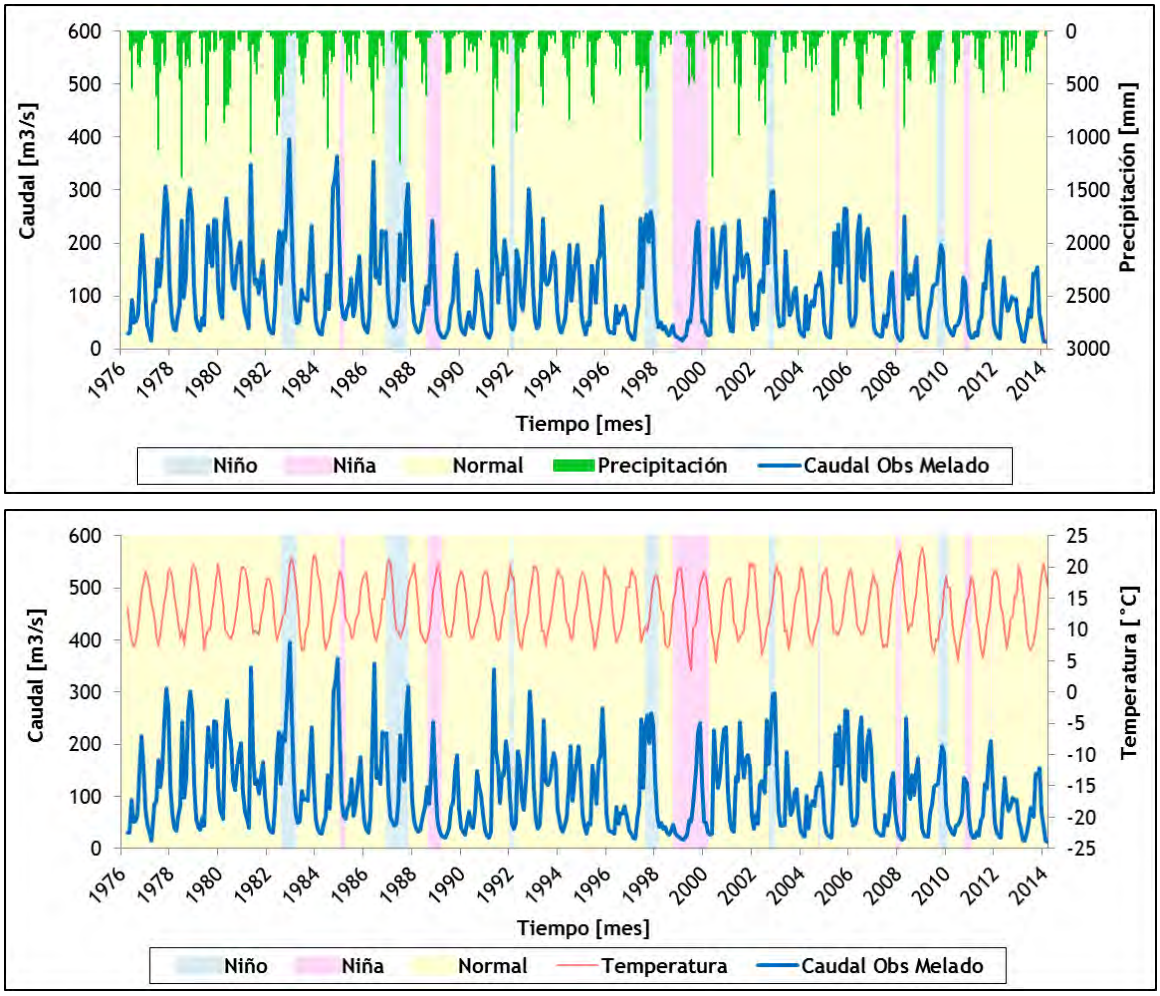


Figura 6.5. Caudales observados en Melado en el periodo 1976/77-2013/14, comparados con la precipitación registrada en Armerillo y la temperatura registrada en Colorado. Fuente: Elaboración propia.

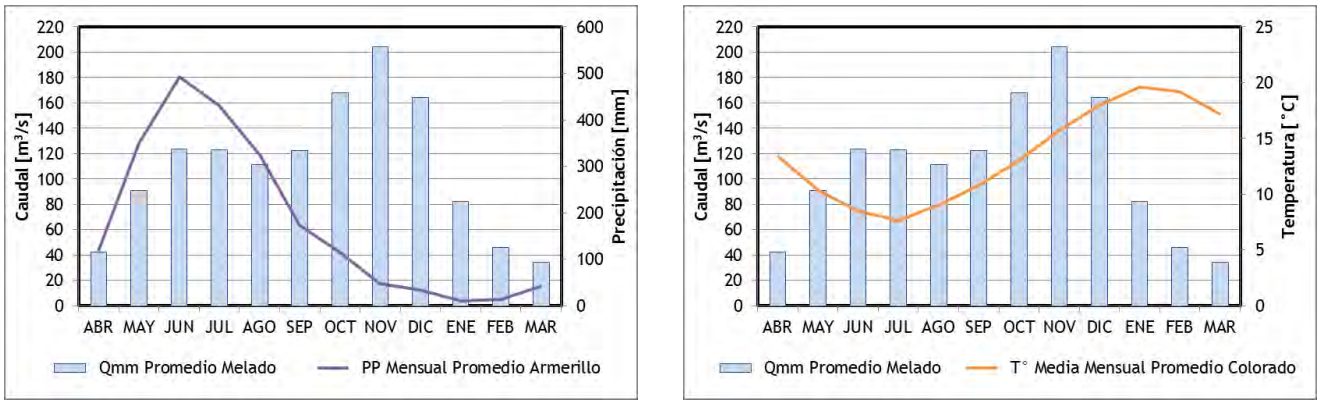


Figura 6.6. Caudales medios mensuales promedio de Melado (1976/77-2013/14), junto con precipitación mensual promedio de Armerillo y temperatura media mensual promedio de Colorado. Fuente: Elaboración Propia.

Como se observa en la **Figura 6.6**, las precipitaciones máximas se producen en invierno, mientras que los caudales máximos predominan en primavera debido al proceso de acumulación de nieve que se produce en parte importante de la cuenca (58% del área total).

No obstante, también se aprecia una componente pluvial importante que en la **Figura 6.5** se distingue por la existencia de dos máximos anuales de caudales en la mayoría de los años de registro. En algunos años domina el primer máximo (invierno o pluvial), mientras que en otros años domina el segundo máximo (primavera o deshielo). En cuanto a las temperaturas, la **Figura 6.6** muestra que las máximas se producen en promedio en enero. En relación al tipo de año, se puede destacar el evento Niña registrado entre julio de 1998 y junio de 2000, el cual podría ser responsable de facilitar la baja pluviometría registrada esos años.

En la **Figura 6.7** se muestran los mismos antecedentes históricos de precipitación y temperatura indicados previamente, junto con el caudal de Invernada. La **Figura 6.8** presenta los mismos antecedentes, pero a nivel de promedios mensuales.

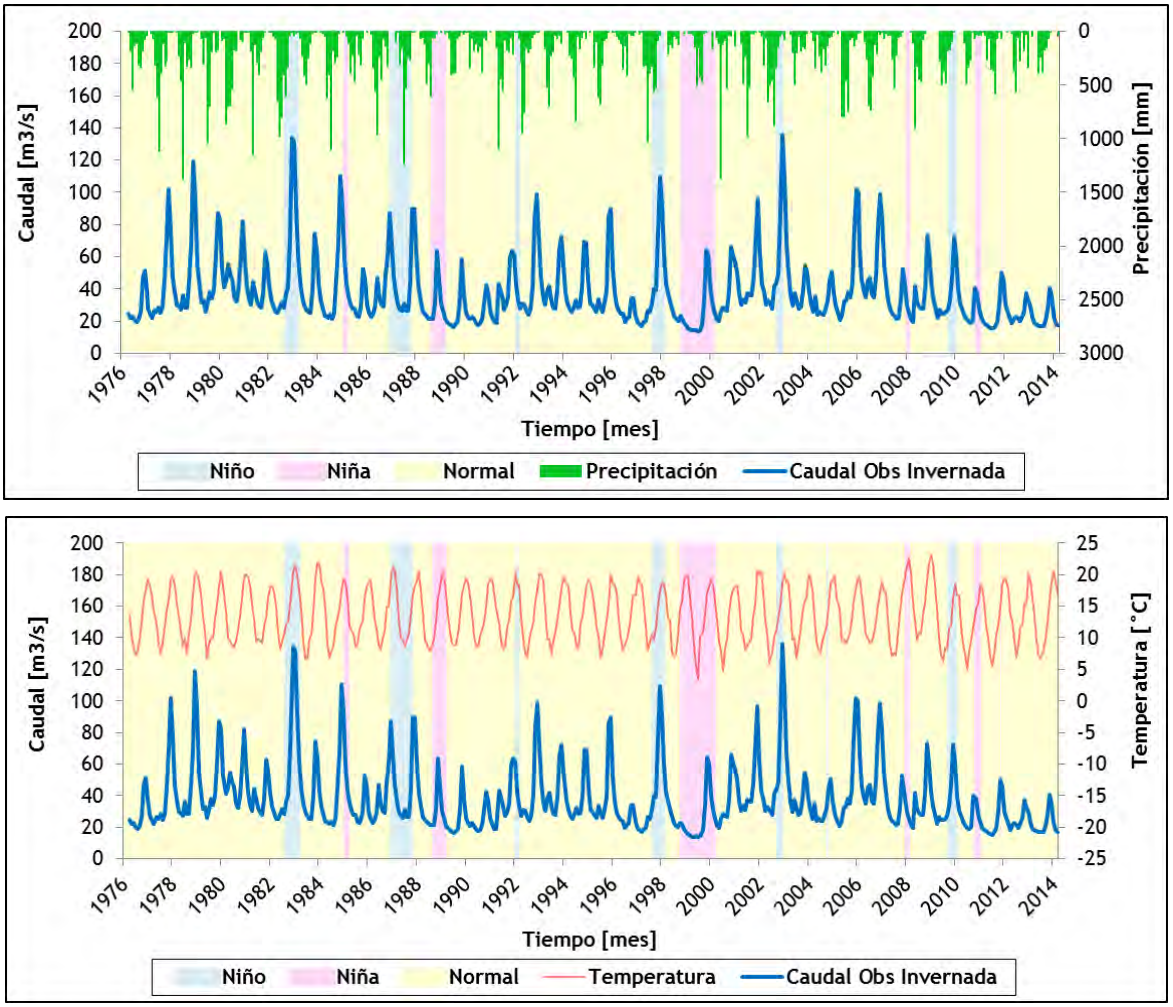


Figura 6.7. Caudales observados en Invernada en el periodo 1976/77-2013/14, comparados con la precipitación registrada en Armerillo y la temperatura registrada en Colorado. Fuente: Elaboración propia.

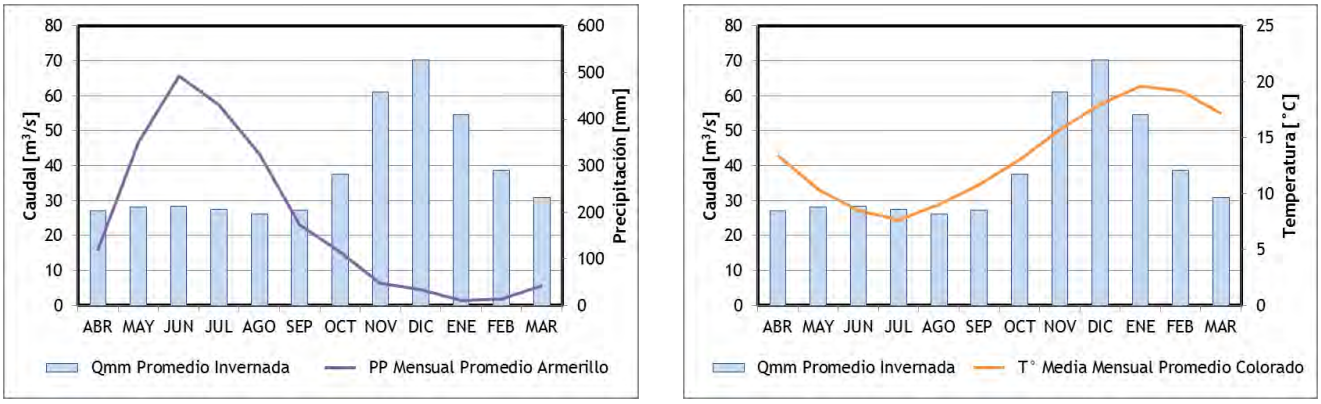


Figura 6.8. Caudales medios mensuales promedio de Invernada (1976/77-2013/14), junto con precipitación mensual promedio de Armerillo y temperatura media mensual promedio de Colorado. Fuente: Elaboración Propia.

Como se observa en ambas figuras, predomina la existencia de un solo máximo anual de caudales, el cual se produce en primavera (régimen nival). La componente pluvial se ve reflejada en forma menor al analizar en detalle las series históricas (**Figura 6.7**), observando en algunos años una leve alza del caudal en el mismo mes en que se producen las máximas precipitaciones. En el caso de Invernada, el 83% de la cuenca se encuentra sobre la línea de nieve. Al igual que en Melado, el evento Niña registrado entre julio de 1998 y junio de 2000 se relaciona con el año de menor escorrentía registrada, a causa de la escasa o nula acumulación de nieve de la temporada anterior. También se aprecia que los descensos de las precipitaciones en los últimos años implican a su vez los menores caudales (en años continuos) que se tienen en el periodo de análisis.

La **Figura 6.9** presenta el resumen de los caudales agregados históricos de Garzas y Claro, mientras que la **Figura 6.10** presenta la información a nivel medio mensual. Se aprecia el predominio de la componente pluvial, aunque en algunos años es posible observar leves aumentos de escorrentía en primavera al analizar en detalle las series históricas (**Figura 6.9**). Es esperable que estos deshielos provengan mayormente desde Claro, debido a su mayor contribución porcentual al conjunto de los caudales, junto con su importante área nival. En el caso de Claro, el 48% del área de la cuenca se encuentra sobre la línea de nieve promedio, lo cual se reduce a un 18% en el caso de Garzas. En general, los fenómenos de caudales máximos y mínimos son consistentes con lo registrado en Melado e Invernada, presentando un flujo base menos variable que en el caso de Invernada y similar a lo registrado en Melado.

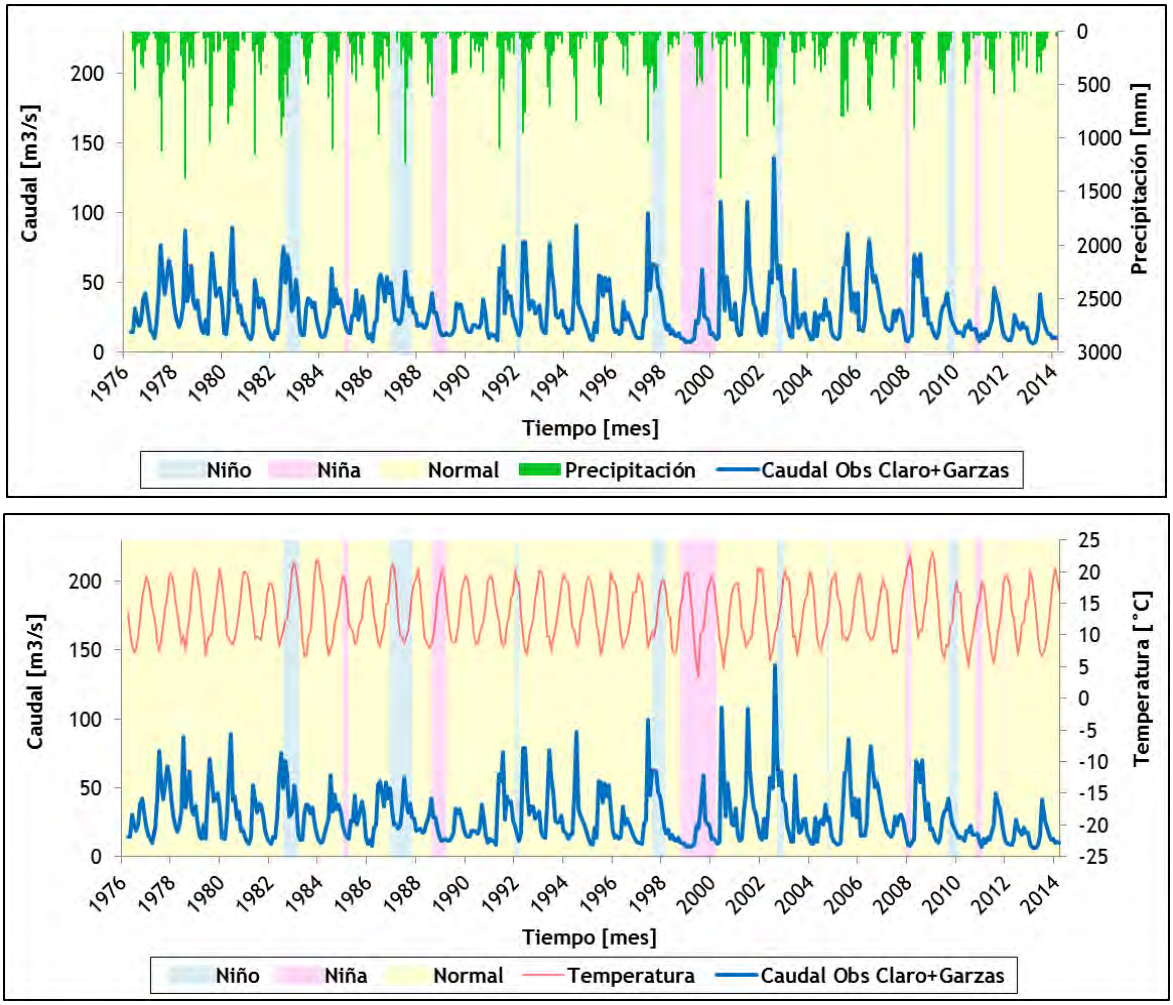


Figura 6.9. Caudales observados en Garzas + Claro en el periodo 1976/77-2013/14, comparados con la precipitación registrada en Armerillo y la temperatura registrada en Colorado. Fuente: Elaboración propia.

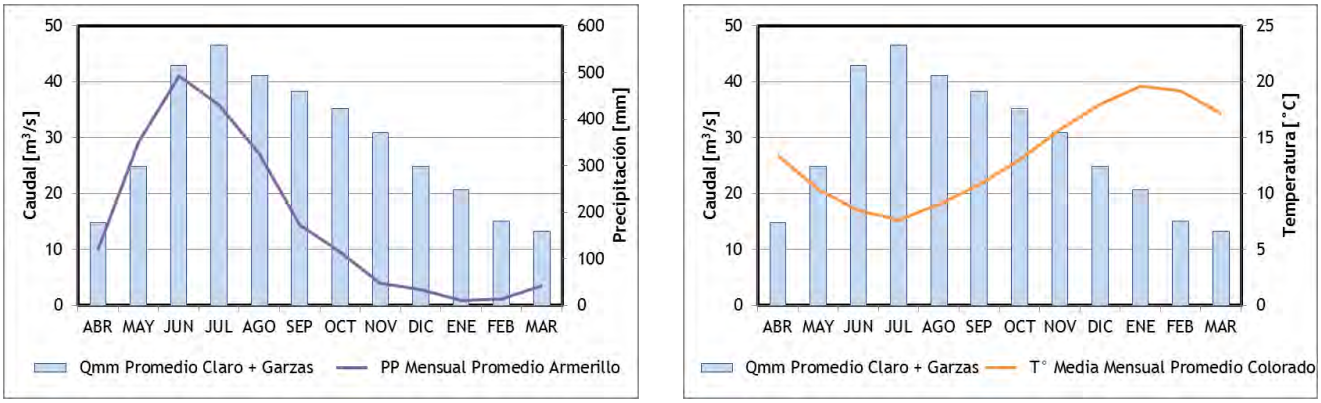


Figura 6.10. Caudales medios mensuales promedio de Claro + Garzas (1976/77-2013/14), junto con precipitación mensual promedio de Armerillo y temperatura media mensual promedio de Colorado. Fuente: Elaboración Propia.

La **Figura 6.11** muestra el resumen de caudales históricos de Maule, mientras que en la **Figura 6.12** se presentan los promedios mensuales de las mismas series históricas, donde se aprecia el predominio de la componente nival. Sin embargo, en la **Figura 6.11** también es posible observar alzas de caudal en invierno, teniendo en algunos años más de dos meses con alzas significativas, indicando un comportamiento más heterogéneo respecto al observado en Invernada, donde la cuenca es predominantemente nival. En el caso de Maule, el 100% de la cuenca se encuentra sobre la línea de nieve promedio. Su similitud con Invernada se debe a la variabilidad de los caudales mínimos, que presenta ciclos de varios años semejantes a los que se registran en Invernada, sin embargo, en Maule se producen fenómenos diferentes a los esperados en una cuenca netamente nival, lo cual podría dar cuenta de un microclima en la zona.

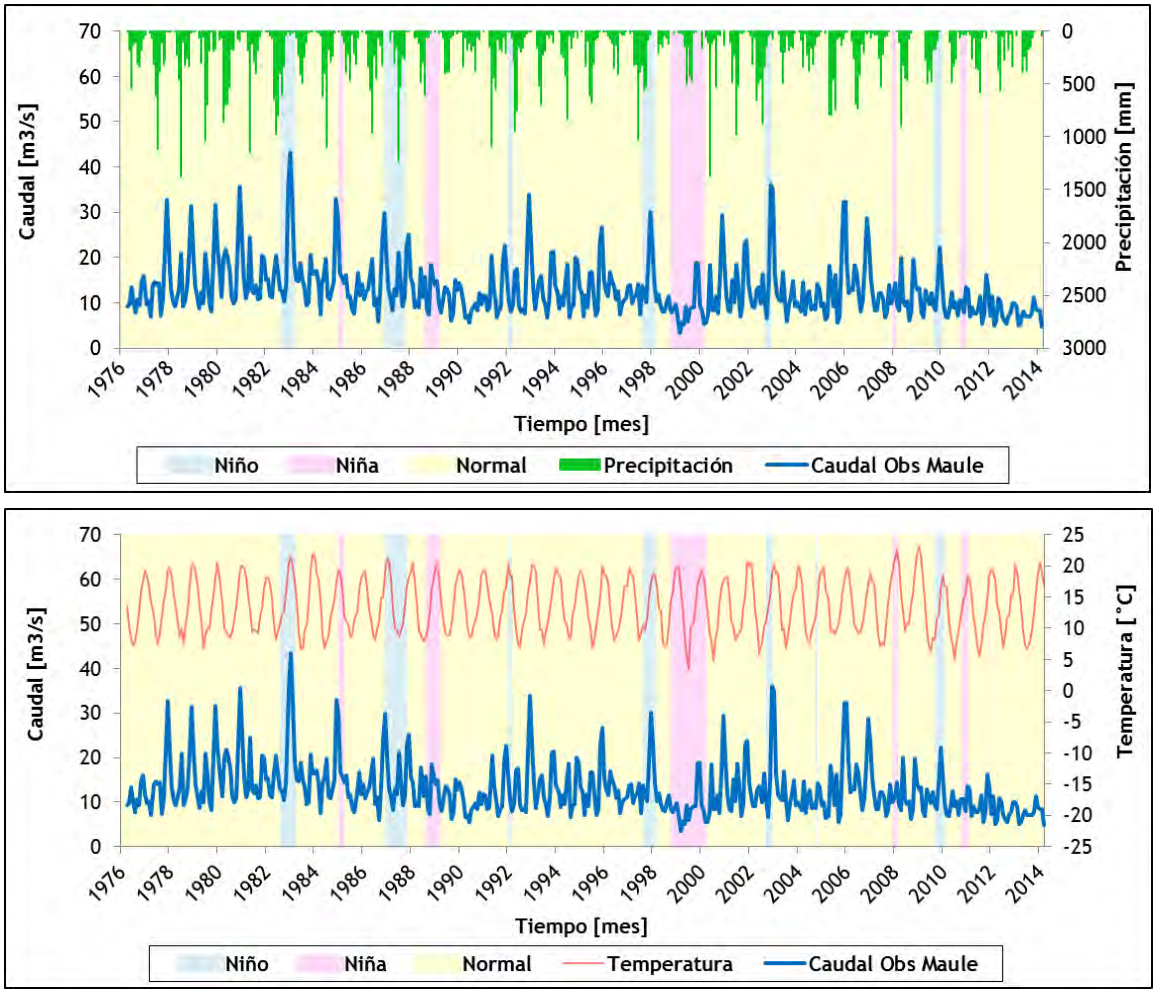


Figura 6.11. Caudales observados en Maule en el periodo 1976/77-2013/14, comparados con la precipitación registrada en Armerillo y la temperatura registrada en Colorado. Fuente: Elaboración propia.

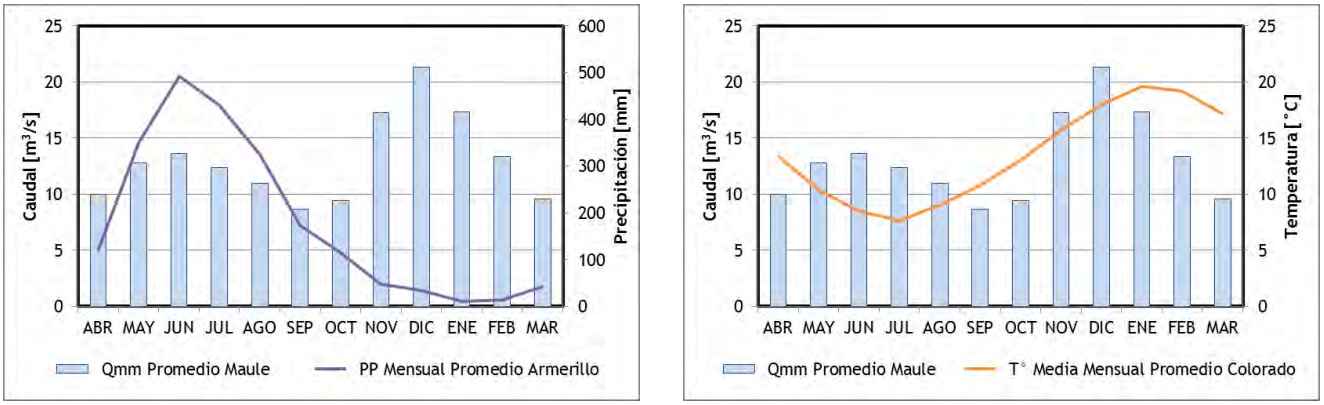


Figura 6.12. Caudales medios mensuales promedio de Maule (1976/77-2013/14), junto con precipitación mensual promedio de Armerillo y temperatura media mensual promedio de Colorado. Fuente: Elaboración Propia.

6.3.2 Meteorología

El análisis de las estaciones meteorológicas realizada en el **Acápite 5.1** ha permitido identificar las estaciones vigentes y suspendidas que informa la DGA (**Figura 5.3**), siendo Maule Alto una de las zonas con menor densidad de estaciones.

A continuación se presentan las estaciones de precipitación y temperatura seleccionadas. Se presenta también la metodología para calcular los gradientes de precipitación y temperaturas utilizados para extrapolar la información observada hacia cada una de las subcuencas en estudio. Estos gradientes son además empleados posteriormente para extrapolar la información de los modelos de circulación general (MCG), desde las estaciones DGA donde se realiza el proceso de downscaling, hacia las subcuencas seleccionadas.

6.3.2.1 Precipitación

La **Figura 5.4** presentada en el **Acápite 5.1** muestra que, cerca de la zona de estudio, existen al menos 3 estaciones con 30 años o más de registros; éstas se detallan en la **Tabla 6.6**. Dos se ubican en las colas de los embalses Melado y Colbún, existiendo una tercera estación aguas abajo, en la ribera norte del embalse Colbún. Por otra parte, si se contrasta la figura anterior con la **Figura 5.3** es posible observar que las únicas estaciones vigentes son las ubicadas en torno al embalse Colbún: Armerillo y Colorado. La estación en la cola del embalse Melado, río Melado en la Lancha, se encuentra suspendida desde 2003.

Tabla 6.6. Estaciones pluviométricas con 30 años o más de registros (Datum WGS84). Fuente: [CR2, 2013; DGA, 2015]

Estación	Código BNA	Elevación [msnm]	Estado	UTM Norte	UTM Este
Colorado	07378003-9	420	Vigente	6.053.466	295.109
Armerillo	07320002-4	530	Vigente	6.046.839	311.859
Melado en la Lancha	07317001-K	650	Suspendida	6.030.305	313.661

Considerando la mayor altitud de la estación Armerillo, se ha seleccionado esta estación como estación de referencia. En la **Tabla 6.7** se presenta un resumen de las precipitaciones

promedio, mínimas, máximas y desviación estándar en el periodo 1976/77-2013/14 observadas en dicha estación.

Tabla 6.7. Resumen de precipitaciones promedio, máximas, mínimas y desviación estándar en la estación Armerillo, en el periodo 1976/77-2013/14. Fuente: Elaboración propia.

Indicador	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Promedio [mm]	128	375	491	492	323	191	125	67	37	11	15	37
Máximo [mm]	860	1146	1373	1378	883	603	524	330	333	137	162	339
Mínimo [mm]	0	26	57	43	37	3	0	0	0	0	0	0
Desv. Est. [mm]	163	303	283	349	211	157	123	88	70	26	32	74

La selección de Armerillo se verifica mediante su correlación con Colorado entre junio de 1963 y diciembre de 2013, obteniendo un R^2 de 0,944 según se indica en la **Figura 6.13**, lo cual indica que ambas estaciones estarían registrado los mismos eventos de precipitación, aunque Armerillo mide generalmente precipitaciones del orden de 50% superiores que Colorado. Esta diferencia de precipitaciones, con solo 72 m de diferencia de altitud, indica que existe un fuerte efecto orográfico en Armerillo, lo cual puede ser verificado empleando los datos disponibles de la estación río Melado en la Lancha. La **Figura 6.14** muestra la relación entre ambas estaciones, entre noviembre de 1965 y enero de 2003 (años concurrentes disponibles), donde se aprecia que la precipitación en Armerillo es levemente mayor a Melado en la Lancha.

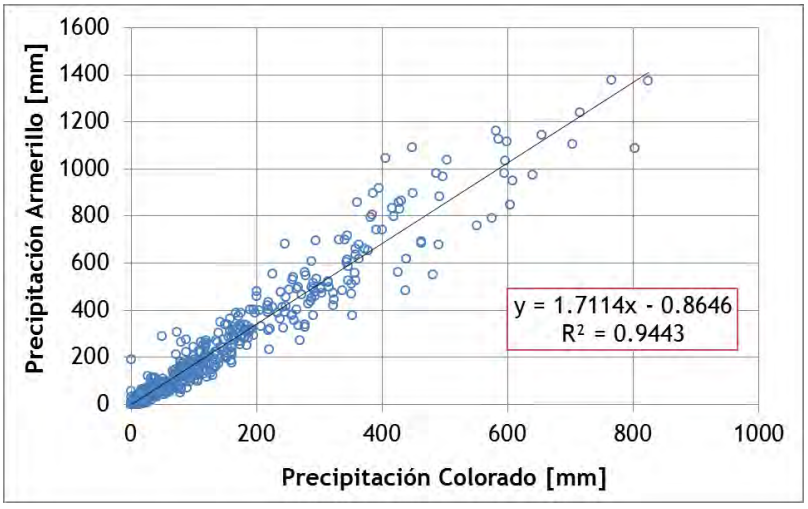


Figura 6.13. Correlación entre estación pluviométrica Armerillo y Colorado. Fuente: Elaboración propia a partir de información proporcionada por CR2 [2013].

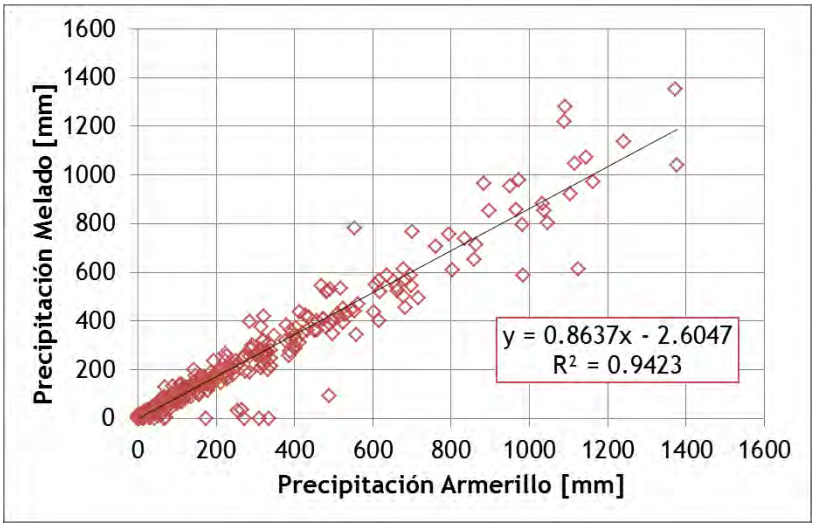


Figura 6.14. Correlación entre estación pluviométrica Armerillo y Melado en la Lancha. Fuente: Elaboración propia a partir de información proporcionada por CR2 [2013].

Esos resultados permiten reconocer un importante efecto orográfico en Armerillo, sin embargo, la orientación del valle del río Melado y las altas cumbres que lo rodean también podrían estar influyendo en la menor magnitud de la precipitación en dicho valle. Esta incertidumbre presente en la zona se debe a que no existen otras estaciones que permitan analizar los efectos orográficos que se estarían produciendo.

Debido a la escasez de registros pluviométricos en las subcuencas en estudio, los gradientes utilizados en CEPAL [2009b] y en MINENERGIA [2011] se han estimado mediante un método indirecto, basado en los caudales disponibles. Las relaciones estimadas en dichos estudios indican la existencia variaciones negativas de la precipitación con la altura, lo cual permite corroborar en parte que el ingreso de las tormentas al valle del Maule Alto estaría siendo controlado en Armerillo. Como se ha señalado, estas estimaciones contienen un grado de incerteza considerable, debido a que no existen registros observados que permitan confirmar los supuestos adoptados. En este sentido, la medida de confirmación más próxima, de los supuestos utilizados en la estimación de gradientes, se basa en la calidad de la calibración que es posible obtener mediante los modelos hidrológicos que se generaron en dichos estudios.

En base a los antecedentes antes expuestos, en este estudio se adopta el procedimiento planteado en CEPAL [2009b] para estimar los gradientes de precipitación, utilizando la estadística actualizada de caudales proporcionada por CDEC SIC [2015c], en el periodo 1976/77-2014/15. El procedimiento se detalla a continuación:

1. En primer lugar, se determina el caudal medio anual en las subcuencas Invernada, Laguna del Maule y Melado, permitiendo así calcular gradientes en las tres direcciones principales hacia donde se desea extrapolar la precipitación: i) Dirección Nor-Oriente, representada por Invernada; ii) Dirección Oriente, representada por Maule; y iii) Dirección Sur-Oriente, representada por Melado. La precipitación efectiva de cada subcuenca se determina como:

$$P_{efec} = \frac{\overline{Q}_a}{A}$$

Donde $\overline{Q}_a$ corresponde al caudal medio anual y A es el área de la cuenca respectiva. No se utiliza Claro y Garzas debido a que los caudales de ambas subcuencas se encuentran agregados.

2. Las pérdidas evapotranspirativas se estiman a partir de la evapotranspiración potencial (ETP) de la subcuencas, en base a la sectorización de distritos agroclimáticos [CNR, 2000]. La ETP se determina como la suma de los aportes de cada distrito agroclimático ponderado por el porcentaje de área asociada, en la correspondiente subcuenca donde se determina la precipitación efectiva.

De esta forma, la precipitación total anual de cada subcuenca se calcula como la suma de las ETP y las precipitaciones efectivas correspondientes.

A continuación se calcula el desnivel existente entre la elevación del 50% del área de cada subcuenca (indicada en la **Tabla 6.2**) y la estación Armerillo (492 msnm). La precipitación total anual promedio del periodo 1976/77-2014/15 en Armerillo es de 2.281 [mm]. La **Tabla 6.8** presenta los resultados obtenidos.

Tabla 6.8. Estimación de los gradientes anuales de precipitación en las tres direcciones principales de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Subcuenca	Área [km^2]	Z medio [msnm]	Pp efectiva [mm/año]	ETP [mm]	Pp Total [mm]	Gradiente dPp/dZ [mm/m]
Laguna La Invernada (LI)*	827,3	2.551,6	1.424	850	2.274	-0,003
Laguna del Maule (LM)	248,6	2.406,8	1.619	850	2.469	0,098
Embalse Melado (EM)	2.127,7	2.007,1	1.593	900	2.493	0,140

*Garzas y Claro utilizan este gradiente.

Respecto a los gradientes presentados en MINENERGIA [2011], se aprecia que se mantiene el descenso de precipitaciones hacia Invernada, aunque es menos pronunciado. También se mantiene el aumento de precipitaciones hacia Melado, pero también se atenúa el alza con la altitud. Finalmente, hacia Maule se revierte la tendencia de descenso de la precipitación, aumentando con la altura debido a la incorporación de los últimos años de estadística.

Estas diferencias en los gradientes, debido a aproximadamente 7 años adicionales de estadística y a la actualización de las áreas, muestra que los resultados pueden ser muy sensibles a la cantidad y calidad de la información disponible en una zona determinada.

A partir de estos resultados y las elevaciones medias de las bandas presentadas en el **Acápite 6.2** (ver **Tabla 6.4**), es posible usar la información pluviométrica de la estación Armerillo para estimar esta variable en cada una de las zonas de estudio. Esta es utilizada para la calibración de los modelos hidrológicos, lo cual se presenta en el **Acápite 7.2**.

6.3.2.2 Temperatura

La **Figura 5.5** presentada en el **Acápite 5.1** muestra que las estaciones con medición de temperatura igual o mayor a 30 años se ubican en la depresión intermedia, siendo la estación Colorado (420 msnm) la estación más completa y cercana a la zona de estudio, por lo cual es la estación base seleccionada para estimar la temperatura en las subcuencas en estudio. Cabe señalar que Colorado no presenta mediciones desde febrero de 2014, por lo cual ha obligado a restringir el periodo de información disponible en un año, respecto a la disponibilidad de información en las demás variables. La **Tabla 6.9** presenta un resumen de las temperaturas promedio, mínimas, máximas y desviación estándar en el periodo 1976/77-2013/14.

Tabla 6.9. Resumen de temperaturas promedio, máximas, mínimas y desviación estándar en la estación Colorado, en el periodo 1976/77-2013/14. Fuente: Elaboración propia.

Indicador	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Promedio [°C]	13,5	10,5	8,4	7,8	9,1	10,8	13,0	15,8	18,3	19,7	19,1	17,1
Máximo [°C]	15,58	12,9	10,72	10,76	10,67	13,62	15,49	19,27	21,96	23,11	22,61	20,22
Mínimo [°C]	9,96	8,68	5,44	3,41	7,23	8,25	11,57	11,88	15,29	17,96	16,66	14,135
Desv. Est. [°C]	1,2	1,2	1,3	1,5	0,9	1,0	1,0	1,3	1,5	1,1	1,1	1,2

Por otra parte, se requiere actualizar la estimación de los gradientes mensuales determinados en CEPAL [2009b] y presentados en MINENERGIA [2011]. La única estación ubicada sobre los 1.000 msnm corresponde a Lo Aguirre, la cual se encuentra a 2.000 msnm y posee registros entre enero de 2000 y agosto de 2005. Por lo tanto, esta estación es fundamental para este procedimiento, siendo necesario verificar la conveniencia de incluir otras estaciones además de Colorado y Lo Aguirre en el cálculo de los gradientes. La **Figura 6.15** muestra los periodos de registro disponibles en las 8 estaciones que se han analizado inicialmente. A partir de este análisis, fue eliminada la estación Río Melado en Lancha DGA por tener menos de un año de datos y la estación Guayquivilo por no tener periodo concurrente con la gran mayoría de las estaciones. La **Tabla 6.10** presenta las estaciones definitivas que se han considerado para actualizar los gradientes de temperatura.

La información presentada en la **Figura 6.15** se evalúa en cuanto a su validez y al periodo concurrente entre las estaciones. El mayor número de estaciones disponibles se encuentra en el periodo comprendido entre mayo de 2003 y agosto de 2005 (28 meses de datos), en el cual las estaciones Río Maule en Armerillo, Colorado, Lo Aguirre, Ancoa Embalse, Digua Embalse y Río Melado en el Salto (6 estaciones) presentan datos concurrentes. Otro periodo con alta cantidad de información (35 meses de datos) corresponde al periodo comprendido entre octubre de 2002 y agosto de 2005, en el cual las estaciones Río Maule en Armerillo, Colorado, Ancoa Embalse, Digua Embalse y Lo Aguirre (5 estaciones) presentan datos.

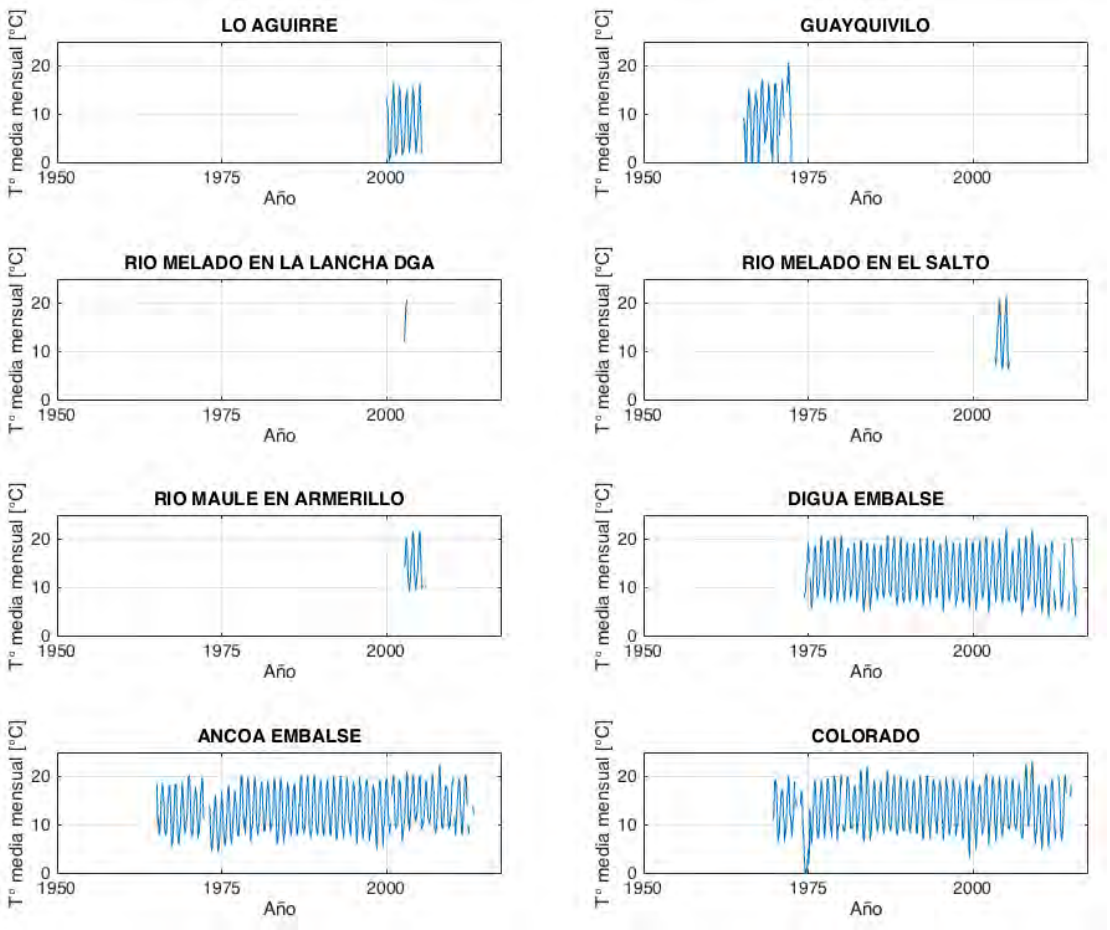


Figura 6.15. Series de tiempo de temperatura para las estaciones preseleccionadas. Fuente: Elaboración propia a partir de información proporcionada por CR2 [2013].

Tabla 6.10. Estaciones de temperatura preseleccionadas, cercanas a la zona de estudio (Datum WGS84). Fuente: [CR2, 2013; DGA, 2015].

Nombre estación	Código BNA	Elevación [msnm]	Estado	UTM Norte	UTM Este
Lo Aguirre	07301000-4	2.000	Suspendida	6.017.893	358.057
Río Melado en el Salto	07317005-2	730	Vigente	6.027.016	317.740
Río Maule en Armerillo	07321002-k	470	Vigente	6.046.588	308.762
Digua Embalse	07331002-4	390	Vigente	5.984.289	270.862
Ancoa Embalse	07355007-6	421	Vigente	6.023.163	292.622
Colorado	07378003-9	420	Vigente	6.053.466	295.109

En la **Figura 6.16** se presentan las temperaturas medias de todas las estaciones en análisis, donde se aprecia la diferencia entre Lo Aguirre y las demás estaciones, debido al desnivel aproximado de 1.500 m entre la primera y las restantes. En base a un análisis de las temperaturas medias mensuales promedio se ha considerado no utilizar la estación Digua

Embalse (390 msnm) pues es posible que su ubicación más austral introduzca un elemento extra en el análisis de relación elevación-temperatura. Tal como se muestra en la figura, esta estación presenta un comportamiento similar a la estación Río Melado en el Salto pese a que esta última está ubicada a 730 msnm, denotando una climatología propia de climas más australes.

Considerando como criterio principal el uso del mayor número de estaciones disponible para dar mayor consistencia a los resultados, se estimaron los gradientes mensuales a partir del periodo concurrente comprendido entre mayo de 2003 y agosto de 2005 (28 meses de datos). En la **Tabla 6.11** se presentan los nuevos gradientes estimados, junto con los gradientes presentados previamente en MINENERGIA [2011].

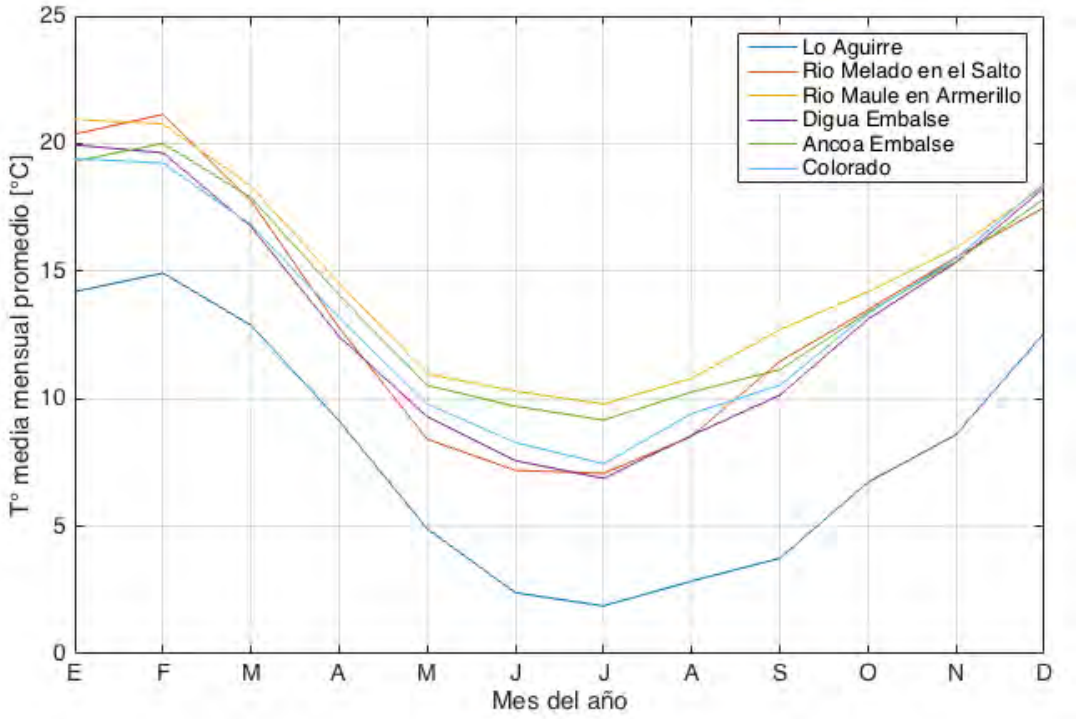


Figura 6.16. Temperaturas promedio mensuales de las estaciones en análisis, entre mayo de 2003 y agosto de 2005. Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la **Tabla 6.11**, dependiendo del criterio empleado se pueden tener cambios significativos en los gradientes de variación de la temperatura, al igual que lo observado en el caso de la precipitación.

Tabla 6.11. Gradientes mensuales de temperatura existentes y actualizados. Fuente: Elaboración propia.

Versión	Gradientes [°C/km]											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
[MINENERGIA, 2011]	-3,10	-2,30	-2,27	-2,71	-3,55	-3,77	-3,76	-3,78	-4,26	-3,84	-4,33	-3,39
Actualizados	-3,55	-3,01	-3,01	-3,74	-3,13	-4,33	-4,44	-4,74	-4,39	-4,15	-4,18	-4,09

Se selecciona la estación Colorado como información base para extrapolar la temperatura mediante los gradientes calculados. Esto se basa en su ubicación y en la extensión de sus registros.

Considerando la diferencia significativa que existe entre Colorado (420 msnm) y las zonas en las cuales se estimará la temperatura (elevaciones mayores a 3.000 msnm), es posible que diferencias de 0,5 [°C/km] en los valores de los gradiente se traduzcan en diferencias del orden de 1 a 2 [°C] en las temperaturas estimadas en altura. Sabiendo además que los aumentos futuros de la temperatura son del mismo orden de magnitud de estas diferencias, se ha puesto especial cuidado en calcular los gradientes empleando solo periodos concurrentes y con el mayor número de estaciones posible. Esta observación recalca la necesidad de contar a futuro con información meteorológica más extensa en altura, con el fin de reducir la incertidumbre de las estimaciones.

6.3.3 Hidrogeología

Debido a las características propias de zonas de alta montaña que presentan las cuencas en estudio, se espera una reducida influencia de los acuíferos en el régimen hidrológico de los ríos en cuestión. Esto se puede apreciar el Mapa Hidrogeológico de Chile, presentado en la **Figura 6.17** para la zona de estudio. En la figura se puede constatar que la mayor parte del área de interés posee una importancia hidrogeológica relativa muy baja, con un tipo de permeabilidad muy baja a ausente. Las subcuencas al norte del río Maule poseen características de rocas volcánicas cuaternarias y terciario-cuaternarias. Al sur del río Maule, incluyendo la cuenca afluente al río Maule, presenta características de rocas mixtas sedimentario-volcánicas del terciario y cretácico.

Por otra parte, en el **Acápite 5.2** se presenta la **Figura 5.8** con la ubicación de los acuíferos empleados en la modelación hidrológica y operacional realizada en el Plan Director del Maule [DGA, 2008]. De acuerdo a estos antecedentes, existirían formaciones acuíferas en los valles principales de las cuencas del río Melado y La Invernada, donde las conductividades hidráulicas de entrada serían de 604,7 [m/mes], bajando a 124,8 [m/mes] en la salida.

Estos valores concuerdan con lo reportado por DGA [2010], que indica una permeabilidad de $2{,}9 \cdot 10^{-4}$ [m/s], equivalente a 752 [m/mes] para el acuífero de "río Maule desde confluencia con río Claro hacia aguas arriba". No obstante, considerando los antecedentes de DGA [1986] presentados en la **Figura 6.17** dichos valores darían cuenta de lo que ocurre principalmente en el valle central, aguas abajo del embalse Colbún. Se tiene en cuenta además que el Modelo MAGIC utiliza estas permeabilidades en el valle central del Maule donde, entre otras cosas, se busca evaluar las seguridades de riego en la zona [DGA, 2008]. Tal como señala DGA [2008] el río Maule presenta una cantidad importante de cuencas sin control fluviométrico que se han considerado en la modelación superficial del modelo MAGIC-Maule. En particular, para generar los caudales en cuencas de tipo nivo-pluvial, se utiliza un método de transposición que considera el área, la lluvia y la altura media de la cuenca [DGA, 2008].

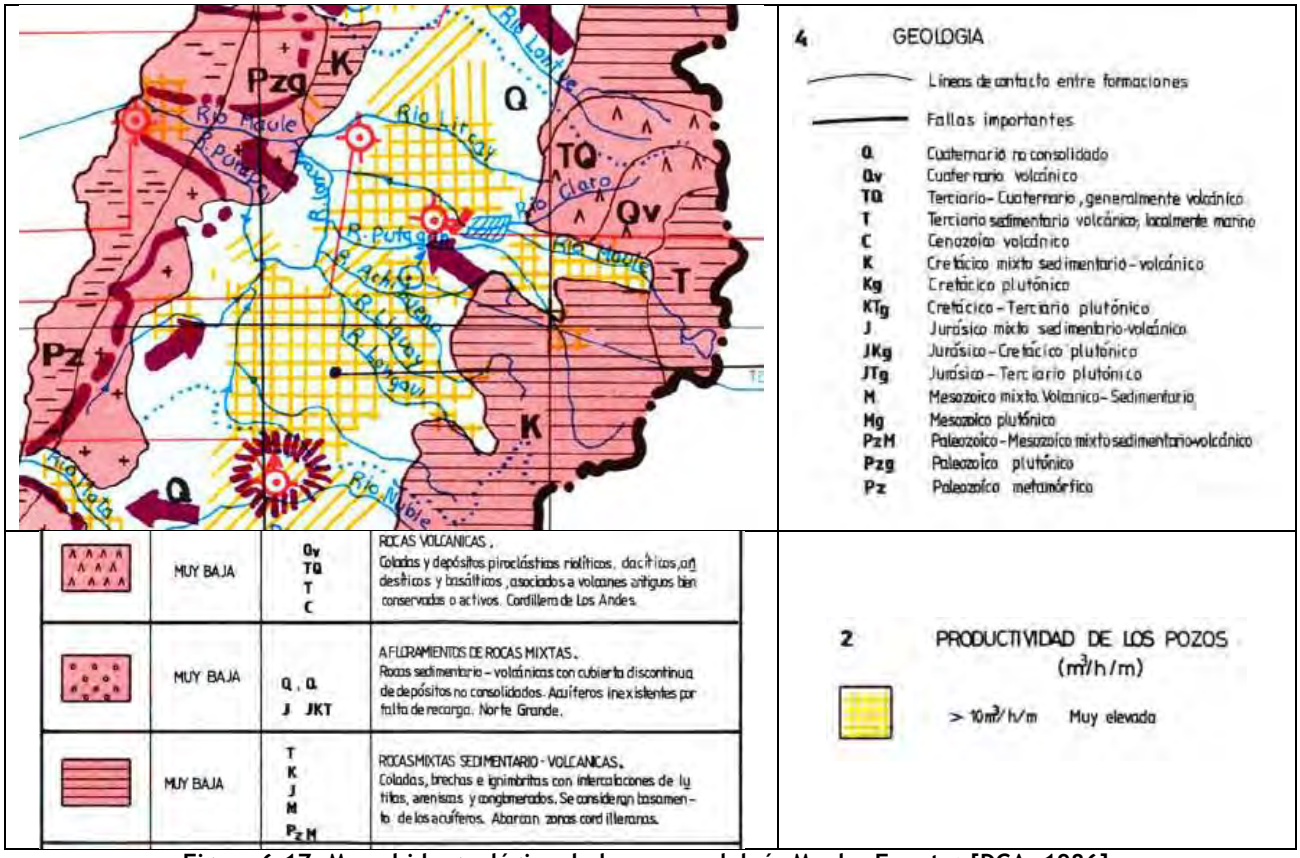


Figura 6.17. Mapa hidrogeológico de la cuenca del río Maule. Fuente: [DGA, 1986].

En base a lo anterior, se utilizan los antecedentes presentados por DGA [2010] como una referencia actual más cercana a lo observado en DGA [1986]. Si se considera la permeabilidad mínima del acuífero denominado Maule Norte por DGA [2010], se obtiene una permeabilidad aproximada de 70 [m/mes] o $2{,}7 \cdot 10^{-5}$ [m/s], lo cual podría ser un valor más adecuado a considerar para la zona de estudio.

En el mismo estudio DGA [2010] estima un flujo subterráneo potencial de 2,4 [m^3/s] en la sección de aguas arriba del acuífero, para una permeabilidad de $7{,}5 \cdot 10^{-4}$ [m/s], un ancho de sección de 2.200 [m], un espesor de acuífero de 180 [m] y un gradiente hidráulico de 0,008. Por lo tanto, si se utiliza una permeabilidad de $2{,}7 \cdot 10^{-5}$ [m/s], el flujo subterráneo se reduce a 86 [l/s]. Adicionalmente, se estima que el ancho de sección no es superior a los 1.000 [m] en los valles principales de Melado y La Invernada, con lo cual se pueden esperar flujos en torno a los 40 [l/s] aproximadamente.

Debido a que estos flujos son varios ordenes de magnitud inferiores a los involucrados en la escorrentía superficial, no son considerados en el análisis de resultados.

6.3.4 Capacidad Hidroeléctrica Instalada

En el **Acápite 4.3.2** se presenta en detalle la composición de la capacidad instalada en la cuenca completa del río Maule, así como su relevancia respecto a la capacidad hidroeléctrica instalada a nivel nacional. El resumen de esta información se encuentra en la **Tabla 4.13** (centrales convencionales de pasada y embalse) y **Tabla 4.14** (ERNC).

Por otra parte, en la **Figura 5.9** (**Acápite 5.3**) se presenta la distribución espacial de la capacidad instalada total (convencional y ERNC), lo cual permite visualizar su ubicación a través de los distintos rangos de potencia instalada en la cuenca del río Maule.

A continuación se presenta la obtención de la relación entre la energía bruta producida por el sector Maule Alto y los caudales medios mensuales de las subcuencas en estudio, en base a información del CDEC SIC [2015c; 2015d].

6.3.4.1 Relación entre caudal afluente y energía generada

Acorde a la **Tabla 4.13** se cuenta con 9 centrales, tanto de embalse como de pasada, correspondiente a la categoría de generación hidroeléctrica tipo convencional, de las cuales 8 centrales presentan registros extensos de energía bruta generada a nivel mensual en el periodo 1993-2015 [CDEC SIC, 2015d]. En base a esta información, se ha decidido excluir a la central Los Hierros en la suma de energía hidroeléctrica convencional total del sistema Maule Alto, considerando que:

1. La central se encuentra al límite de ser catalogada como ERNC, de acuerdo a la discrepancia en la potencia instalada señalada en el **Acápite 4.3.2**.
2. Debido a su corto periodo de funcionamiento (presenta registros solo desde enero de 2014), no aplica realizar un relleno temporal de datos (esto implicaría extender un registro de 2 a 23 años).

De esta forma, las centrales y periodos con registros de energía generada disponibles son las siguientes:

- **Cipreses**: enero de 1993 a diciembre de 2015.
- **Isla**: enero de 1993 a diciembre de 2015.
- **Curillinque**: diciembre de 1993 a diciembre de 2015.
- **Loma Alta**: julio de 1997 a diciembre de 2015.
- **Pehuenche**: enero de 1993 a diciembre de 2015.
- **San Ignacio**: agosto de 1996 a diciembre de 2015.

En el caso de Colbún y Machicura, la información disponible en CDEC SIC [2015d] presenta formatos diferentes en el periodo 1993-2015. Existen años donde se presenta la generación total del complejo, así como otros años donde se hace la distinción entre Colbún y Machicura, presentando los datos de generación por separado. La **Tabla 6.12** resume esta inconsistencia en el formato de la información disponible, teniendo además un año sin información (1997) en el caso de la central Machicura.

Tabla 6.12. Periodos en los cuales se tiene generación combinada y desagregada en el complejo Colbún-Machicura. Fuente: Elaboración propia.

Formato CDEC SIC	Periodo	Número de Datos por Mes
Producción Combinada	1993-1994 y 2000-2007	10
Producción Separada	1995-1999 y 2008-2015	13

De acuerdo a lo presentado en la **Tabla 4.14**, existen 10 centrales catalogadas como Energías Renovables No Convencionales (ERNC), de las cuales al menos 4 centrales (Ojos de Agua, MCH Dosal, Los Hierros 2 y Chiburgo) estarían siendo abastecidas por recursos hídricos provenientes de la zona de estudio. En la **Tabla 6.13** se presenta el resumen de la información disponible en las 4 centrales de tipo ERNC que serían de interés en este estudio. Como se observa, la central con información más extensa es Chiburgo, con cerca de 9 años de funcionamiento, mientras que MCH Dosal aún no cuenta con un año completo. Considerando su bajo aporte de energía al total producido por las centrales de tipo convencional[8] y la escasez de años de funcionamiento, se ha decidido excluir del análisis a estas centrales.

Tabla 6.13. Periodo de funcionamiento e información de generación disponible de centrales hidroeléctricas calificadas como ERNC, existentes en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia en base a información de CDEC SIC [2015d].

Central	Chiburgo		MCH Dosal		Ojo de Agua		Los Hierros	
Periodo	07/2007-12/2015		07/2015-12/2015		06/2008-12/2015		12/2013-12/2015	
Mes	N° Datos	Promedio [GWh]	N° Datos	Promedio [GWh]	N° Datos	Promedio [GWh]	N° Datos	Promedio [GWh]
Ene	8	11,22	0	s/i	7	4,38	2	1,97
Feb	8	9,05	0	s/i	7	4,44	2	4,53
Mar	8	7,87	0	s/i	7	4,55	2	6,46
Abr	8	5,93	0	s/i	7	3,8	2	5,7
May	8	2,66	0	s/i	7	3,18	2	12,7
Jun	8	2,25	0	s/i	8	2,43	2	15,68
Jul	9	0,7	1	0,05	8	2,93	2	16,63
Ago	9	0,76	1	0,07	8	2,95	2	15,91
Sep	9	2,29	1	0,05	8	3,14	2	12,4
Oct	9	8,67	1	0,02	8	3,5	2	11,96
Nov	9	10,91	1	0,02	8	4,01	2	8,92
Dic	9	11,94	1	0	8	4,23	3	2,9

[8] Las centrales convencionales suman un total de 1.475 MW instalados, mientras las ERNC indicadas suman solo 31.57 MW instalados

Con el fin de obtener una relación equivalente para todas las centrales y su análisis futuro, los vacíos de información deben ser rellenados.

El relleno de datos de las centrales de Curillinque y Loma Alta se realiza a base de una regresión lineal que abarca la serie continua de generación a nivel mensual. Para la central Curillinque ha sido planteada en base a la energía producida por central Isla, mientras que para la central Loma Alta la relación ha sido planteada con respecto a Curillinque

Por otra parte para los casos de San Ignacio, Colbún y Machicura se han desagregado las relaciones lineales, encontrando correlaciones a nivel mensual que relacionan las energías brutas generadas entre las centrales. La **Tabla 6.14** se muestran los coeficientes R^2 a nivel mensual y con serie única para las centrales en la cuales se ha rellenado datos. Se destacan los coeficientes mensuales que son menores a aquellos obtenidos con la serie completa.

Tabla 6.14. Comparación de coeficientes de bondad de ajuste (R^2) para regresiones con serie completa única y a nivel mensual para centrales en las cuales se ha rellenado datos. Fuente: Elaboración propia.

Central rellenada	Currillinque	Loma Alta	San Ignacio	Colbún*
Central base	La Isla	Curillinque	Machicura	Machicura*
Serie única	0,744	0,936	0,841	0,988
ENE	0,071	0,808	0,976	0,998
FEB	0,337	0,885	0,980	0,994
MAR	0,869	0,950	0,984	0,995
ABR	0,914	0,974	0,802	0,994
MAY	0,978	0,981	0,901	0,985
JUN	0,951	0,955	0,897	0,970
JUL	0,945	0,940	0,856	0,987
AGO	0,952	0,941	0,891	0,995
SEP	0,731	0,781	0,925	0,996
OCT	0,151	0,676	0,937	0,993
NOV	0,030	0,950	0,967	0,996
DIC	0,650	0,858	0,954	0,998

*El relleno se realiza en base a un sistema de 2x2.

Como se aprecia en la **Tabla 6.14** en el caso de Loma Alta y Curillinque el valor del coeficiente de bondad de ajuste presenta su valor más alto durante los meses de otoño-invierno (Abril a Agosto), y su valor más bajo durante los periodos de deshielo, obteniendo coeficientes de bondad de ajuste no significativos. De esta manera se tiene que la ganancia en los periodos de lluvia no compensa la pérdida en los periodos de deshielo, siendo necesario rellenar en base a la regresión lineal obtenida con la serie completa única.

En el caso de Colbún y Machicura los coeficientes R^2 a nivel mensual muestran mayor consistencia, siendo inferiores solo en 3 meses (mayo, junio y julio) al R^2 obtenido empleando la serie completa de energía bruta mensual. La diferencia entre estos coeficientes en comparación con el de la serie completa es poco significativa, reportando de esta manera una ganancia al encontrar relaciones para cada mes.

En el caso de San Ignacio se tiene que solamente abril presenta un coeficiente de regresión lineal menor que aquel obtenido con la serie completa única. Al no ser significativa esta diferencia, en comparación con el obtenido en base a la serie completa de energía bruta mensual, también se utilizan las relaciones mensuales en este caso.

Como se destaca en la **Tabla 6.14**, el procedimiento de relleno de energía generada mensual en el caso de Colbún y Machicura se basa en un sistema de 2x2, a diferencia de las relaciones lineales simples empleadas en los demás casos. A continuación se presenta el sistema lineal de 2x2 utilizado para estimar las energías generadas por separado, el cual es aplicado para cada mes (12 relaciones).

$$\begin{Bmatrix} E(Colbún) + E(Machicura) = K \\ E(Colbún) = m \cdot E(Machicura) + n \end{Bmatrix}$$

En dicho sistema, CDEC SIC [2015d] reporta el valor "K" en el formato de "Producción Combinada" indicado en la **Tabla 6.12**. Los coeficientes *m* y *n* son determinados empleando la "Producción Separada" señalada en la misma tabla, salvo por el año 1997 debido a la ausencia de registro de Machicura, año que es rellenado con la relación simple, una vez determinados *m* y *n*.

En la **Figura 6.18** se presentan las relaciones entre los promedios mensuales y anuales de los caudales afluentes [CDEC SIC, 2015c] presentados en el **Acápite 6.3.1** y la energía bruta total rellenada [CDEC SIC, 2015d] de las centrales consideradas en el análisis. Si se comparan los coeficientes de bondad de ajuste (R^2) obtenidos en la **Figura 6.18** con los coeficientes obtenidos en CEPAL [2009a] (0,8148 y 0,7202, respectivamente) se aprecia una mejoría en ambas relaciones. La mejoría puede ser atribuida a la existencia de un mayor número de años secos en el registro, durante los cuales se tiende a producir una mejor correlación, de acuerdo a lo señalado en CEPAL [2009a].

En la **Figura 6.19** se presenta la relación no lineal entre los caudales medios mensuales del sistema Maule Alto (suma de los caudales de Melado, Invernada, Maule y Claro+Garzas) y la energía total mensual generada del sistema. Como se espera desde el punto de vista físico, para caudales pequeños la energía tiende a cero. Para caudales altos la limitación debido a la capacidad instalada produce que la energía generada no aumente a la misma tasa que el caudal, llegando hasta un límite superior cercano a los a 1000 GWh para los meses más húmedos de la serie histórica.

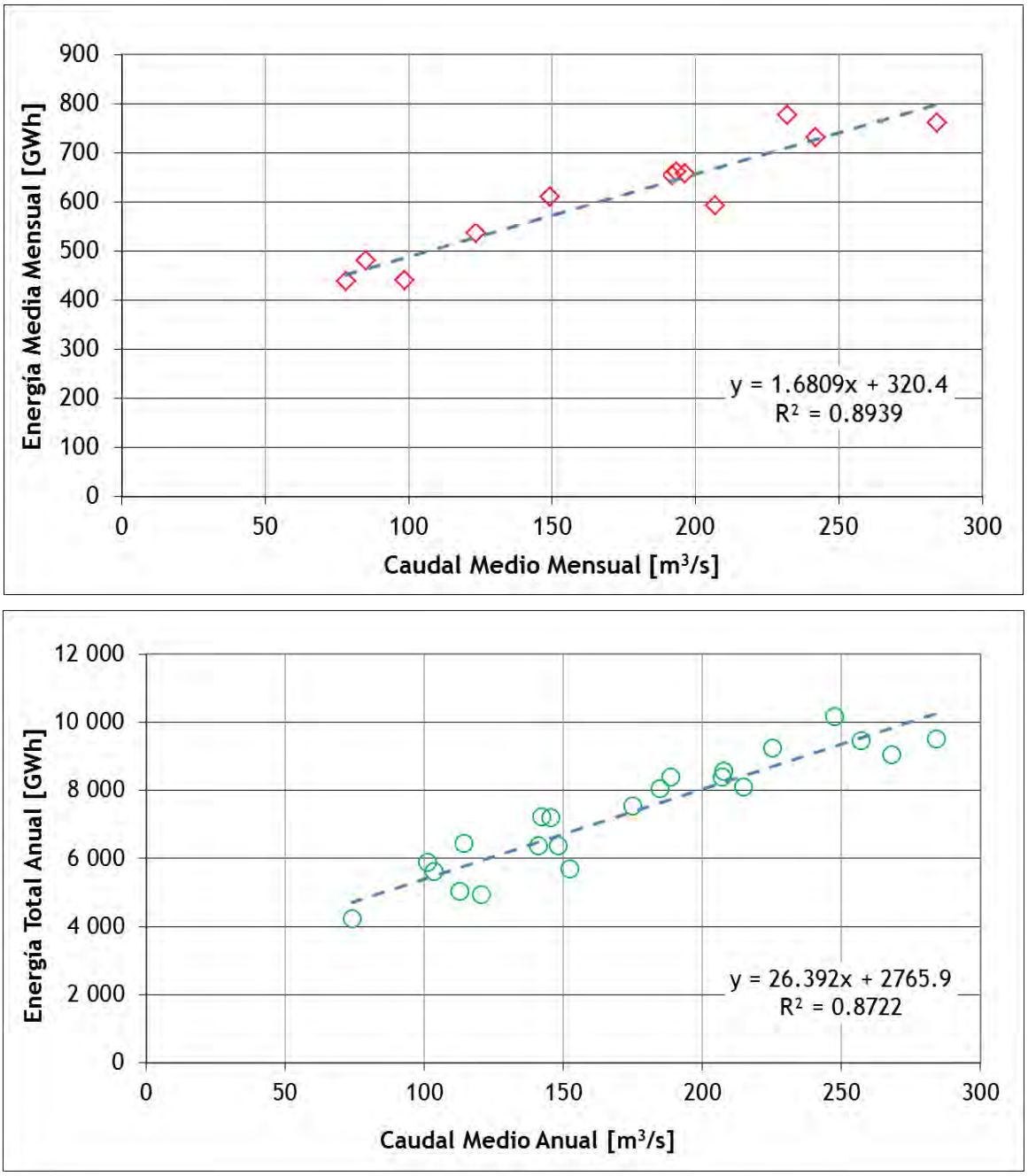


Figura 6.18. Relación entre el caudal medio mensual promedio histórico afluente al Sistema Maule Alto y la energía bruta media mensual promedio histórica producida (Panel Superior). Relación entre el caudal medio anual efluente del Sistema Maule Alto y la energía bruta total anual producida (Panel Inferior).

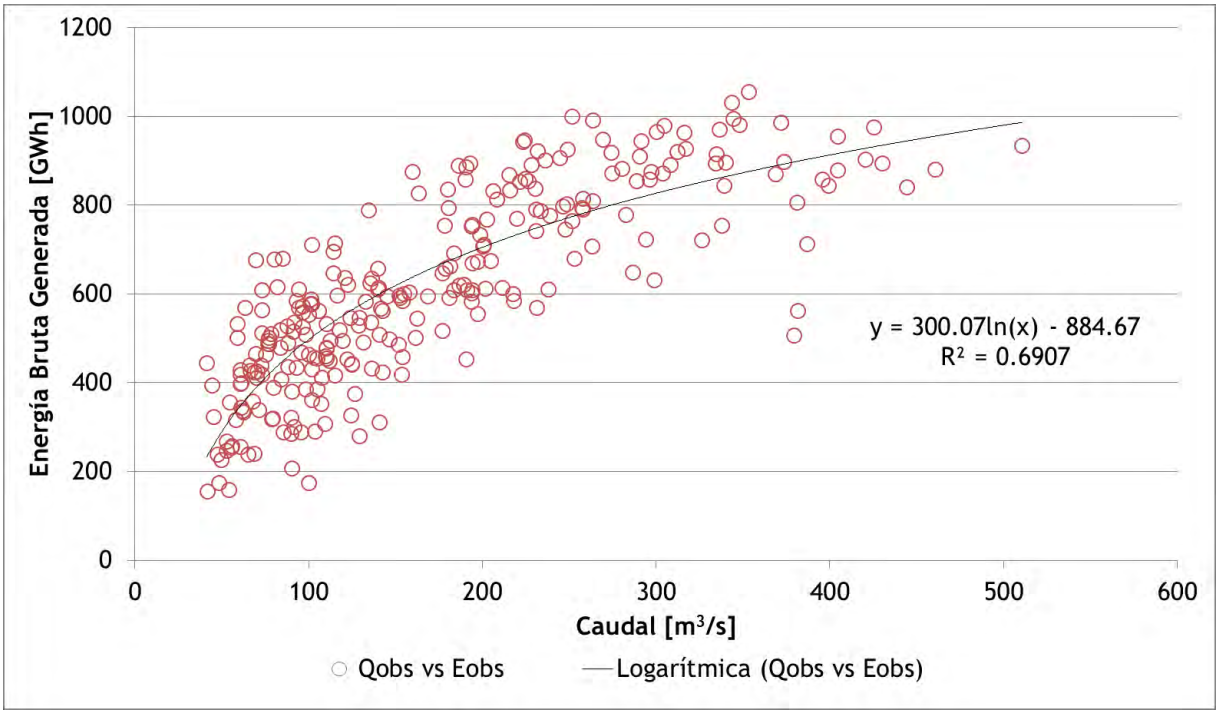


Figura 6.19. Relación de la serie histórica del caudal medio mensual afluente al Sistema Maule Alto y la energía mensual producida en la zona. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 6.20** se presentan 12 relaciones mensuales, entre el caudal medio mensual afluente y la energía mensual producida por el sistema Maule Alto. Como se aprecian en las relaciones logarítmicas encontradas, éstas tienen un sentido físico equivalente al encontrado al relacionar las series históricas completas. Por otra parte, permiten observar aquellos meses en que la generación se relaciona más directamente con los caudales, mientras que en otros meses la generación tiende a independizarse de los caudales afluentes desde las cabeceras, posiblemente debido a la operación de los embalses existentes en la zona y a la disponibilidad de agua en estos. Los coeficientes R^2 indican que abril y mayo serían los meses menos dependientes del caudal afluente, lo cual concuerda con el periodo previo a la temporada de lluvias, cuando ya no existen deshielos y las lluvias son bajas aún (las máximas precipitaciones se producen en junio, en la estación Armerillo).

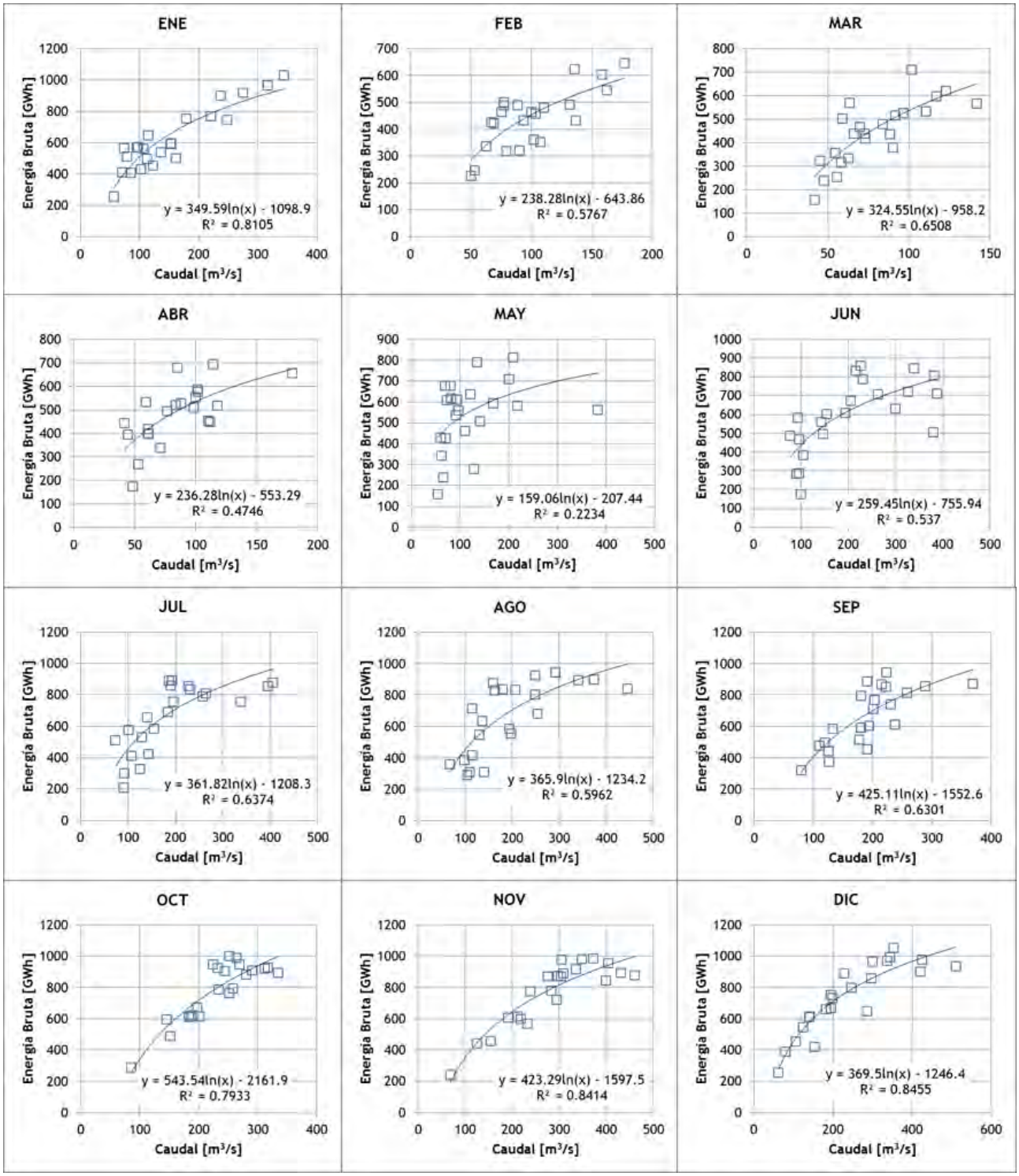


Figura 6.20. Relaciones mensuales entre el caudal medio mensual afluente al Sistema Maule Alto y la energía mensual producida en la zona. Fuente: Elaboración propia.

6.3.5 Capacidad Hidroeléctrica Potencial

Recientemente se ha evaluado el potencial hidroeléctrico sin explotar en la cuenca del río Maule, el cual alcanza los 1442 MW, representando un 7,5% del potencial total sin explotar estimado en Chile [MINENERGIA - DGA – DGF, 2014]. Además de la capacidad instalada resulta de interés evaluar la capacidad potencial existente en la zona de estudio, lo cual puede permitir encontrar impactos diferentes o complementarios a los que se pueden evaluar por medio de la capacidad instalada.

En base a la información proporcionada por el Explorador de Derechos de Aprovechamiento de Aguas No Consuntivos [MINENERGIA - DGA – DGF, 2014], es posible obtener la potencia y la energía producida por una central potencial, ubicada dentro de las subcuencas en estudio. La información de potencial hidroeléctrico para la zona de estudio presenta, entre otros, los campos de información que se indican en la **Tabla 6.15**.

A partir de estos antecedentes y de la revisión de la Subsecretaría de Energía, se han determinado los siguientes criterios básicos para la selección de puntos con potencial hidroeléctrico a utilizar para evaluar futuros impactos del cambio climático:

- **Su emplazamiento debe presentar bajos niveles de conflictividad**: Comprendiendo que las zonas protegidas o de interés turístico y/o ambiental son susceptibles de tener mayor conflicto al momento de tramitar los permisos sectoriales de una nueva central hidroeléctrica, se propuso privilegiar la selección de una subcuenca que presente la menor cobertura de este tipo de zonas.
- **Debe existir una única captación**: De esta forma se asegura que el caudal modelado que se utilizará pertenezca a una única cuenca aportante. Dado que se tiene el punto de restitución y el desnivel (dz), es posible estimar la cuenca aportante mediante el uso de las curvas hipsométricas presentadas en el **Acápite 6.2**.
- **Los datos deben ser consistentes**: Para verificar esto, se calcula el factor de planta (FP) mediante dos pares de variables (no debe exceder el 100%): (i) los caudales de diseño (Qdis) y utilizado (Qocu); (ii) potencias instalada (Pin) y media anual generada (Pmed). En forma teórica se tiene que FP=Qocu/Qdis=Pmed/Pin, lo cual ha sido calculado para el potencial hidroeléctrico de todo Chile [MINENERGIA - DGA – DGF, 2014]. Adicionalmente se ha estimado la eficiencia aproximada, asumiendo que dz es igual a la altura neta de caída, lo cual también debe entregar valores menores que 100%.

Tabla 6.15. Resumen de campos de información de interés disponibles en la base de datos del potencial hidroeléctrico en la zona de estudio. Fuente: Marcelo Ibarra, a través de correo electrónico *ernc@dgf.uchile.cl*.

Variable	Descripción de la Variable
nsite	Número de Captaciones asociadas a la potencial central
ndaa	Número de DAA asociado a la potencial central
restiN	Coordenada Norte Restitución (m) de la potencial central (UTM WGS84 H19)
restiE	Coordenada Este Restitución (m) de la potencial central (UTM WGS84 H19)
dz	Desnivel utilizado por la potencial central
Qdis	Caudal de Diseño (m^3/s) de la potencial central
Qeco	Caudal Ecológico (m^3/s) de la potencial central
Qocu	Caudal utilizado (m^3/s) por la potencial central
Pin	Potencia Instalada MW de la potencial central
FP	Factor de planta de la potencial central
Pmed	Potencia media anual generada (MW) por la potencial central

El análisis de consistencia realizado sobre la base de datos a nivel nacional (ver **Figura 6.21**) muestra la conveniencia de seleccionar las centrales con mayor potencial hidroeléctrico, debido a que a menor potencial se presenta un mayor error en las estimaciones del factor de planta y eficiencia, lo cual se debería a la precisión numérica de los valores contenidos en la base de datos de potenciales hidroeléctricos[9]. La selección de los potenciales más elevados también resulta adecuada desde el punto de vista de la evaluación de impactos del cambio climático, ya que representan los proyectos más rentables y, por lo tanto, los de mayor posibilidad de concreción en el corto y mediano plazo.

Por otro lado, al revisar las potenciales centrales en la zona de estudio, se aprecia que las de mayor potencial corresponden a las subcuencas de Invernada y Melado, siendo esta última la de mayor potencial (ver **Figura 5.10**). En particular, la subcuenca del río Melado presenta la menor proporción de zonas protegidas o de interés ambiental (ver **Figura 5.13**). Si se considera además el interés de privados de realizar un eventual desarrollo hidroeléctrico en la zona de los ríos Guaiquivilo y Melado (ver **Acápite 5.3**), es posible justificar la selección de la subcuenca Melado para la búsqueda de puntos con potencial hidroeléctrico, en los cuales se pueda evaluar el impacto futuro del cambio climático.

[9] Comunicación directa con Mark Falvey (falvey@dgf.uchile.cl), quien trabaja en el desarrollo de la base de datos de potenciales hidroeléctricos.

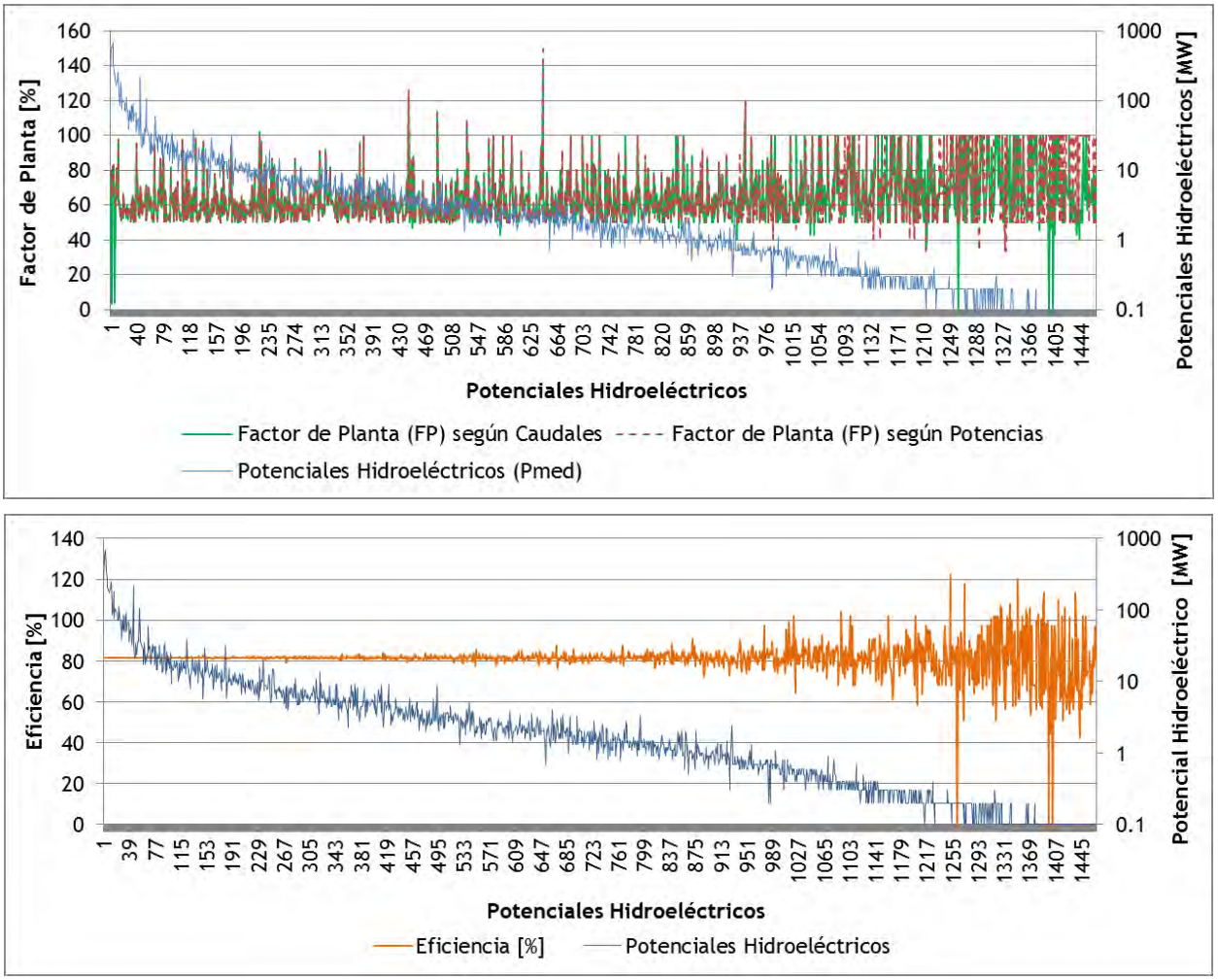


Figura 6.21. Análisis de consistencia de potenciales hidroeléctricos. En el eje X se presentan los puntos de restitución de derechos de agua ordenados de mayor a menor potencial hidroeléctrico (Pmed). Fuente: Elaboración propia.

Cabe señalar que para proyectar las series futuras de energía y potencia (del potencial hidroeléctrico), se utilizan las ecuaciones que se indican a continuación:

$$E\ [kWh] = \eta * 9.8\ [m/s^2] * \rho\ [kg/m^3] * V\ [m^3] * H\ [m] * (1/3600000)$$

$$P\ [W] = \eta * 9.8\ [m/s^2] * \rho\ [kg/m^3] * Q\ [m^3/s] * H\ [m]$$

Donde:

η = Eficiencia calculada a partir de datos del potencial hidroeléctrico.

ρ = 1000 $[kg/m^3]$ en el caso del agua.

H = Desnivel utilizado por la potencial central (dz).

Q = Caudal simulado en la etapa de modelación hidrológica.

V = Volumen de agua calculado a partir del caudal simulado.

El caudal simulado debe ser procesado para estimar la energía y potencia, mediante la restricción del mínimo y máximo caudal disponible para generar. El mínimo está dado por la necesidad de permitir el escurrimiento del caudal ecológico (Qeco), mientras que el máximo está dado por el caudal de diseño (Qdis), entendiendo que no es físicamente posible producir más allá de dicho caudal.

Aplicando los criterios antes expuestos, se presenta el resumen de la selección de puntos realizada en la subcuenca del Melado en la **Tabla 6.16**, mientras que en la **Tabla 6.17** se presentan los factores de planta y eficiencias estimadas en el análisis de consistencia realizado. Se aprecian diferencias de hasta un 8% respecto al factor de planta (FP) indicado en la **Tabla 6.16**, siendo este último el informado en la base de datos de MINENERGIA - DGA – DGF [2014]. Al tratarse de potenciales relativamente altos, estas diferencias son esperables, sin embargo, tanto los factores de planta estimados como las eficiencias se ubican bajo el 100%, lo cual permite su uso en la selección definitiva de puntos.

Tabla 6.16. Resumen de puntos seleccionados en la subcuenca del Melado*. Fuente: [MINENERGIA - DGA – DGF, 2014].

ID	ndaa	nsite	restiN	restiE	dz	sscName2	sscCod2	Qdis	Qeco	Qocu	Pin	FP	Pmed
21	2	1	6.028.327	316.917	215	RIO MELADO ENTRE ESTERO EL TORO Y RIO MAULE	7317	94,2	18,6	54,6	162	50	93,9
22	1	1	5.993.782	327.544	200	RIO GUAIQUIVILO ENTRE ESTERO RELBUN Y RIO DE LA PUENTE	7314	80	10,8	45,1	128	56	72,2
43	2	1	6.008.227	325.217	70	RIO MELADO ENTRE RIO DE LA PUENTE Y BAJO JUNTA ESTERO EL TORO	7316	109,8	13,1	57,7	62	50	32,3
58	1	1	6.009.212	324.891	300	RIO MELADO ENTRE RIO DE LA PUENTE Y BAJO JUNTA ESTERO EL TORO	7316	18	4,1	12,3	43	69	29,6
86	2	1	6.030.327	313.617	37	RIO MELADO ENTRE ESTERO EL TORO Y RIO MAULE	7317	126,8	22,2	69	37,5	50	20,4
327	1	1	5.975.627	329.517	120	RIO GUAIQUIVILO ENTRE ESTERO PERALES, CAJON TRONCOSA Y RIO RELBUN	7312	7,6	3,1	6,2	7,3	81,3	5,9

*Unidades de variables se detallan en **Tabla 6.15.**

Tabla 6.17. Factores de planta y eficiencias de puntos preseleccionados, calculadas en el análisis de consistencia. Fuente: Elaboración propia.

ID	Factor de Planta según Potencias [%]	Factor de Planta según Caudales [%]	Eficiencia [%]
21	57,9	58,0	0,82
22	56,4	56,4	0,82
43	52,5	52,6	0,82
58	68,5	68,3	0,82
86	54,4	54,4	0,82
327	80,8	81,6	0,82

En base a esta información se utiliza el modelo de elevación digital de la cuenca para estimar la ubicación de los puntos de captación asociados a las restituciones obtenidas de MINENERGIA - DGA – DGF [2014]. Los puntos de captación se utilizan para obtener los caudales simulados en cada uno, obteniendo así la información necesaria para calcular la energía generada. A continuación se resumen los pasos seguidos para estimar los puntos de captación:

- **Paso 1**: Se obtienen las elevaciones asociadas a las coordenadas de restitución.
- **Paso 2**: Se calcula la elevación de la captación sumando el dz.
- **Paso 3**: Se utiliza la elevación para estimar las coordenadas aproximadas del punto de captación.
- **Paso 4**: Se obtiene el área aportante al punto.

El supuesto principal considerado para estimar los puntos de captación es que estos se encuentran aguas arriba de la restitución, en el curso principal del río Guaiquivilo y Melado, según corresponda. En la **Tabla 6.18** se muestra un resumen de las coordenadas, elevaciones y áreas calculadas para cada uno de los puntos de captación estimados.

Tabla 6.18. Área, elevación y coordenadas UTM (WGS84) de los puntos de captación estimados. Fuente: Elaboración propia.

ID	dz [m]	Elevación Restitución [msnm]	Captación			
			Elevación [msnm]	UTM N	UTM E	Área [km^2]
21	215	709	924	6.008.516	325.175	1.834
22	200	1.083	1.283	5.973.217	332.528	406
43	70	925	995	6.002.895	327.373	1.356
58	300	919	1.219	5.976.546	329.214	617
86	37	685	722	6.026.732	317.727	2.129
327	120	1.128	1.248	5.973.734	330.156	416

6.3.6 Manto Nival

Con el objetivo de complementar la información de precipitación disponible para la modelación hidrológica, y que permita a su vez evaluar la calidad de los datos meteorológicos generados sobre la zona de estudio, se realizó un estudio de imágenes satelitales Landsat 4, 5, 7 y 8 disponibles sobre la cuenca del río Maule en el periodo 1984-2015. En colores se indica el número de imágenes por pixel en la **Figura 6.22**, donde se aprecia que su disponibilidad varía tanto temporal (durante algunos años hay más imágenes disponibles) como espacialmente (la disponibilidad es limitada algunas veces por nubes sobre algunas zonas de la cuenca). Por ejemplo, en 1991 se aprecia que la mayor parte de la cuenca posee menos de 5 imágenes en la mayoría de los pixeles, mientras que en 2014 se tienen más de 35 imágenes en la mayoría de los pixeles.

El análisis del manto nival mediante el uso de imágenes satelitales está orientado a cumplir con cuatro objetivos principales:

i. Conocer la variabilidad espacio-temporal del equivalente en agua de la nieve (SWE por sus siglas en inglés: *Snow Water Equivalent*), caída sobre las cuencas de estudio.
ii. Conocer la variabilidad espacio-temporal de la cobertura de nieve (fSCA: *fractional Snow Covered Area*)
iii. Analizar la evolución espacio-temporal de ambas variables[10] (SWE y fSCA) para poder comprender de mejor manera los fenómenos de deshielo dentro de la cuenca y su influencia en el ciclo hidrológico (duración y ubicación).
iv. Realizar recomendaciones sobre la ubicación de futuras estaciones de monitoreo meteorológico.

Este trabajo se basa en la metodología presentada por Margulis *et al*. [2015] y se puede dividir en dos etapas principales:

1. Modelación o simulación del comportamiento de la nieve sobre la zona de estudio: en esta etapa se busca obtener una estimación inicial (que no utiliza datos del satélite Landsat) del comportamiento histórico de variables del manto, especialmente del equivalente en agua de la nieve.
2. La estimación inicial obtenida a través de la simulación es actualizada usando una técnica matemática llamada asimilación de datos. Esta técnica combina la información del modelo con las imágenes Landsat, obteniendo una estimación del equivalente en agua de la nieve de mayor exactitud y precisión que la original. Finalmente, este procedimiento puede ser validado utilizando datos tomados en terreno, en caso de que existan.

[10] En adelante se utilizarán las convenciones en inglés de ambas variables (SWE y fSCA) dado su uso masificado en la literatura científica del área.

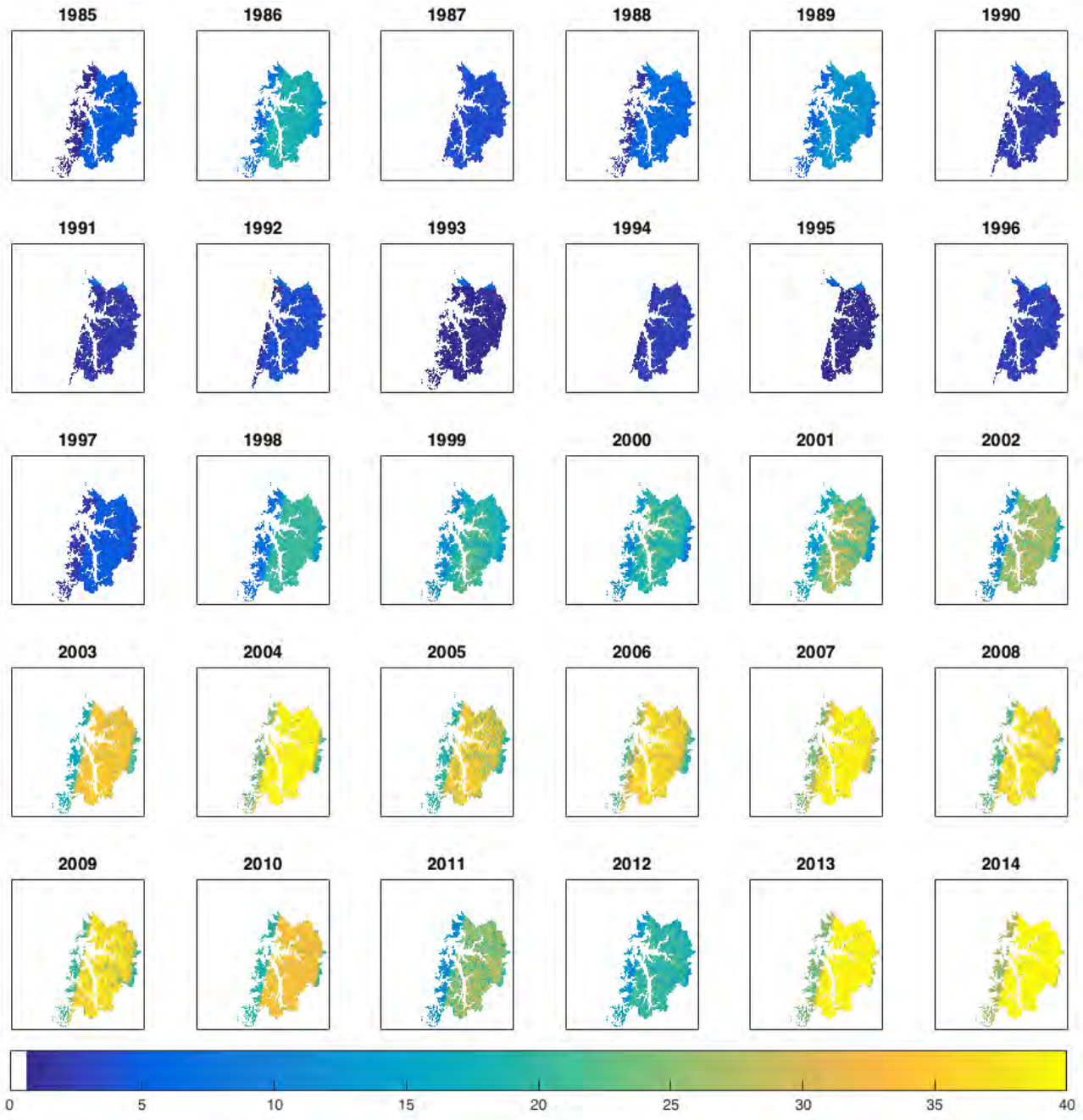


Figura 6.22. Imágenes disponibles para cada año hidrológico (abril a marzo) y para cada pixel de 30 [m] de resolución sobre la cuenca alta del Río Maule, para elevaciones sobre los 1.500 [msnm]. En colores se indica el número de imágenes por pixel, de acuerdo a la escala al pie de la figura. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 6.23** se presenta el esquema de la metodología empleada para obtener las series históricas definitivas de fSCA y SWE, en el periodo 1984-2015. La obtención de estas series de tiempo y su distribución espacial en la zona de estudio permite su uso para los fines de este estudio. Los detalles de los procesos representados y de la validación de los modelos utilizados en un contexto de hidrología de montaña se encuentran en Girotto *et al*.

[2014a; 2014b] y Margulis *et al*. [2015]. Los modelos han sido empleados para modelar cuencas chilenas de la zona central y centro-norte, con resultados exitosos [Cortés *et al*., 2013; Cortés *et al*., 2014b; Cortés, 2016].

Como fue mencionado anteriormente, uno de los objetivos de este ejercicio es poder estimar la elevación de la línea de nieves promedio. Conociendo la elevación permitirá definir con mayor precisión la subdivisión de las subcuencas en estudio al poder establecer una separación entre regímenes pluviales y regímenes nivales para las distintas bandas de elevación. La aplicación de imágenes satelitales para la subdivisión en bandas se detalla en el **Acápite 6.2**.

La metodología descrita anteriormente permite además analizar la distribución espacio-temporal del SWE, su variación en el tiempo en cada una de las bandas de elevación definidas. Esta información se emplea en la calibración de los modelos hidrológicos de las subcuencas en estudio, lo cual permite por un lado verificar la calidad de la información meteorológica utilizada al ofrecer información observada adicional a los caudales proporcionados por CDEC SIC [2015c] y por el otro lado contar con información adicional a los caudales, lo que aumenta la robustez de la calibración de parámetros del modelo.

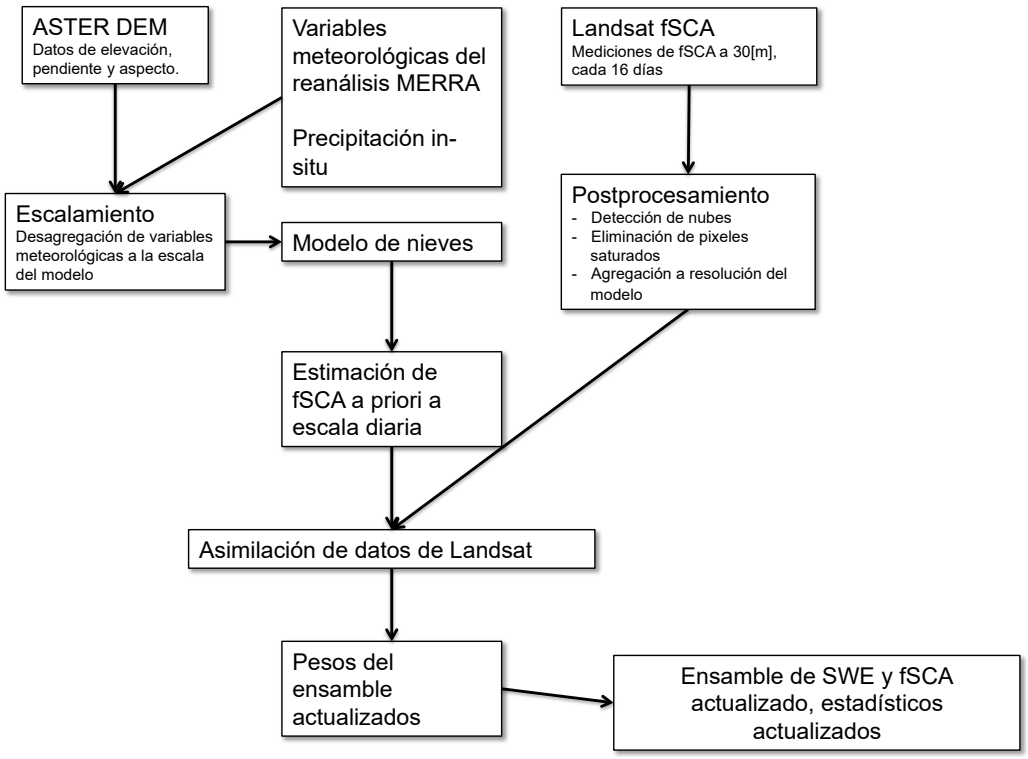


Figura 6.23. Esquema del algoritmo de modelación y asimilación de nieve. Fuente: Elaboración propia.

6.3.6.1 Definición de la línea de nieves

Para cada uno de los años con datos disponibles de imágenes Landsat (1984-2015) se contabiliza el número de veces en que la cobertura nival superaba el 25% sobre cada pixel.

El total de veces es dividido por el número de imágenes con datos no nulos disponibles durante ese año y para cada pixel (ver **Figura 6.22**), obteniendo una métrica que aproxima la fracción de tiempo (valor entre 0 y 1) para el cual se observa la presencia de nieves en cada pixel y año. Por ejemplo, una fracción de 0,4 representa una situación en que el pixel está cubierto por un 25% o más de nieve, por más de un 40% del tiempo. Considerando todos los años disponibles se calcula el promedio de esta métrica para la temporada invernal, definida entre abril y septiembre (ambos meses incluidos), lo cual se presenta en la **Figura 6.24**.

Para elevaciones mayores a 3.500 [msnm] (Melado, Invernada y Claro) se obtiene una presencia semi-permanente de nieve, con porcentajes anuales cubiertos del orden de 80%.

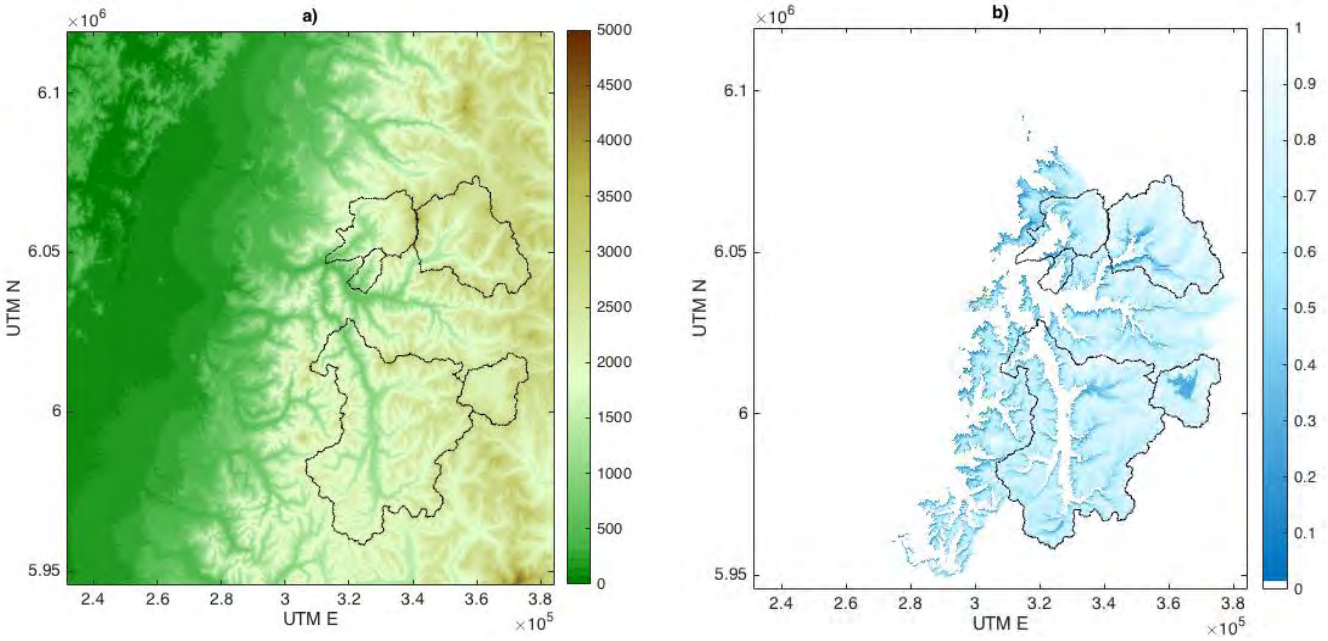


Figura 6.24. (a) Modelo de elevación digital (escala de colores: elevación en msnm) y (b) fracción del tiempo entre 0 y 1 (escala adimensional de colores) en que un pixel está cubierto por más de un 25% de nieve durante el invierno (abril a septiembre), en el periodo 1984-2015. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se discretizan las subcuencas en bandas de elevación de 50 metros, con el fin de observar posibles cambios en los patrones de acumulación de nieves. Este ejercicio se muestra en la **Figura 6.25**. La pendiente de las curvas obtenidas representa la sensibilidad de la presencia de cobertura nival respecto a la elevación, siendo posible estimar para todas las cuencas una variación del tiempo cubierto cercana al 4% por cada 100 m de incremento en elevación.

Como se observa, es posible distinguir un cambio en la pendiente de acumulación en torno a los 2.000 [msnm] para todas las subcuencas, salvo en Maule, donde todas las bandas se ubican sobre dicha elevación. En base a este criterio (cambio de pendiente), se han definido las líneas de nieve promedio de las subcuencas en estudio. La primera banda en Maule presenta una baja cobertura, lo cual se puede atribuir al efecto de la presencia de la Laguna del Maule, la cual no posee cobertura nival en ningún año (se conserva

permanentemente en estado líquido). En la **Tabla 6.19** se resume la estimación de la línea de nieves obtenida del análisis, para cada subcuenca.

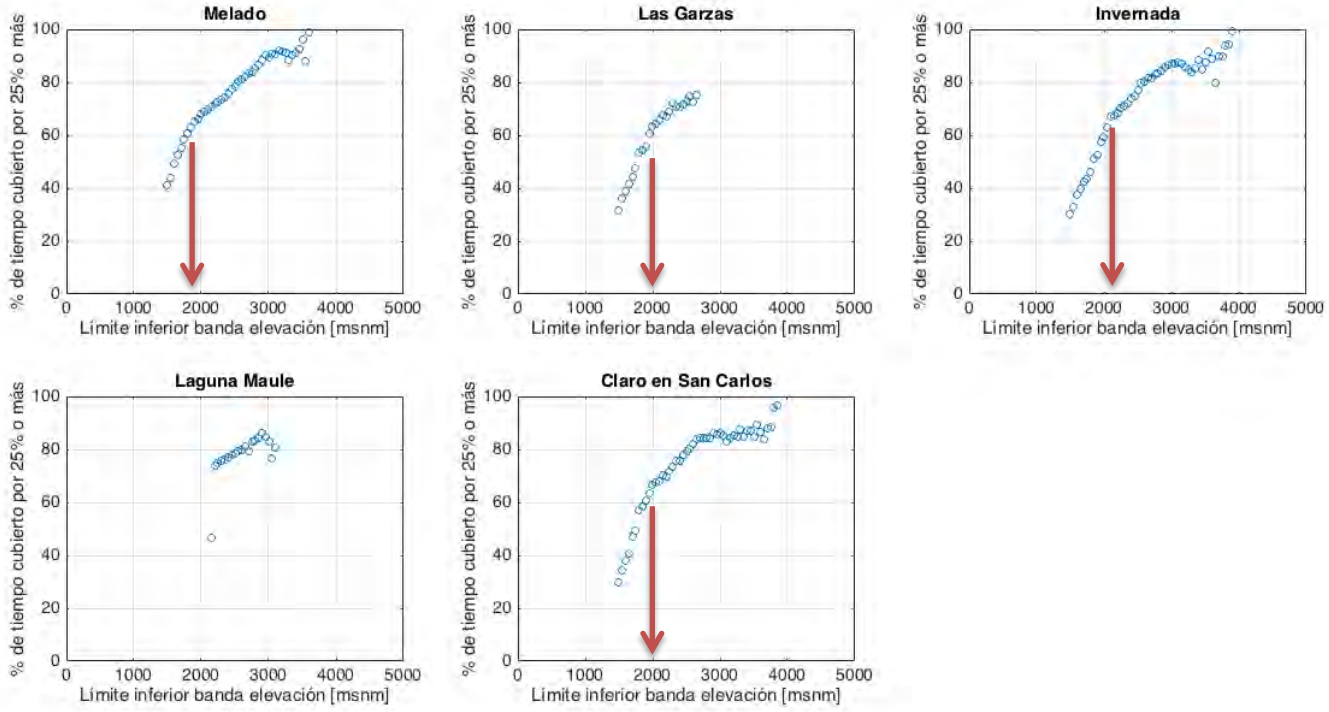


Figura 6.25. Cobertura nival promedio de la temporada invernal (1984-2015) para cada una de las subcuencas en estudio, para bandas de elevación cada 50 [m]. Flecha roja indica cambio de pendiente. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.19. Ubicación de la línea de nieves (LN), área nival total y porcentaje de área bajo la LN. Fuente: Elaboración propia.

Sistema	Elevación de LN [msnm]	Área Nival [km^2]	% Área bajo LN
Melado	1.900	1242	42%
Invernada	2.100	685	17%
Maule*	2.100	249	0%
Claro	2.000	191	53%
Garzas	2.000	15	82%

*El área de Maule no incluye el área de la Laguna del Maule (59,2 km^2).

6.3.6.2 Determinación del equivalente en agua de la nieve por banda de elevación

La distribución del equivalente en agua de la nieve en cada subcuenca se obtiene directamente de la relación entre la distribución espacio-temporal del SWE y la definición de las bandas de elevación determinada en el **Acápite 6.2**, en la **Tabla 6.4**.

En la **Figura 6.26** se presenta el SWE total mensual de cada subcuenca, junto con la precipitación de la estación Armerillo para el periodo 1976/77 – 2013/14 (360 meses) que se utiliza en la modelación hidrológica. En ambos casos se incluye el indicador de la anomalía de temperatura de la superficie del mar (SST) Niño 3.4, lo cual permite identificar aquellos años normales, Niño o Niña. Para calcular el SWE total de cada mes *i* Є [1, 360] se utiliza la siguiente ecuación:

$$SWE_i^{Total\ Mensual} = \frac{\sum_{j=1}^{k} SWE_i^j \cdot A_j}{\sum_{j=1}^{k} A_j}$$

Donde *k* es el número de bandas de una determinada subcuenca y A_j es el área de la banda j.

La **Figura 6.26** permite observar niveles de acumulación de nieve similares entre los sistemas, con diferencias en la variabilidad, salvo en Garzas, donde se aprecia una menor acumulación respecto las demás subcuencas. Se debe considerar que Garzas posee el área nival más pequeña de todos las subcuencas en análisis, tanto en magnitud como proporcionalmente al área total (ver **Tabla 6.19**).

Cabe señalar que este análisis solo ha considerado las bandas que se encuentran totalmente sobre los 1.500 [msnm], por lo que estos resultados subestiman en parte el SWE esperado para la zona de estudio.

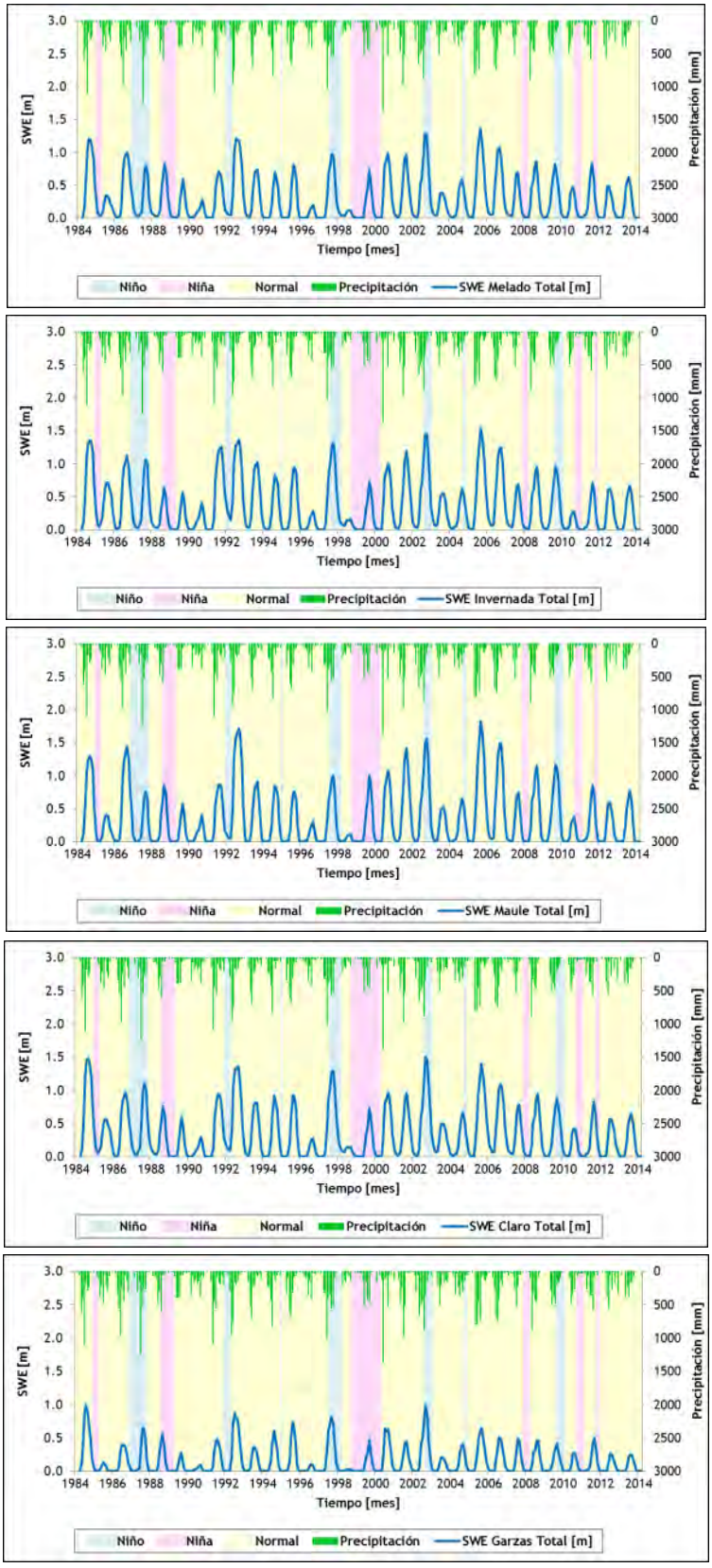


Figura 6.26. SWE total mensual y precipitación en Armerillo (1976/77 – 2013/14). Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 6.20** se presenta el resumen del SWE total mensual promedio por subcuenca. Se pueden observar diferencias entre los sistemas, las cuales se deben a las distintas elevaciones de cada una de las subcuencas. La máxima acumulación se produce en septiembre en todos los sistemas debido a que el mayor aporte de la precipitación a la acumulación se produce en los meses más fríos (junio, julio y agosto).

Para calcular el SWE total mensual promedio para cada subcuenca durante cada mes $t \in [1, 12]$, se utiliza la siguiente ecuación:

$$SWE_t^{Total\ Mensual\ Promedio} = \frac{\sum_{j=1}^{k} SWE_t^{Mensual\ Promedio\ Banda\ j} \cdot A_j}{\sum_{j=1}^{k} A_j}$$

Donde k es el número de bandas de una determinada subcuenca y A_j es el área de la banda j.

Tabla 6.20. Resumen del SWE total mensual promedio para cada subcuenca en estudio. Periodo 1984/85 - 2013/14. Fuente: Elaboración propia.

1984/85 - 2013/14	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
PP Armerillo [mm]	118,3	350,0	492,9	430,2	324,0	173,5	114,0	47,6	34,4	10,4	14,2	41,8
T° Colorado [°C]	13,5	10,4	8,5	7,6	9,0	10,8	13,0	15,7	18,0	19,6	19,2	17,2
SWE Melado Total [m]	0,021	0,077	0,287	0,532	0,684	0,744	0,597	0,353	0,157	0,060	0,029	0,019
SWE Invernada Total [m]	0,029	0,092	0,328	0,589	0,765	0,869	0,779	0,523	0,259	0,103	0,047	0,028
SWE Maule Total [m]	0,010	0,076	0,306	0,560	0,734	0,837	0,719	0,432	0,167	0,041	0,011	0,005
SWE Claro Total [m]	0,028	0,085	0,314	0,582	0,758	0,839	0,717	0,467	0,231	0,096	0,045	0,027
SWE Garzas Total [m]	0,003	0,035	0,171	0,341	0,435	0,439	0,301	0,136	0,039	0,009	0,002	0,001

En la **Tabla 6.21** se presenta un resumen de las características de cada subcuenca en el periodo observado. Se incluye el indicador SWE Máximo [m], utilizado para comparar el comportamiento de la acumulación entre las cuencas, para todo el periodo. Este indicador permite apreciar dónde se produce la mayor acumulación de agua por unidad de área y representa el promedio del máximo SWE total mensual de cada año del periodo. Se utiliza la siguiente ecuación para su cálculo, donde N es el número de años del periodo:

$$SWE_{Máximo} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^{N} máx\{SWE_1^n, SWE_2^n, SWE_3^n, \dots, SWE_{12}^n\}$$

Como se observa, existe una relación entre la elevación del 50% del área y el SWE Máximo Promedio de la cuenca, salvo en Claro, que muestra una mayor acumulación al esperado para su elevación media, ubicándose entre Maule e Invernada. Melado posee una elevación media mayor, pero su rendimiento es el menor (sin considerar Garzas).

Tabla 6.21. Área total de aporte nival, SWE Máximo y cota a la cual se encuentra el 50% del área total. Periodo 1984/85 - 2013/14. Fuente: Elaboración propia.

Subcuenca	Área Total de Aporte Nival [km^2]	SWE Máximo [m]	Cota 50% Área [msnm]
Melado	1.685	0,755	2.007
Invernada	756	0,872	2.552
Maule	249	0,846	2.407
Claro	297	0,848	1.964
Garzas	38	0,467	1.431

En la **Figura 6.27** se presenta el resumen de los promedios mensuales de SWE desagregados por banda y totales mensuales de Melado, junto con la precipitación mensual promedio de Armerillo y temperatura media mensual promedio de Colorado. Como se aprecia, la mayor acumulación de nieve se alcanza en septiembre, al comienzo de la temporada de deshielos, lo cual decrece paulatinamente hacia las bandas más bajas. De esta forma, la máxima acumulación de la banda inferior (B6) se produce en agosto, ya que es probable que durante el mes de septiembre las temperaturas limiten mayores acumulaciones e induzcan derretimiento.

La **Figura 6.28** presenta el mismo resumen para Invernada, donde se aprecia una mayor acumulación total respecto a Melado. De igual forma que los casos anteriores, la **Figura 6.29** presenta el resumen de SWE a nivel mensual de Maule, la **Figura 6.30** presenta el resumen de SWE a nivel mensual de Claro y la **Figura 6.31** presenta el resumen de SWE a nivel mensual de Garzas. De estas figuras se puede destacar la menor acumulación de nieves en la última banda (B4) de Maule, en la cual la Laguna del Maule ocupa cerca del 78% del área de esta banda.

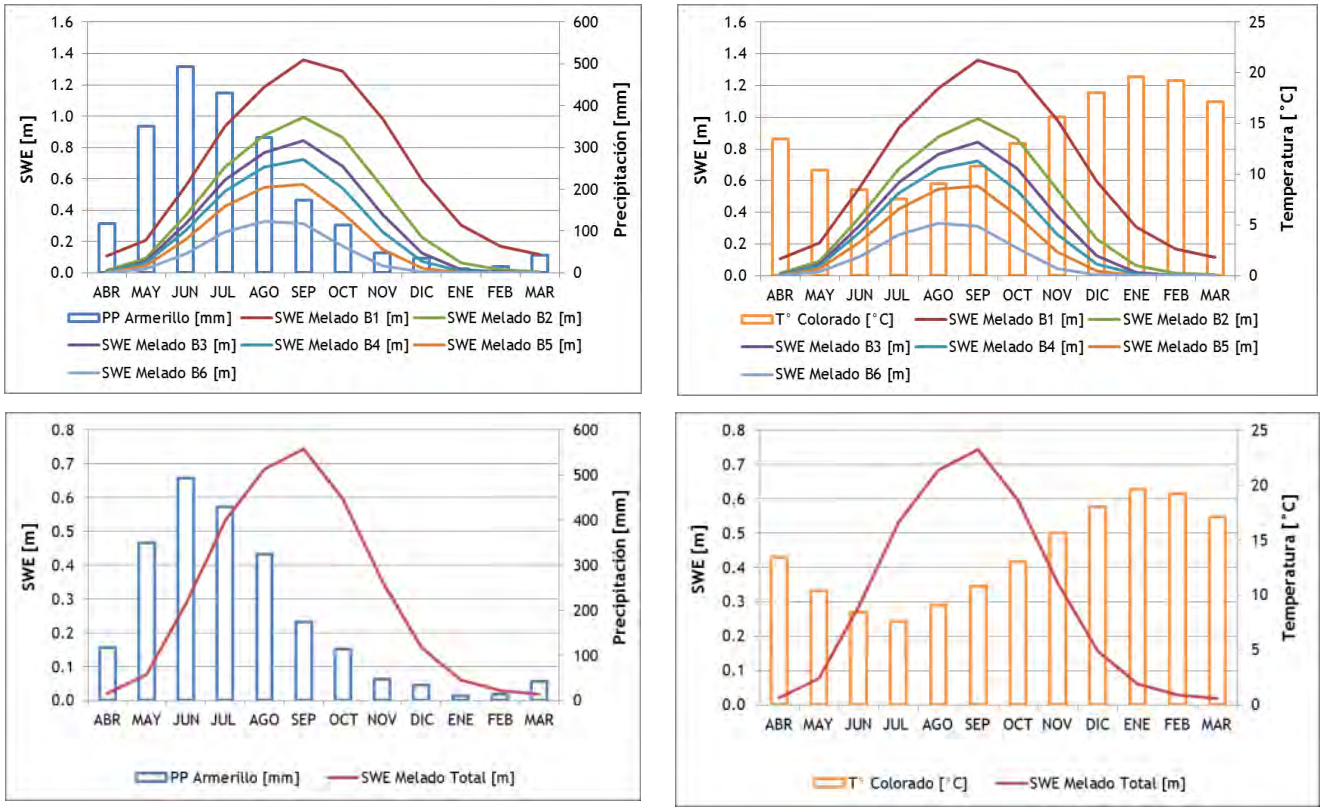


Figura 6.27. Resumen de los promedios mensuales de SWE desagregados por banda y SWE totales mensuales promedio en Melado, junto con la precipitación mensual promedio de Armerillo y temperatura media mensual promedio de Colorado. Periodo 1984/85 - 2013/14. Fuente: Elaboración propia.

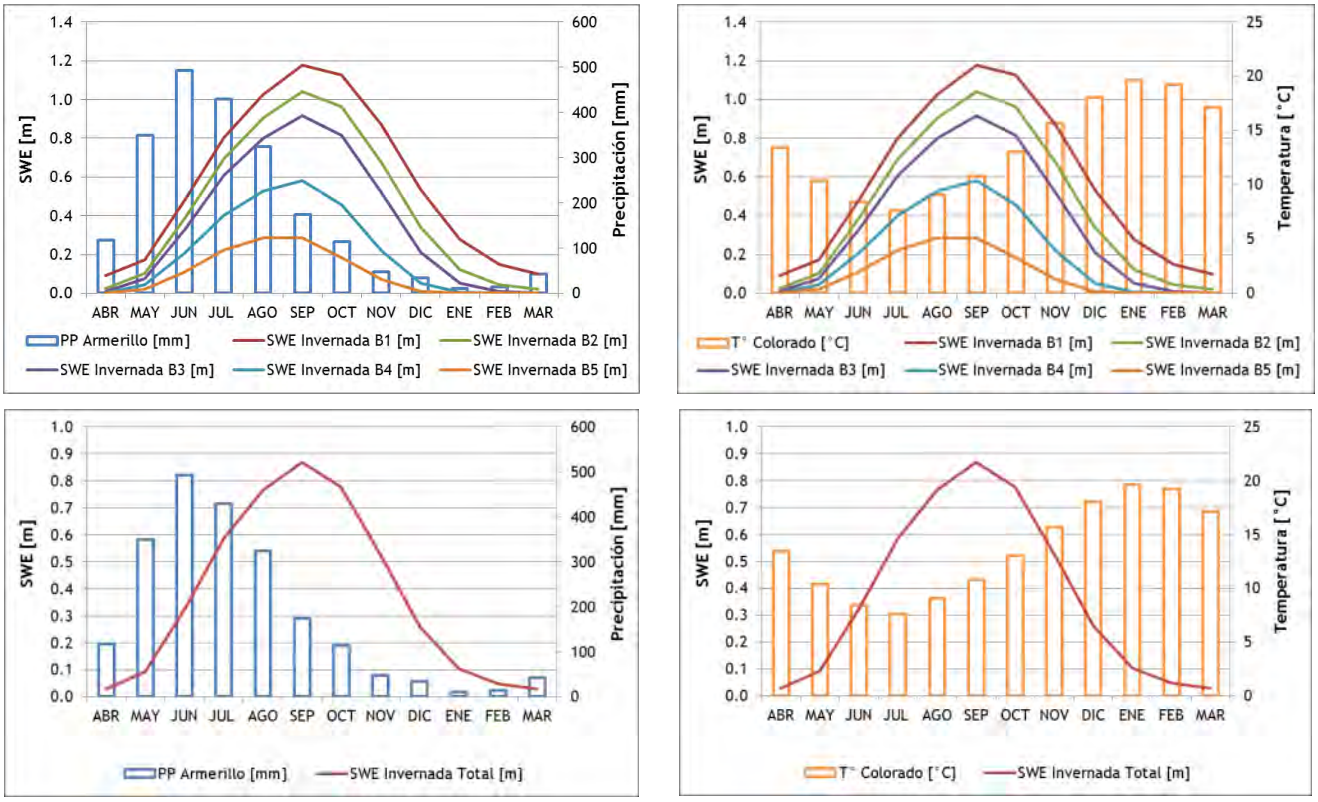


Figura 6.28. Resumen de los promedios mensuales de SWE desagregados por banda y SWE totales mensuales promedio en Invernada, junto con la precipitación mensual promedio de Armerillo y temperatura media mensual promedio de Colorado. Periodo 1984/85 - 2013/14. Fuente: Elaboración propia.

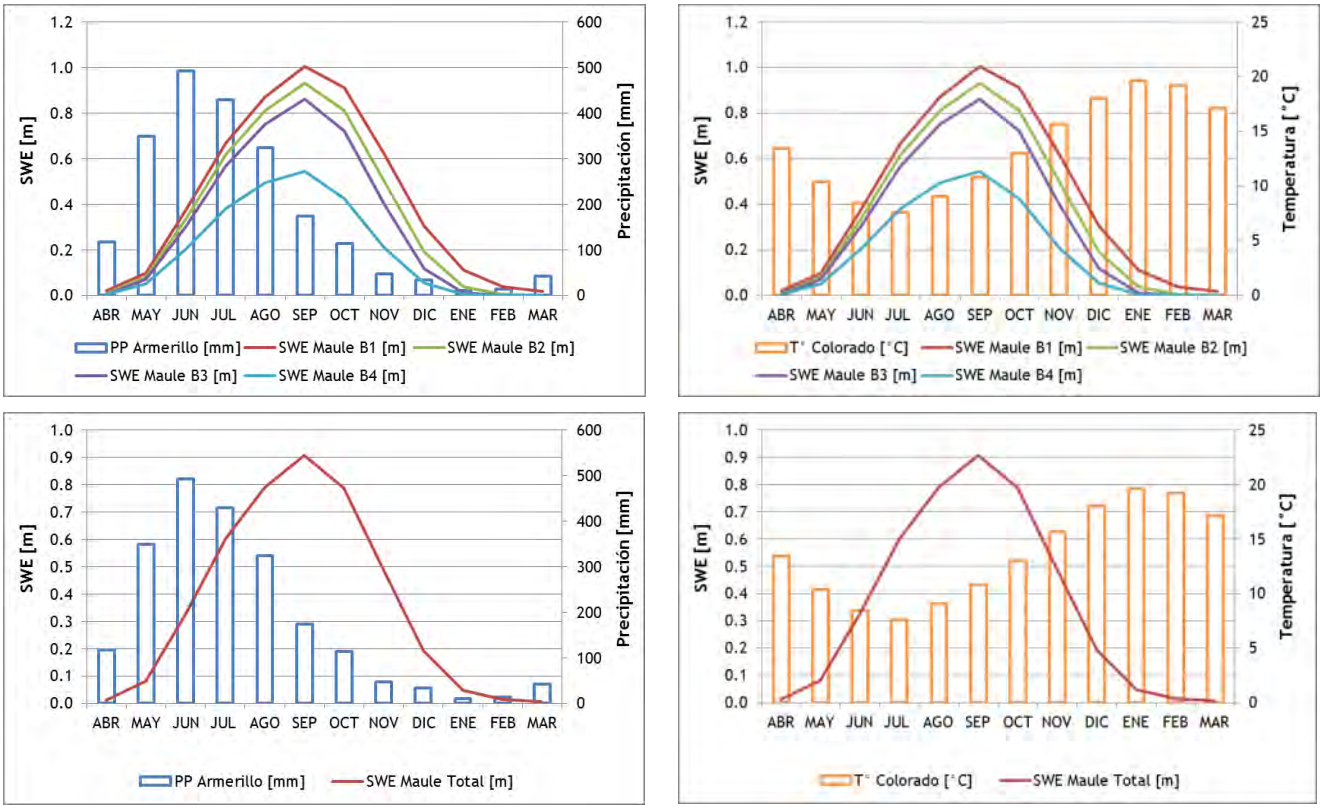


Figura 6.29. Resumen de los promedios mensuales de SWE desagregados por banda y SWE totales mensuales promedio en Maule, junto con la precipitación mensual promedio de Armerillo y temperatura media mensual promedio de Colorado. Periodo 1984/85 - 2013/14. Fuente: Elaboración propia.

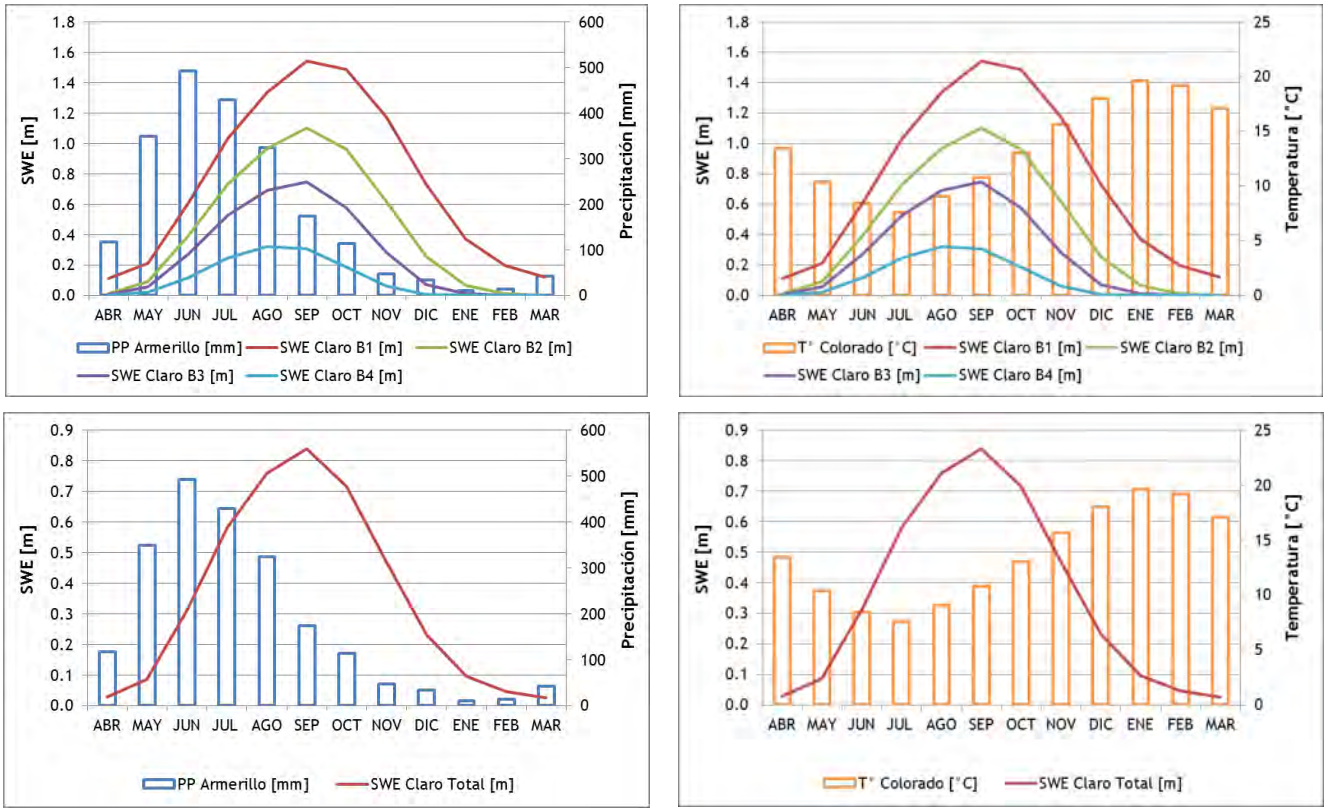


Figura 6.30. Resumen de los promedios mensuales de SWE desagregados por banda y SWE totales mensuales promedio en Claro, junto con la precipitación mensual promedio de Armerillo y temperatura media mensual promedio de Colorado. Periodo 1984/85 - 2013/14. Fuente: Elaboración propia.

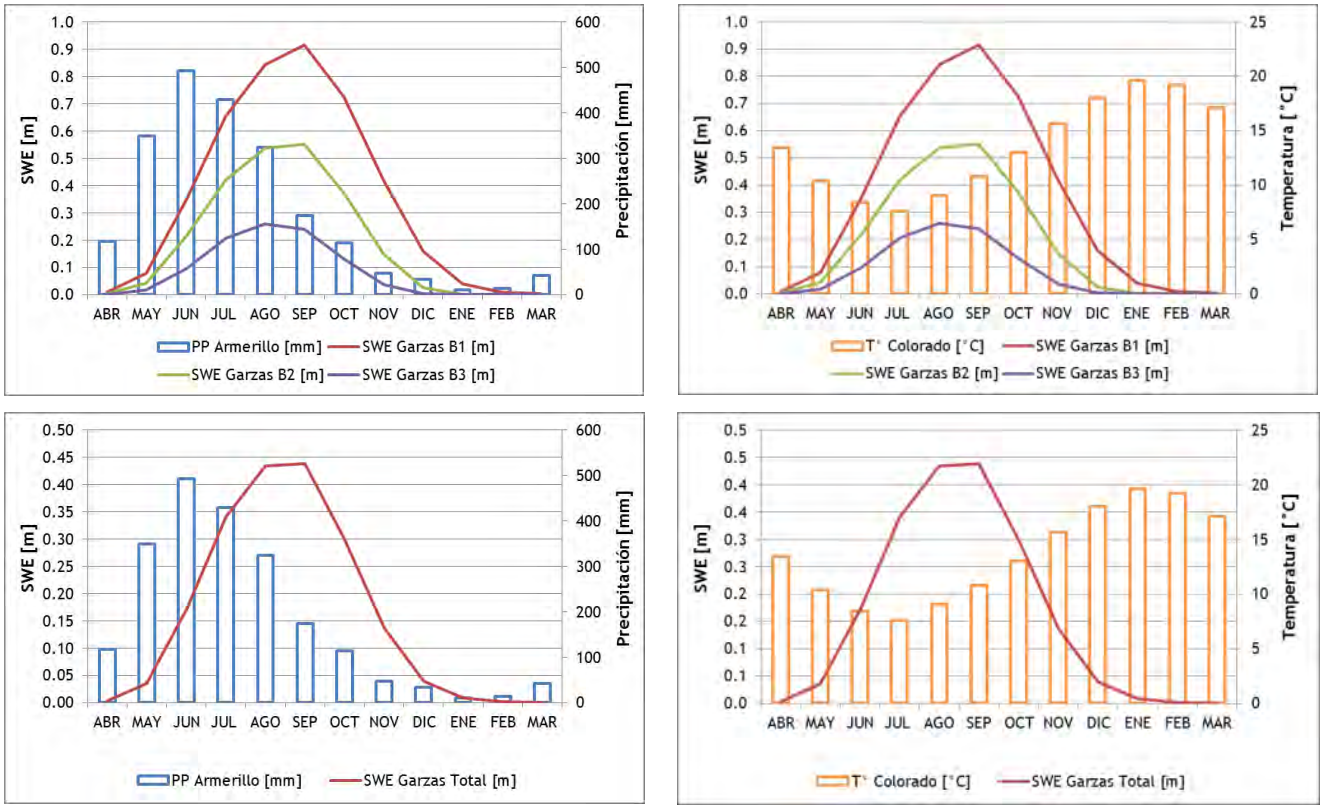


Figura 6.31. Resumen de los promedios mensuales de SWE desagregados por banda y SWE totales mensuales promedio en Garzas, junto con la precipitación mensual promedio de Armerillo y temperatura media mensual promedio de Colorado. Periodo 1984/85 - 2013/14. Fuente: Elaboración propia.

6.4 Modelos de Circulación General

En el presente acápite se presenta la metodología utilizada para la selección definitiva de los modelos de circulación general (MCG) que se emplean para la evaluación de impactos en los capítulos siguientes.

Para este estudio se utiliza la base de datos de NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Climate Projections* (NEX-GDDP)[11] . Esta base de datos se detalla en el **Anexo 4** consiste en los resultados de las simulaciones de 21 MCG utilizados en el *Coupled Model Intercomparison Project Phase* 5 (CMIP5), e incluyen escenarios de línea base y futuros (RCP 4.5 y 8.5) simulados para todo el mundo, entre 1950 y 2100. La resolución espacial de la base de datos es de 0,25° x 0,25°.

La selección de los MCG se realiza considerando los datos observados de temperatura (estación Colorado) del periodo 1976-2005, mientras que para la precipitación (estación Armerillo) los datos disponibles corresponden al periodo 1960-2005. El periodo considerado para la temperatura es menor debido a la inexistencia de datos para la estación Colorado

[11] Base de datos disponible en sitio web: https://nex.nasa.gov/nex/projects/1356/

previo a 1970, además de la posible existencia de datos erróneos medidos en la estación hasta 1975.

6.4.1 Metodología de análisis

La selección de los MCG se realiza evaluando la consistencia de la climatología de cada uno de los 21 MCG respecto a la climatología observada en las estaciones de precipitación y temperatura de referencia. Se busca seleccionar aquel modelo en que la variabilidad y estacionalidad de las variables simuladas sea consistente con la variabilidad y estacionalidad observada en las estaciones meteorológicas en las que se realiza el escalamiento espacial. Adicionalmente, con el fin de reducir la incertidumbre de las proyecciones futuras se ha considerado adecuado evitar que la selección de los modelos represente una condición sesgada respecto al conjunto o ensamble de los 21 MCG.

De acuerdo con estos criterios, se han definido una serie de métricas que permiten evaluar la relación de cada MCG con las estaciones meteorológicas seleccionadas. A continuación se resumen los tres criterios considerados:

i. Representación de la estacionalidad: Se busca seleccionar a los MCG que representen de mejor forma la estacionalidad de las variables observadas.

i. Representación de la variabilidad: Se busca seleccionar a los MCG que representen de mejor forma la variabilidad temporal de las variables observadas.

ii. Representatividad del cambio en escenarios futuros: Se realiza un ensamble de las proyecciones de cambio climático de los 21 MCG y se busca seleccionar a los MCG que representen de mejor forma dicho ensamble.

A continuación se presentan los métodos utilizados para obtener las métricas antes señaladas.

6.4.1.1 Análisis de la estacionalidad

Para analizar la consistencia de la estacionalidad entre MCG y datos observados, se establecieron métricas o indicadores diferentes para la precipitación y temperatura. El objetivo de estas métricas es evaluar la desviación de los promedios mensuales respecto a un promedio anual. En el caso de la precipitación, se definen las siguientes variables:

$$PP_i = \frac{\sum_{j=1}^{N} PP_j^{mes\ i}}{N}$$

Donde *j* ∈ [1976, 1976+N], *N* es el número de años de línea base de cada MCG evaluado, *i* ∈ [1, 12] y representa a cada mes del año. De esta forma, para cada MCG se obtienen 12 valores de *PPi* correspondientes a la precipitación mensual promedio del periodo de línea base. Además de este valor, se requiere calcular la precipitación total anual promedio de cada MCG, lo cual se obtiene de las siguientes ecuaciones, considerando las mismas variables ya definidas:

$$PP_j = \sum_{i=1}^{12} PP_{mes\ i}^{j} \quad \rightarrow \quad PP_{anual\ prom} = \frac{\sum_{j=1}^{N} PP_j}{N}$$

Finalmente, se calcula el indicador *Ri* como:

$$R_i = \frac{PP_i}{PP_{anual\ prom}}$$

El valor de *Ri* se define para cada mes *i*. Este indicador puede ser interpretado como la "proporción de precipitación mensual promedio respecto a la precipitación anual promedio". Esta serie de 12 indicadores se obtiene para cada uno de los 21 MCG, así como para la estación pluviométrica seleccionada. Los indicadores fueron obtenidos interpolando los valores de los MCG al punto de análisis (escalamiento espacial). La metodología de escalamiento espacial considerada consiste en una interpolación bilineal entre los cuatro puntos más cercanos de la grilla de MCGs. A continuación, se evalúa que exista una adecuada correlación entre la serie de *Ri* observados y *Ri* simulados por cada MCG, lo cual se muestra en la **Figura 6.32**.

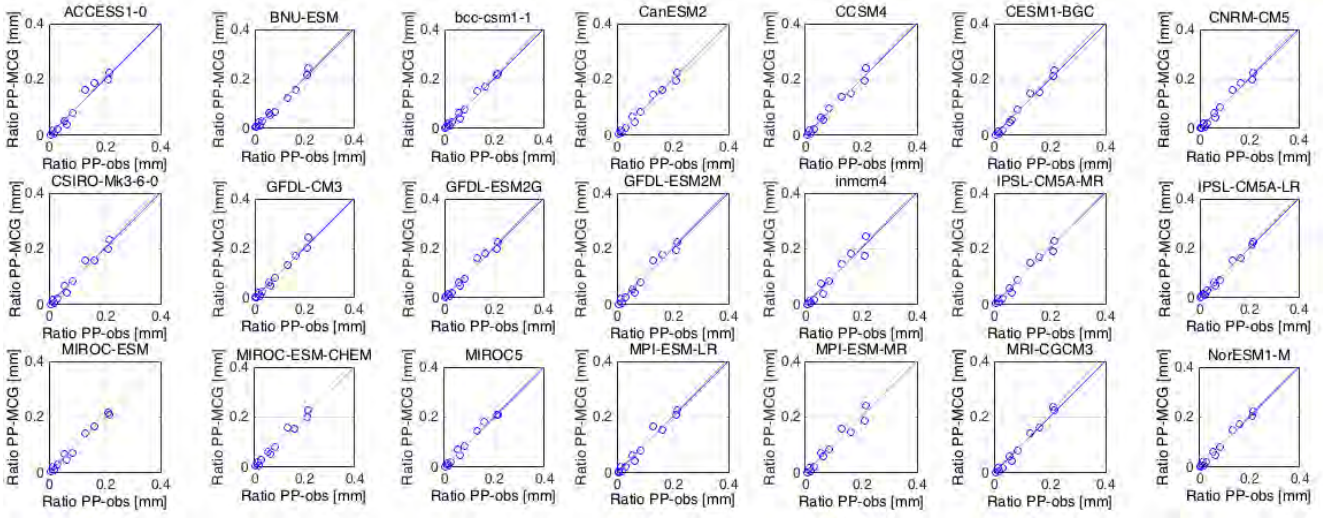


Figura 6.32. Correlación entre Ri observado y Ri modelado (precipitación). Fuente: Elaboración propia.

Para la temperatura se calculó el valor *Di*, el cual puede ser interpretado como la "desviación de temperatura media mensual promedio respecto a la temperatura media anual promedio" utilizando la siguiente ecuación:

$$D_i = (T_i - T_{anual})$$

Donde *Ti* es la temperatura media mensual promedio y T_{anual} la temperatura media anual promedio:

$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^{N} T_{mes\ i}^{j}}{12} \quad \rightarrow \quad T_{anual} = \frac{\sum_{j=1}^{N} T_j}{N}$$

En la **Figura 6.33** se presentan las correlaciones entre la serie de *Di* observados en la estación meteorológica y *Di* simulados por cada MCG, donde se observa una consistencia general equivalente o mejor que la obtenida en el caso de la precipitación.

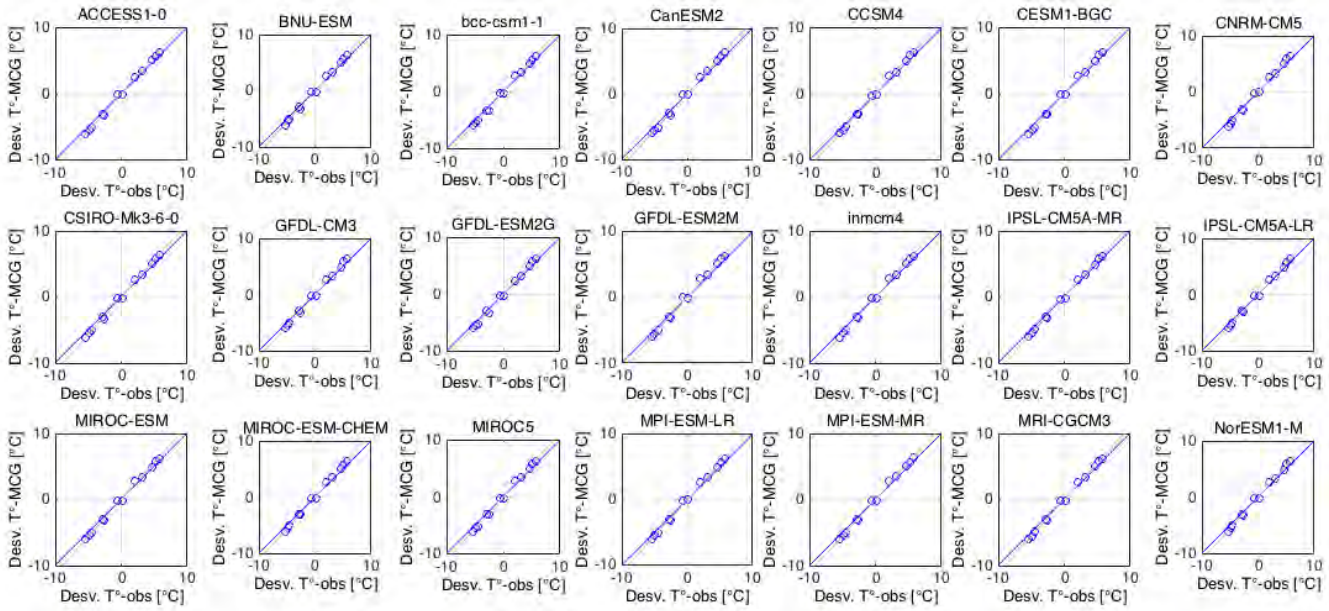


Figura 6.33. Correlación entre Di observado y Di modelado (temperatura). Fuente: Elaboración propia.

El objetivo de estos dos indicadores es medir la consistencia de la estacionalidad de los MCG con respecto a los datos observados. En cada caso se calculó la correlación (R^2) y el error cuadrático medio (ECM) para los índices *Ri* y *Di*, para cada modelo. De esta forma, se obtienen 2 subindicadores a partir de *Ri* (*Ri_*R^2 y *Ri_ECM*) y 2 subindicadores a partir de *Di* (*Di_*R^2 y *Di_ECM*).

En general se observa una adecuada representación de la estacionalidad para todos los modelos, con coeficientes de correlación en el rango de 0,99 para todos los casos analizados (precipitación y temperatura).

Sin embargo, el ajuste de la estacionalidad obtenido no implica un ajuste adecuado entre los valores observados y modelados. El índice de estacionalidad *Ri* simplemente indica si la proporción de precipitación simulada por los modelos para cada mes es similar a la observada. Si bien el análisis de *Ri* muestra resultados adecuados, los modelos presentan un sesgo negativo de precipitación para la zona, tal como lo evidencia la **Figura 6.34**.

Los modelos tienden a presentar una precipitación mensual promedio máxima de 200 [mm] aproximadamente, mientras que los valores observados alcanzan máximos cercanos a los 500 [mm]. En términos de precipitación total anual promedio, los valores modelados presentan solo alrededor de un 20% de la precipitación total anual observada. Es probable que este sesgo se deba a que los MCG presentan una grilla original más gruesa que 0.25°x 0.25° (entre 0,7° y 3,75° de latitud), lo que se traduce en que el efecto orográfico de la cordillera no logra ser capturado a pesar del escalamiento previo realizado por la NASA en la base de datos NEX-GDDP.

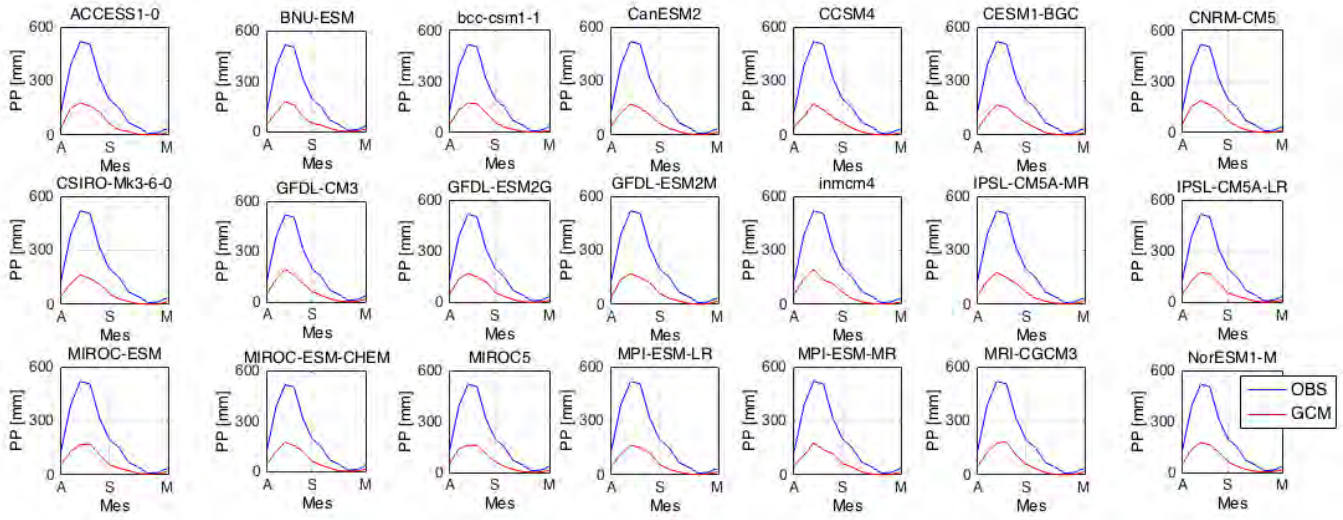


Figura 6.34. Precipitación mensual promedio, para modelos y para datos observados en Armerillo (A.H. = Año hidrológico). Periodo 1976-2005. Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, el índice de estacionalidad *Di* indica si la oscilación mensual de la temperatura representada por el modelo es consistente con la oscilación mensual observada. La **Figura 6.35** muestra las temperaturas media mensual promedio para cada uno de los modelos, donde se observa que el sesgo entre valores observados y modelados es proporcionalmente menor que en la precipitación, del orden de 1°C.

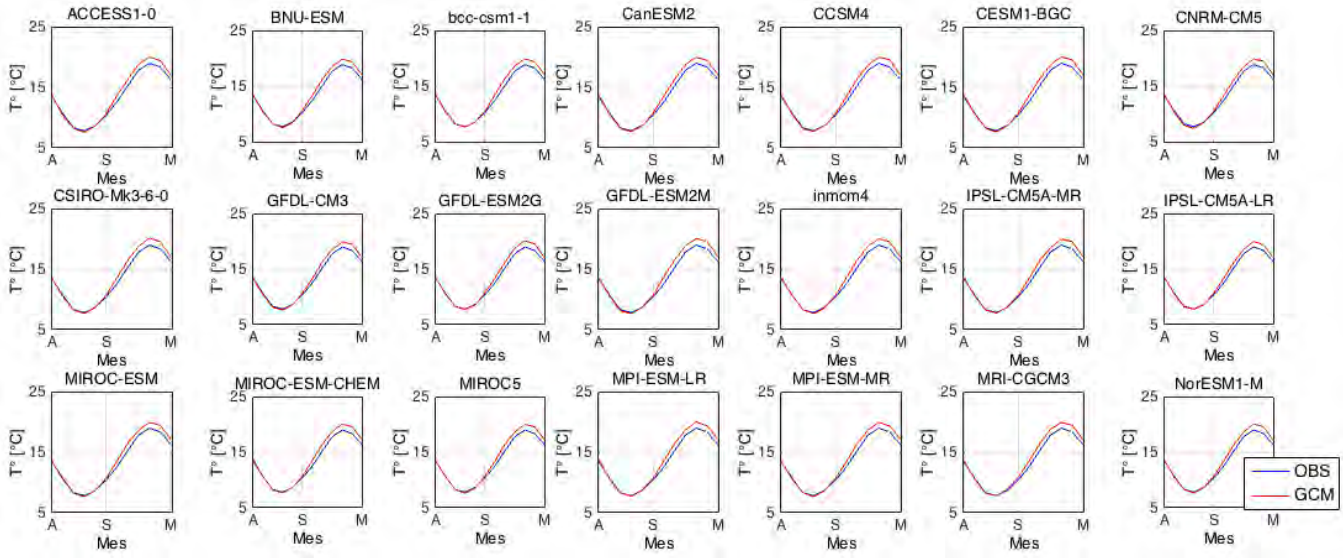


Figura 6.35. Temperatura media mensual promedio, para modelos y para datos observados en Colorado (A.H. = Año hidrológico). Periodo 1976-2005. Fuente: Elaboración propia.

La diferencia entre los sesgos observados de la precipitación y la temperatura se podría deber a que gran parte de la variabilidad de la temperatura se debe únicamente a la elevación (asumiendo una misma latitud o región geográfica), mientras que la precipitación presenta mayores variaciones espaciales debido a la orografía, meteorología y la circulación

atmosférica. Estos elementos introducen una variabilidad difícil de corregir realizando solamente interpolaciones espaciales y correcciones por elevación.

El ranking de modelos en base a estos dos indicadores se presenta en el **Acápite 6.4.2**, junto con el ranking obtenido a partir de las otras métricas evaluadas.

6.4.1.2 Análisis de la variabilidad

La variabilidad histórica de las variables simuladas por los MCG en el periodo concurrente de línea base no es temporalmente consistente con el registro observado. Por ejemplo, un año seco de la serie histórica observada no será reproducido necesariamente por la simulación del MCG, por lo cual no es posible comparar directamente los valores de los MCG con los datos observados. La comparación se debe hacer mediante estadísticos representativos de periodos definidos. Por ejemplo, para la línea base, es esperable que los modelos sean capaces de representar la variabilidad y media observada en las variables meteorológicas simuladas.

Para cumplir con el objetivo de seleccionar modelos que representen adecuadamente la variabilidad se utilizan las curvas de duración de las series de tiempo de precipitación y temperatura, tanto de los MCG como de los valores observados en las estaciones seleccionadas. Se compara la curva de duración observada con cada una de las curvas de duración de los MCG y se calcula el coeficiente de correlación R^2 en cada caso. Un mayor R^2 implica que el MCG en cuestión representa mejor la variabilidad observada y, por ende, es preferible sobre MCGs de R^2 menores. Es importante aclarar que este índice no considera los posibles sesgos entre MCG y valores observados, los cuales son corregidos a través de la metodología de downscaling.

La **Figura 6.36** muestra la correlación de la variabilidad para la precipitación, donde se puede apreciar que la distribución de precipitaciones de los MCG es consistente con los valores observados para el rango observado entre 0 y 1000 [mm/mes]. También es posible observar un sesgo negativo generalizado de los MCG, es decir, que los valores simulados son menores que los observados. Pese a esto, hay varios modelos como el BNU-ESM, BCC-CSM1-1, GFDL-ESM2M y MPI-ESM-LR que mantienen una proporción estable entre valores modelados y observados a lo largo de toda la curva.

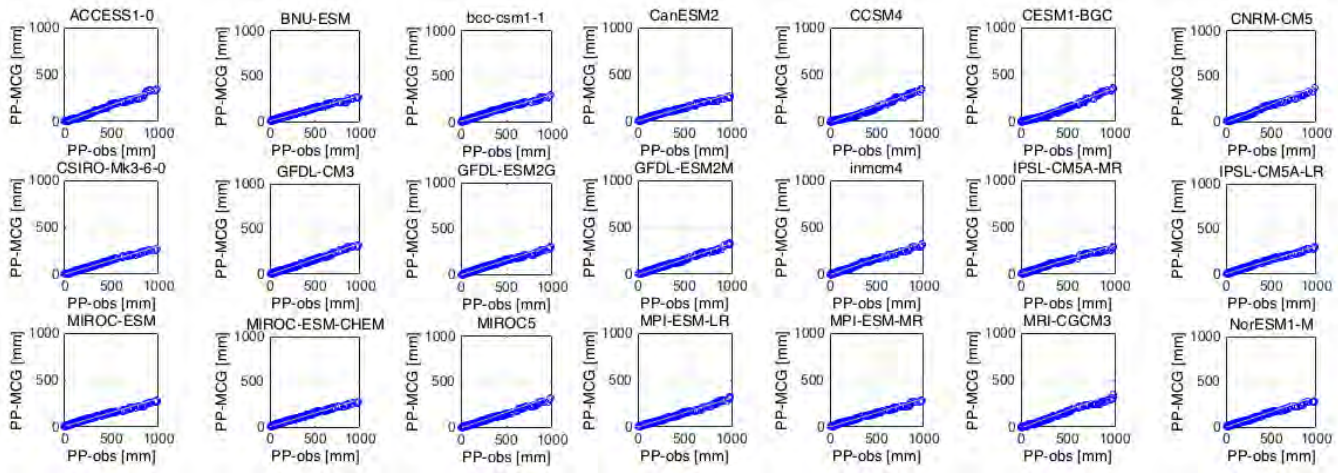


Figura 6.36. Correlación de curvas de duración de los MCG con la curva de duración de precipitaciones mensuales observadas en Armerillo. Periodo 1976-2005. Fuente: Elaboración Propia.

La **Figura 6.37** muestra la correlación de la variabilidad para la temperatura media, donde se aprecia una leve inconsistencia entre valores modelados y observados para la parte baja de la curva, para temperaturas medias mensuales observadas en torno a los 5°C. Esta no uniformidad en la relación entre temperaturas modeladas y observadas indica de forma preliminar que la metodología de escalamiento no puede ser aplicada a nivel anual, sino que se debe hacer una evaluación de las relaciones de escalamiento a nivel mensual.

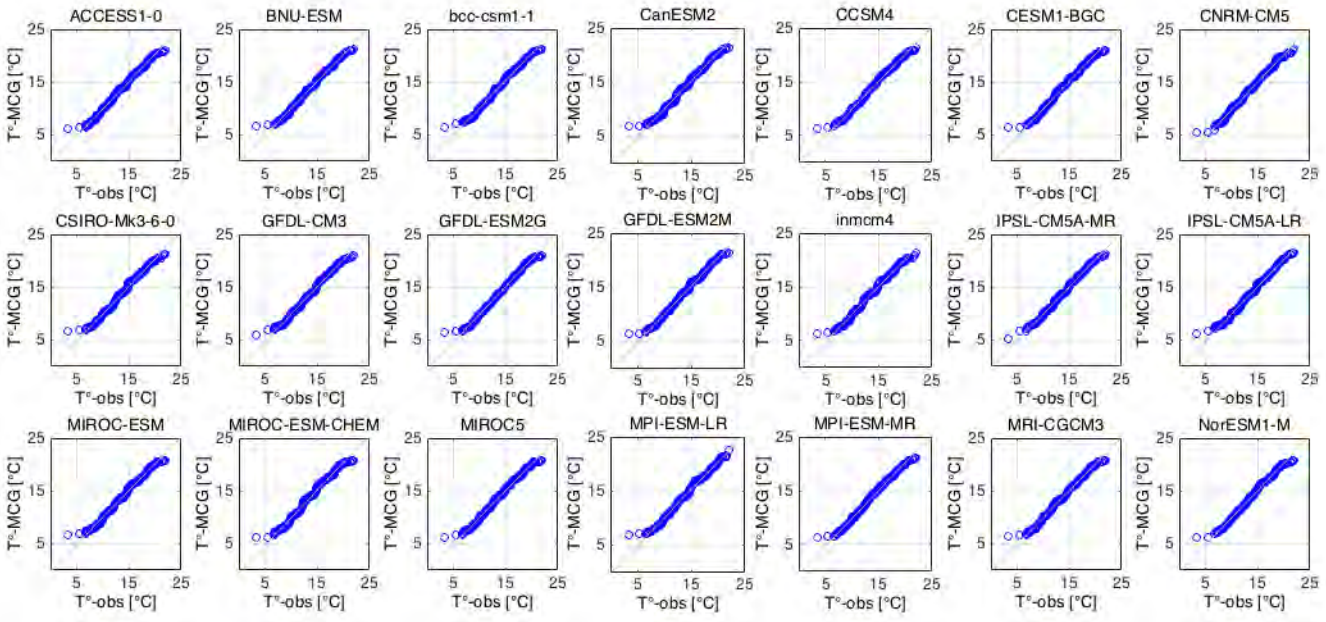


Figura 6.37. Correlación de curvas de duración de los MCG con la curva de duración de temperaturas medias mensuales observadas en Colorado. Periodo 1976-2005. Fuente: Elaboración Propia.

6.4.1.3 Análisis del ensamble de MCG

Se analiza la representatividad de cada uno de los modelos seleccionados respecto al posible cambio en temperaturas y precipitaciones estimado por el ensamble de los 21 MCG.

El objetivo de este análisis es asegurar que los MCG seleccionados (3) sean representativos del cambio que el ensamble de todos los modelos (21) muestra para el futuro. Este paso es necesario para poder asegurar que la proyección de temperaturas y precipitaciones futuras no sea sesgada hacia valores altos o bajos. Para esta métrica o indicador se evalúa la distancia del cambio en precipitaciones y temperaturas del MCG analizado con respecto a la mediana del ensamble de todos los modelos, empleando las siguientes ecuaciones:

$$MT_i = |\Delta T_i - \Delta T_{med}|$$

$$MP_i = |\Delta P_i - \Delta P_{med}|$$

Donde MT_i y MP_i representan la desviación absoluta del cambio de temperatura (ΔTi) y precipitación (ΔPi) para el modelo *i* respecto a la mediana del ensamble de modelos (ΔT_{med} y ΔP_{med}). El cambio de temperaturas se define como la diferencia entre el periodo línea base y el periodo 2070-2099, en el escenario de emisiones RCP8.5, proyectado al punto de interés a través de una interpolación espacial de la grilla MCG basada en el inverso de la distancia. Esta decisión fue realizada con el objetivo de asegurar que el escenario de mayor impacto (emisiones altas a fines del siglo XXI) esté bien representado.

Los valores de precipitación MP_i fueron normalizados por la media de la precipitación total anual promedio modelada en periodo base 1976-2005 ($PP_{anual\ prom}$), dado que algunos MCG pueden presentar sesgos húmedos o secos (respecto a la media de todos los modelos) en este periodo. La **Figura 6.38** ilustra la distribución del cambio en temperaturas y precipitaciones para cada modelo en el escenario RCP8.5 y periodo 2070-2099. Se puede apreciar que la mayoría de los modelos estima que ocurrirán fuertes reducciones en la precipitación anual e incrementos de temperatura del orden de 2°C a 3°C. Utilizando los datos fueron calculados los siguientes valores:

- La mediana de cambios en precipitación es de un -31,3%.
- La mediana de cambios en temperatura es de 2,75°C

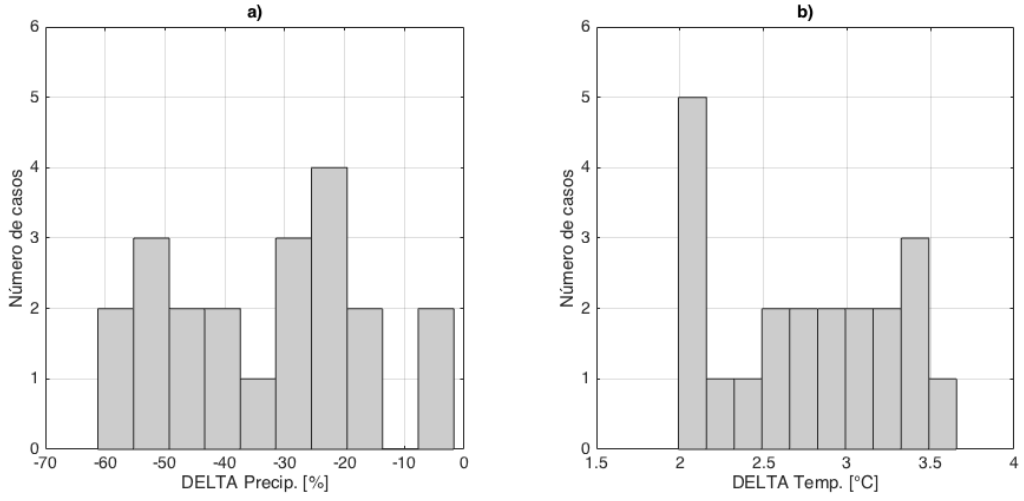


Figura 6.38. Distribución de cambios en a) y b), para precipitación (ΔP_{med}) y temperatura (ΔT_{med}), respectivamente. Escenario RCP8.5, periodo 2070-2099. Fuente: Elaboración propia.

6.4.2 Selección de MCGs

Los indicadores determinados en el acápite anterior se presentan en la **Tabla 6.22**, donde se aprecian en general leves diferencias en los análisis de estacionalidad y variabilidad.

Los indicadores de correlación (R^2) y error cuadrático medio (ECM) calculados en el análisis de estacionalidad no fueron considerados dado que la variación intermodelo es mínima. En el caso de la correlación estacional de la temperatura (*Di_R*^{2}) ésta varía entre 0,9975 y 0,9986, mientras que para precipitación (*Ri_R*^{2}) la correlación varía entre 0,9744 y 0,9946. En el caso del error cuadrático medio, la temperatura (*Di_ECM*) varía entre 0,46°C y 0,58°C, mientras que para la precipitación (*Ri_ECM*) varía entre 0,8% y 1,8%.

El indicador de variabilidad de la temperatura tampoco fue considerado debido a las leves diferencias existentes entre los distintos modelos: la correlación mínima fue de 0,9952 mientras que la correlación máxima fue de 0,9975.

El indicador de variabilidad de precipitaciones fue el principal determinante a la hora de escoger que modelos utilizar, seguido de la evaluación de la representatividad del ensamble. Los MCG **BCC-CSM1-1, BNU-ESM** y **MPI-ESM-LR** presentan una buena consistencia con la mediana del ensamble de cambios, junto con una buena representación de la variabilidad de la precipitación, por lo tanto, son los modelos seleccionados para la evaluación de impactos del cambio climático. Por simplicidad, en adelante se utilizarán las abreviaciones indicadas en la **Tabla 6.23** para hacer referencia a cada MCG.

Tabla 6.22. Resultados de los indicadores calculados para la selección de los MCG. Fuente: Elaboración propia.

MCG	Análisis Estacionalidad				Análisis Variabilidad		Análisis Ensamble	
	Precip (R_i)		Temp (D_i)		Precip	Temp	Precip [%]	Temp [°C]
	R^2	ECM	R^2	ECM	R^2	R^2	$MP_i/PP_{anual\ prom}$	MT_i
'ACCESS1-0'	0,987	0,014	0,999	0,378	0,991	0,997	-29,649	-0,170
'BNU-ESM'	0,994	0,010	0,999	0,346	0,997	0,997	10,049	0,000
'BCC-CSM1-1'	0,994	0,010	0,999	0,347	0,997	0,996	10,482	-0,510
'CanESM2'	0,995	0,008	0,999	0,382	0,993	0,996	-5,029	1,310
'CCSM4'	0,995	0,009	0,999	0,343	0,976	0,997	-8,896	0,160
'CESM1-BGC'	0,997	0,008	0,998	0,427	0,970	0,996	15,112	-0,050
'CNRM-CM5'	0,986	0,014	0,999	0,368	0,967	0,997	10,856	0,760
'CSIRO-Mk3-6-0'	0,990	0,012	0,998	0,432	0,993	0,996	24,778	-0,280
'GFDL-CM3'	0,994	0,010	0,998	0,387	0,992	0,996	-17,867	0,420
'GFDL-ESM2G'	0,988	0,012	0,998	0,433	0,993	0,997	-24,445	-0,600
'GFDL-ESM2M'	0,989	0,012	0,999	0,362	0,996	0,997	-21,545	-0,910
'INM-CM4'	0,977	0,017	0,999	0,392	0,980	0,996	9,387	-0,930
'IPSL-CM5A-MR'	0,993	0,009	0,999	0,309	0,985	0,998	-16,800	0,790
'IPSL-CM5A-LR'	0,994	0,009	0,999	0,386	0,998	0,997	-15,412	0,760
'MIROC-ESM'	0,995	0,008	0,999	0,315	0,987	0,996	-11,197	0,640
'MIROC-ESM-CHEM'	0,993	0,009	0,999	0,458	0,995	0,995	-13,620	0,980
'MIROC5'	0,993	0,010	0,998	0,356	0,971	0,997	0,000	-0,830
'MPI-ESM-LR'	0,988	0,013	0,998	0,368	0,997	0,996	5,675	0,460
'MPI-ESM-MR'	0,990	0,011	0,999	0,364	0,992	0,997	5,557	0,320
'MRI-CGCM3'	0,994	0,011	0,999	0,294	0,965	0,997	32,055	-0,990
'NorESM1-M'	0,995	0,008	0,999	0,347	0,970	0,997	6,743	-0,910
Máximo	***0,995***	***0,017***	***0,999***	***0,458***	***0,998***	***0,998***	***32,050***	***1,310***
Mínimo	***0,974***	***0,008***	***0,998***	***0,294***	***0,965***	***0,995***	***-29,600***	***-0,986***

Tabla 6.23. Resumen de MCGs seleccionados y la abreviación que se utiliza en adelante. Fuente: Elaboración propia.

MCG Seleccionado	Abreviación a Utilizar
BCC-CSM1-1	BCC
BNU-ESM	BNU
MPI-ESM-LR	MPI

6.5 Modelo Hidrológico Conceptual

Como se indica en el **Anexo 4** (Guía Metodológica), para este estudio se ha seleccionado la plataforma de modelación hidrológica WEAP[12], la cual permite la construcción de modelos semi-distribuidos donde el área de la cuenca puede ser desagregada en tantas bandas de elevación como sea necesario, de acuerdo a los objetivos del análisis. Cada banda es representada por un "catchment" (círculo verde), el cual guarda el modelo conceptual de dos estanques presentado en el **Anexo 4**.

En la **Figura 6.39** se presenta el modelo conceptual desarrollado en WEAP de la subcuenca del Melado, donde se aprecian las 7 bandas de elevación (círculos verdes) definidas en el **Acápite 6.2**. Además se incluye el trasvase Melado-Ancoa (círculo rojo) obtenido de CEPAL [2009b]. Los caudales observados se introducen en "Afl_Emb_Melado" (círculo azul), lo cual cierra la subcuenca.

Figura 6.39. Modelo conceptual de la subcuenca del Melado. Fuente: Elaboración propia.

[12] Desarrollada por el Stockholm Environment Institute (sede en Boston) y el Tellus Institute.

En la **Figura 6.40** se presenta el modelo conceptual desarrollado en WEAP de la subcuenca de Invernada, donde se aprecian las 6 bandas de elevación (círculos verdes) definidas en el **Acápite 6.2**. Los caudales observados se introducen en "Afluente Invernada" (círculo azul), lo cual cierra la subcuenca.

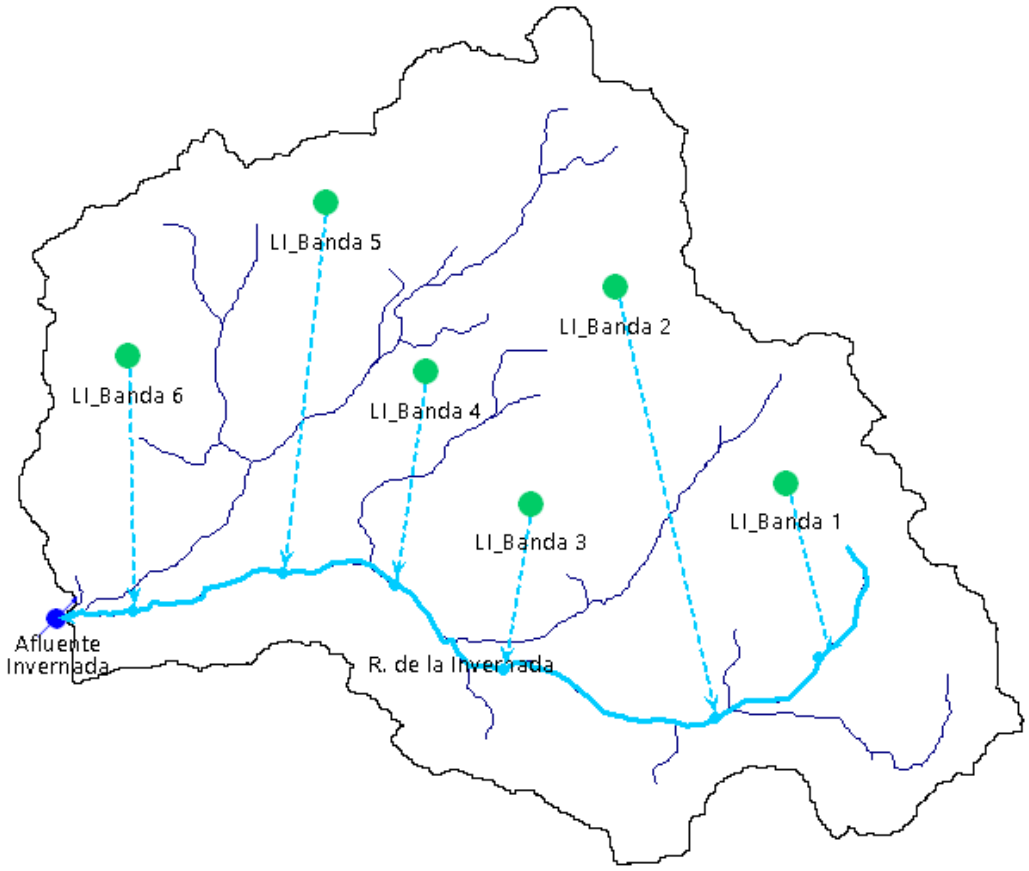


Figura 6.40. Modelo conceptual de la subcuenca de Invernada. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 6.41** se presenta el modelo conceptual desarrollado en WEAP de la subcuenca de Maule, donde se aprecian las 4 bandas de elevación (círculos verdes) definidas en el **Acápite 6.2**. Los caudales observados se introducen en "Afl_Lag_Maule" (círculo azul), lo cual cierra la subcuenca.

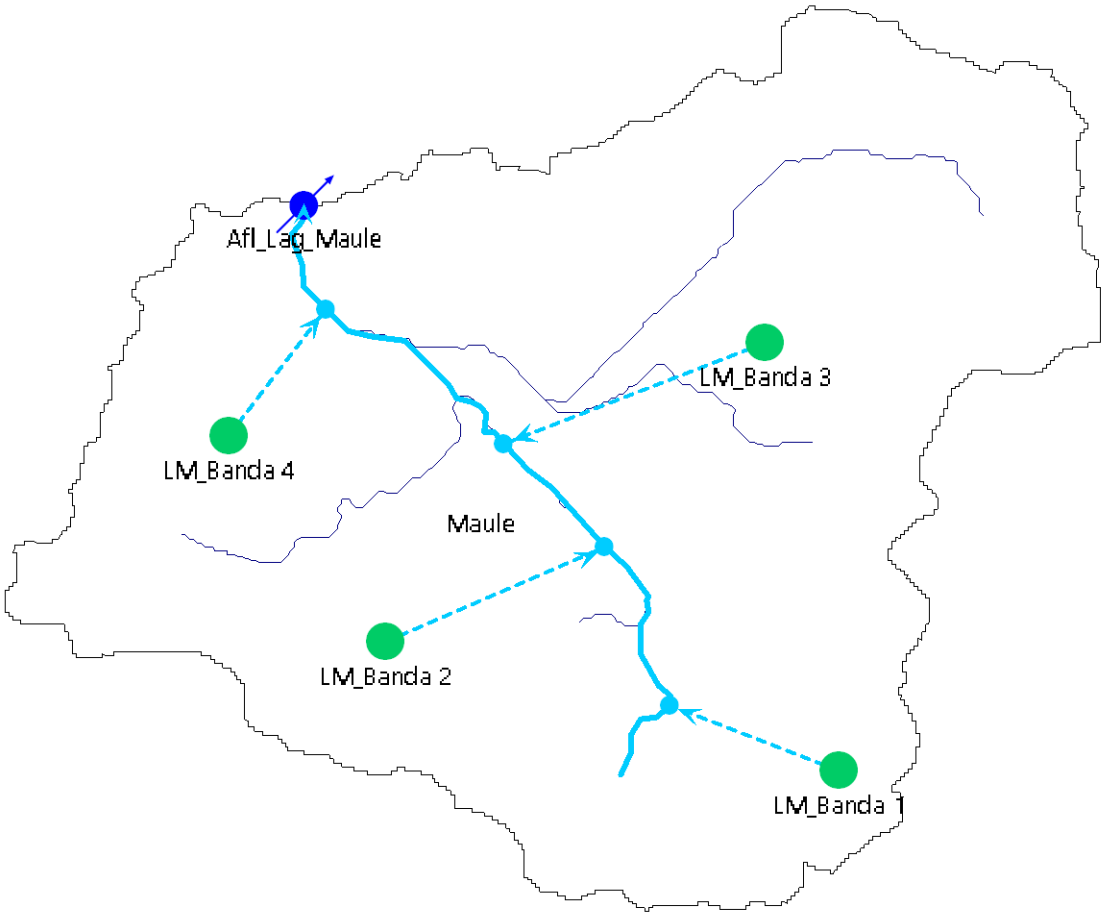


Figura 6.41. Modelo conceptual de la subcuenca de Maule. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 6.42** se presenta el modelo conceptual desarrollado en WEAP de las subcuencas de Claro y Garzas, donde se aprecian las 5 bandas de elevación (círculos verdes) definidas en el **Acápite 6.2** para Claro y Garzas. Los caudales observados se introducen en "Afl_Garzas_Claro" (círculo azul), que contiene los efluentes combinados de ambas subcuencas.

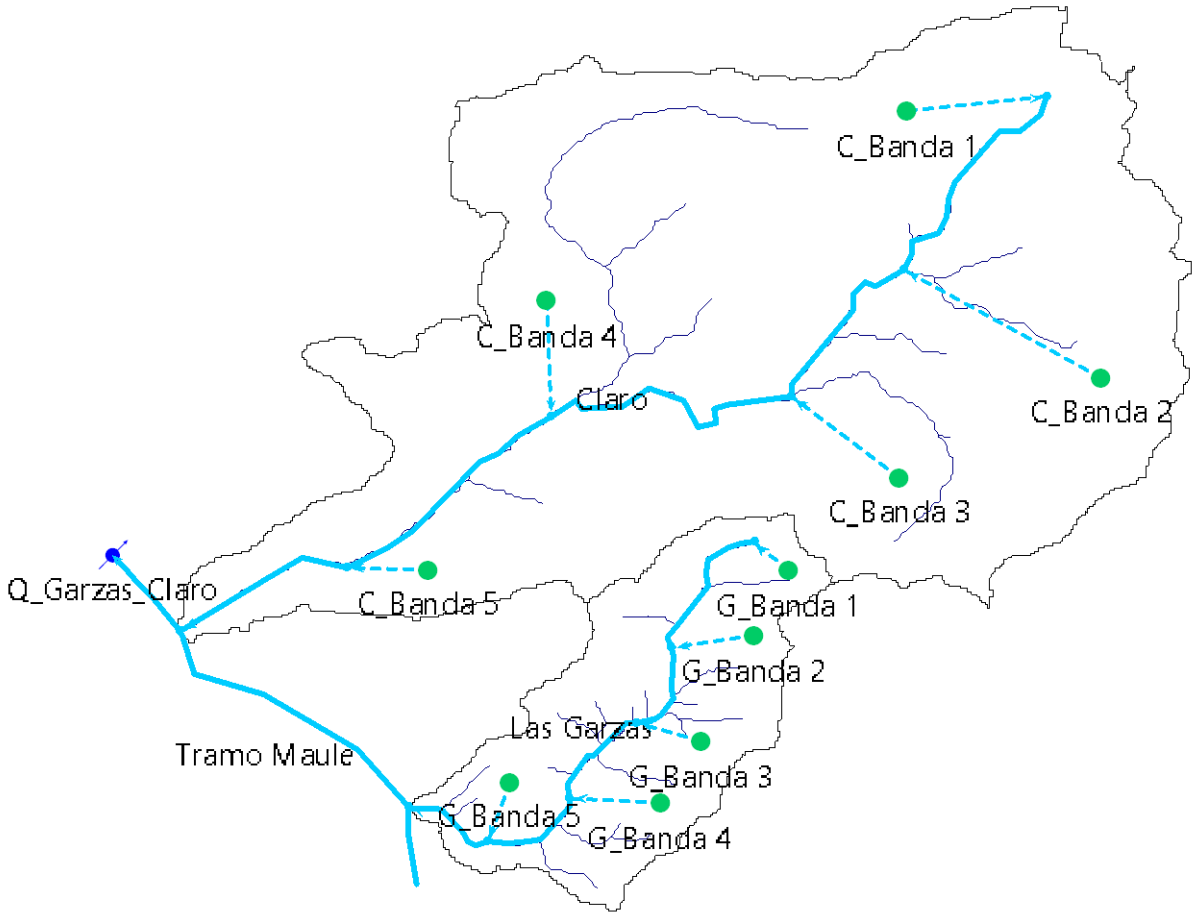


Figura 6.42. Modelo conceptual de las subcuencas de Claro y Garzas. Fuente: Elaboración propia.

7 RESULTADOS

7.1 Organización del Capítulo de Resultados

La presentación de resultados ha sido dividida en 4 partes principales, cuyo esquema general se presenta en la **Figura 7.1**. En la **Tabla 7.1** se presenta un glosario de términos, el cual se emplea para describir el tipo de análisis que se realiza en cada una de estas 4 partes principales.

Figura 7.1. Esquema general de presentación de resultados. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.1. Glosario de términos utilizados para describir el análisis de resultados. Fuente: Elaboración propia.

Término	Definición
Q	Caudal
SWE	Equivalente en agua de la nieve
PP	Precipitación
T°	Temperatura
Estacionalidad	Distribución de valores mensuales de una variable (12 valores) durante un año, usando promedios de un período dado de años
Variabilidad	Curva de duración de valores mensuales de una variable
Series de Tiempo	Serie de valores mensuales de una variable, graficada para un determinado periodo de años
Correlación	Scatterplot o nube de puntos que permite comparar correlación de dos series de tiempo de una misma variable
Curvas de Variación Estacional	Se presentan los valores de la variable a nivel mensual asociados a 3 probabilidades de excedencia* (12 valores por cada probabilidad): 10, 50 y 85%
Indicadores de Ajuste	Se presentan en tablas coeficientes de correlación (R^2), error cuadrático medio (ECM), error medio y coeficiente de Nash-Suttclife
Ensamble	Proyección conjunta de los tres modelos utilizados en este estudio. El rango de variación de un ensamble está definido por los valores máximos y mínimos de los tres modelos.

*Probabilidad de excedencia: es la probabilidad que tiene un evento dado de exceder un valor determinado de la variable. Por ejemplo, Q10% corresponde a un caudal grande, pues solo existe un 10% de probabilidad de que dicho caudal sea excedido.

Cada una de las partes indicadas en la **Figura 7.1** tiene objetivos particulares que se detallan a continuación.

1. **Proceso de Escalamiento Meteorológico**. Se utilizan las series observadas y simuladas en línea base por los 3 MCG seleccionados (BCC, BNU y MPI) para verificar el correcto proceso de escalamiento en las estaciones meteorológicas seleccionadas de precipitación (Armerillo) y temperatura (Colorado). El objetivo es revisar que las series simuladas se ajusten a las series observadas en dichas estaciones meteorológicas, tanto en la estacionalidad como en la variabilidad de los datos. En la **Figura 7.2** se resumen los análisis que se realizan en este capítulo.

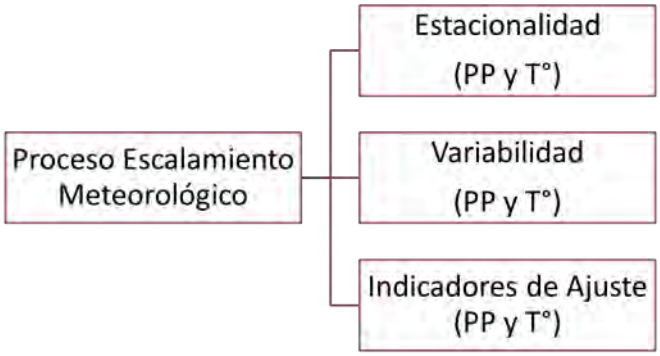


Figura 7.2. Esquema de presentación de resultados del proceso de escalamiento meteorológico. Fuente: Elaboración propia.

2. **Calibración y Validación de Modelos**. Se presentan los resultados de cada subcuenca modelada, diferenciando entre ambos periodos de análisis (calibración y validación), tanto para el caudal como para el SWE. En la **Figura 7.3** se muestran los análisis de resultados que se realizan para cada variable (Q y SWE) y para cada subcuenca.

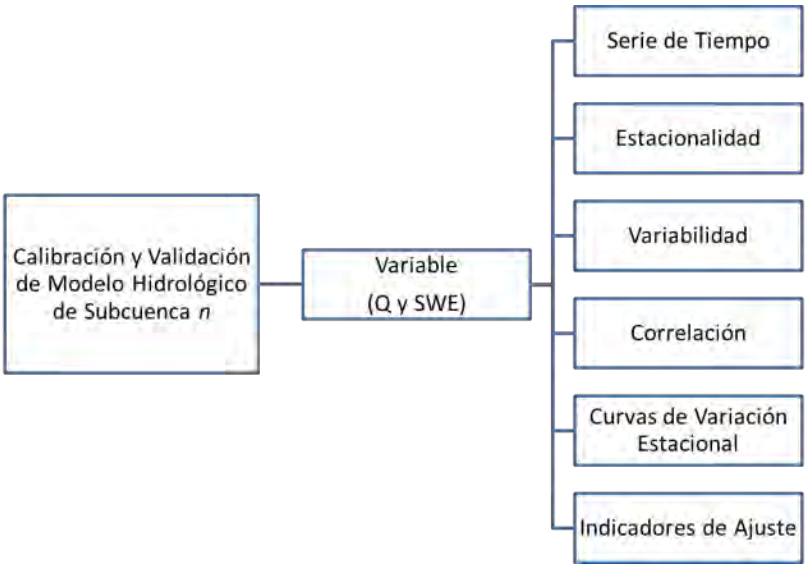


Figura 7.3. Esquema de presentación de resultados de la calibración y validación de los modelos hidrológicos desarrollados para cada subcuenca. Fuente: Elaboración propia.

3. **Hidrología de Escenarios Futuros**. Estos resultados se dividen en dos partes:

   i. **Validez de los MCG en línea base**: El objetivo de este acápite es validar que el modelo hidrológico forzado con datos observados de precipitación y temperatura responda igual, estadísticamente, que el modelo forzado con las series escaladas de los MCG. Se evalúa cada MCG por separado. En la **Figura 7.4** se presenta un esquema del análisis realizado para verificar la validez de los MCG.

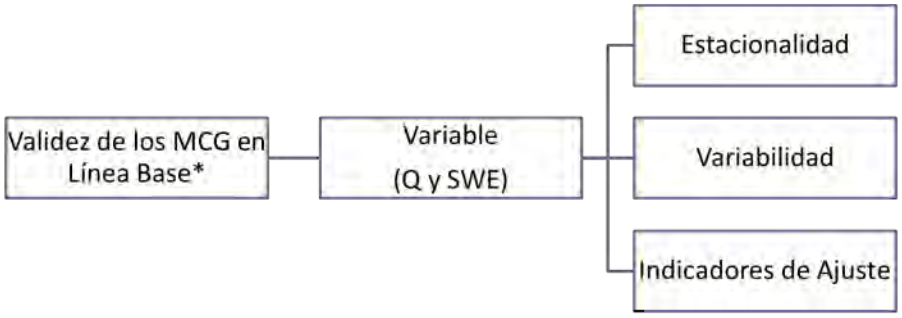


Figura 7.4. Esquema de presentación de resultados del análisis de validez de los MCG en línea base. Fuente: Elaboración propia.

   ii. **Resultados de disponibilidad hídrica en escenarios futuros**: Se presenta cómo varía el ensamble de la escorrentía (Q) por cada ventana futura, obtenidas empleando como forzantes las series de PP y T° de los MCG, validadas en el periodo de línea base (acápite anterior). En la **Figura 7.5** se presenta el esquema de presentación de resultados, el cual se divide por subcuenca y por variable (Q y SWE).

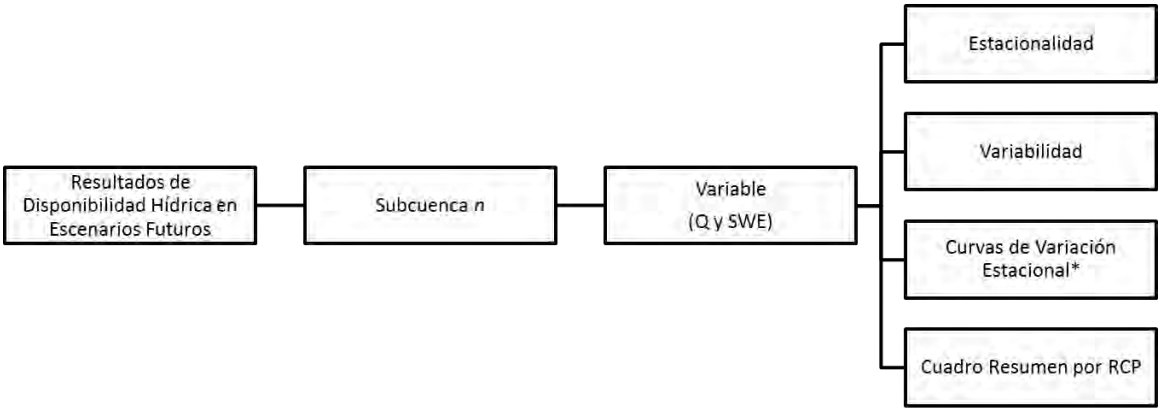


Figura 7.5. Esquema de presentación de resultados de disponibilidad hídrica en escenarios futuros. Fuente: Elaboración propia.

4. **Generación Hidroeléctrica de Escenarios Futuros**. Se presenta cómo varía la generación hidroeléctrica a futuro (por ventana futura), empleando como base las series simuladas de caudales con datos de los MCG. Se consideran dos casos de análisis, cuyo esquema de resultados se presenta en la **Figura 7.6**:

   i. **Capacidad Instalada**: Se evalúa la producción del sistema Maule Alto utilizando utilizando series simuladas de energía bruta producida entre 1976 y 2099, en base a las 12 relaciones mensuales entre el caudal total (suma de las subcuencas) y la generación de la potencia instalada total.

   ii. **Capacidad Potencial**: Se evalúa la producción del potencial hidroeléctrico empleando como referencia puntos seleccionados en la subcuenca del Melado.

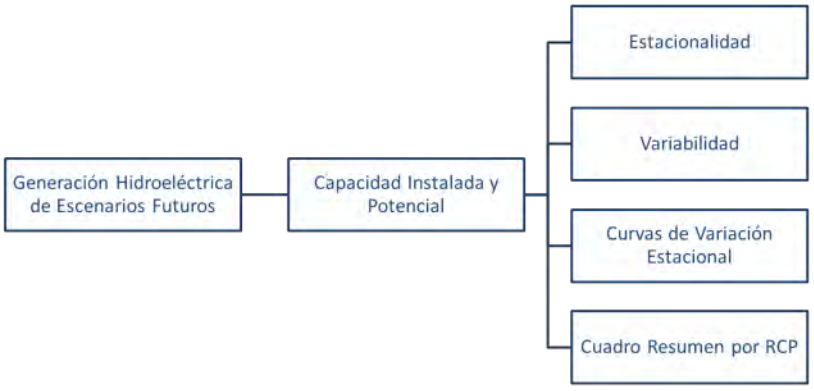


Figura 7.6. Esquema de presentación de resultados de la generación hidroeléctrica en escenarios futuros. Fuente: Elaboración propia.

7.1.1 Nomenclatura de las series de tiempo y variables

Debido a la complejidad del estudio y a la gran cantidad de variables y análisis involucrados, se necesita emplear una nomenclatura específica, lo cual permite uniformar el formato de entrega de resultados que se realiza en este capítulo. A continuación se presenta la nomenclatura empleada para una variable (X) cualquiera, donde X puede ser igual a PP, T°, Q o SWE:

- **Variable (X)**

i. X-obs: variable observada.

ii. X-sim-obs: variable simulada con datos observados.

iii. X-sim-obs-LB: variable simulada con datos observados en periodo línea base.

iv. X-sim-MCG-LB: variable simulada con datos MCG en periodo línea base.

v. X-sim-MCG-RCP4.5: variable simulada con datos MCG en periodo futuro, para el escenario RCP 4.5.

vi. X-sim-MCG-RCP8.5: variable simulada con datos MCG en periodo futuro, para el escenario RCP 8.5.

Por otra parte, cada variable se denomina de forma diferente, dependiendo de su naturaleza. En el caso de Q y T°, se denomina "medio mensual" a los valores mensuales de la serie histórica. En el caso de PP y SWE, se denominan "total mensual" a los mismos valores mensuales de la serie histórica.

Cuando se analiza la *Estacionalidad* se utiliza el término "medio mensual promedio" para Q y T°, mientras que para PP y SWE se emplea el término "total mensual promedio". Cuando se analiza la *Variabilidad* y la *Correlación*, usualmente se emplean valores "medio mensual" para Q y T° y "total mensual" para PP y SWE.

Cabe señalar que, aunque PP y SWE se denominan en forma equivalente la precipitación mensual corresponde exclusivamente a lo que cae en el mes, mientras que SWE es una variable de estado que indica la nieve acumulada hasta ese mismo mes.

7.1.2 Indicadores de Ajuste

El coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) se utiliza usualmente para evaluar el ajuste de una variable simulada respecto a los valores observados de esa misma variable. Éste se calcula mediante la siguiente expresión:

$$NS = 1 - \sum_{i=1}^{n} \frac{(Z_i^{Obs} - Z_i^{Sim})^2}{(Z_i^{Obs} - \bar{Z}^{Obs})^2}$$

En donde Z_i^{Obs} y Z_i^{Sim} corresponden a las variables observada y simulada en el tiempo *i*, respectivamente. La variable $\bar{Z}^{Obs}$ representa el promedio de los *n* valores observados.

El indicador de Nash-Sutcliffe es una medida del error en las estimaciones del modelo, normalizado por la varianza de los valores observados en torno a su promedio. Puede tomar valores desde -∞ a 1 siendo este último valor un indicador de una perfecta modelación del sistema. Usualmente, un valor de 0,7 o más corresponde a una modelación adecuada.

Otro indicador que se utiliza en este estudio corresponde al coeficiente de bondad de ajuste o correlación (R^2), obtenido del scatterplot o nube de puntos entre los datos observados y simulados de una variable.

Finalmente, se han incluido el error cuadrático medio (ECM) y el error medio como dos indicadores adicionales. En el caso del ECM, corresponde a la varianza de los errores cuando el estimador es insesgado. Se calcula con la siguiente expresión:

$$ECM = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(Z_i^{Sim} - Z_i^{Obs}\right)^2$$

El error medio representa la media aritmética de los errores de estimación y se calcula con la siguiente expresión:

$$EM = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left| Z_i^{Sim} - Z_i^{Obs} \right|$$

7.2 Proceso de Escalamiento Meteorológico

En este acápite se utilizan las series meteorológicas observadas y simuladas en línea base por los 3 MCG seleccionados (BCC, BNU y MPI) para verificar el correcto proceso de escalamiento en las estaciones meteorológicas seleccionadas de precipitación (Armerillo) y temperatura (Colorado). El objetivo es revisar que las series simuladas se ajusten a las series observadas en dichas estaciones meteorológicas, tanto en la estacionalidad como en la variabilidad de los datos.

En el **Anexo 4** de este estudio se describe la metodología utilizada para realizar el escalamiento o *downscaling* meteorológico, proceso en el cual las variables meteorológicas entregadas por cada uno de los modelos de circulación general (MCG) seleccionados son corregidas espacio-temporalmente. La primera corrección consiste en una desagregación espacial desde la escala global (0,25°x 0,25°) a una grilla más fina (*Spatial Disaggregation*) y la segunda es una corrección a las curvas de duración mensuales de cada variable (denominada *Bias Correction*).

El escalamiento espacial se realiza primero y se genera mediante una interpolación basada en el inverso de la distancia de los valores asociados a la grilla de NEX (base de datos unificada de todos los MCG analizados), hacia el punto donde se encuentran las estaciones meteorológicas seleccionadas (Colorado y Armerillo).

El escalamiento temporal se realiza mediante la correlación de las curvas de duración de los datos mensuales simulados por cada MCG y las curvas de duración de los datos mensuales observados en las estaciones meteorológicas seleccionadas. A través de este segundo paso se ajustan los datos simulados de los MCG, obtenidos en el escalamiento espacial, a los datos observados en la zona de estudio. Este ajuste tiene como objetivo corregir tanto la magnitud como la estacionalidad de los datos simulados por los MCG para que sean consistentes con los datos del registro histórico.

Una vez realizado el escalamiento espacio-temporal de las series simuladas de cada uno de los MCG seleccionados, se obtiene un conjunto de series de tiempo de precipitación y temperatura. Estas series son divididas en dos periodos de tiempo:

- LB: línea base (1976-2005)
- VF: ventana futura (2006-2099)

En la **Figura 7.7** se presenta el análisis de la estacionalidad de las series escaladas comparadas con las series observadas. Se aprecian los promedios estacionales y el rango de variación de la precipitación mensual (PP) y la temperatura media mensual (T), para el periodo de LB. En la primera fila (a, b y c) se muestran los ajustes estacionales de precipitación de los MCG BCC, BNU y MPI, respectivamente. En la segunda fila (d, e y f) se presentan en el mismo orden los ajustes estacionales obtenidos para la temperatura.

Como se aprecia en la **Figura 7.7**, la temperatura muestra en general ajustes más precisos que la precipitación. Esto es consistente con el análisis realizado en el **Acápite 6.4**, donde se evaluaron distintos indicadores para la selección de los MCG, obteniéndose en general mejores ajustes para la temperatura. En el caso de la precipitación, el modelo MPI (**Figura 7.7c**) muestra el mejor ajuste estacional, mientras que el modelo BNU (**Figura 7.7b**) presenta las mayores diferencias, incluyendo un leve desfase en el mes de máxima precipitación. Estas diferencias se reflejan a su vez en la distribución de la desviación estándar de los valores mensuales (área sombreada en la figura). Se observan diferencias entre los valores máximos y mínimos observados y simulados en todos los casos, pero no se observa un sesgo particular al alza o a la baja. En el caso de la temperatura, los ajustes son equivalentes y con menores diferencias relativas en los 3 MCG seleccionados, salvo en las temperaturas mínimas, donde BNU (**Figura 7.7e**) y MPI (**Figura 7.7f**) muestran las mayores diferencias durante los meses más fríos.

En la **Figura 7.8** se presenta el análisis de la variabilidad mediante el ajuste de las curvas de duración de series observadas y simuladas, empleando un esquema de figuras equivalente al anterior. En la primera fila (a, b y c) se muestran las curvas de duración de precipitación observada y de los MCG BCC, BNU y MPI, respectivamente. En la segunda fila (d, e y f) se presentan en el mismo orden las curvas de duración obtenidas para la temperatura.

En este caso, es posible apreciar un adecuado ajuste de la variabilidad, tanto para la precipitación como para la tempeatura, en todos los MCG seleccionados. Esto permite concluir que las propiedades estadísticas de las series observadas y simuladas son consistentes. Esta consistencia es especialmente importante para los análisis de disponibilidad hídrica y de generación hidroeléctrica: en estos análisis se busca estudiar variaciones para distintas probabilidades de excedencia, lo cual no sería posible sin una consistencia estadística adecuada entre las series observadas y simuladas.

Finalmente, en la **Tabla 7.2** se presentan los indicadores de ajuste obtenidos para la precipitación y la temperatura, donde se cuantifica el ajuste de las series de tiempo obtenido en el proceso de escalamiento.

Concluido el proceso de verificación del escalamiento realizado, es posible emplear los gradientes de precipitación y temperatura generados en el **Acápite 6.3.2** para obtener las series simuladas de los MCG en las distintas bandas de elevación de las subcuencas. Estas series simuladas serán empleadas en modelos hidrológicos calibrados y validados (presentados a continuación, en el **Acápite 7.3**) para estimar las diferencias entre caudales en línea base y futuros.

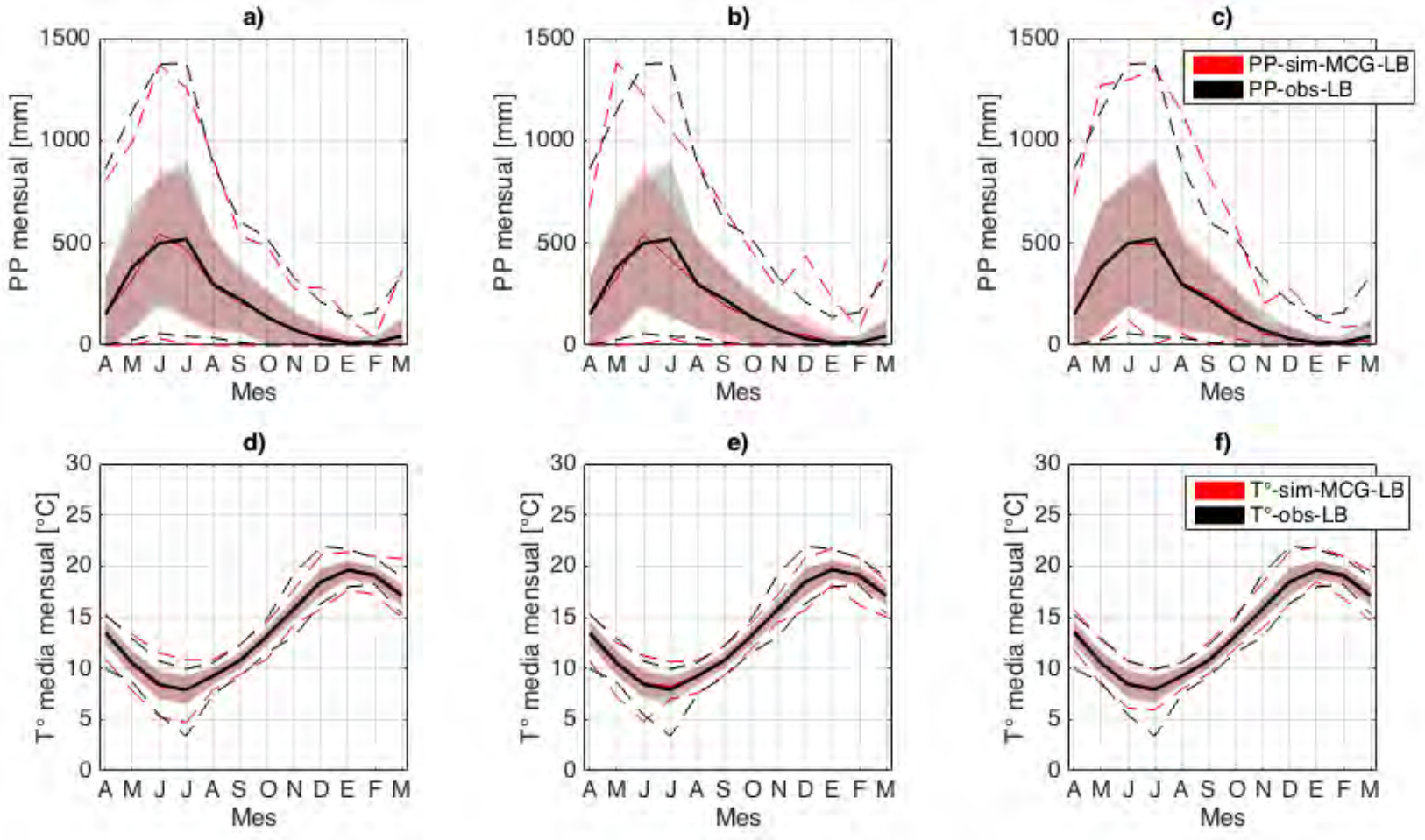


Figura 7.7. Precipitaciones mensuales promedio y temperaturas medias mensuales promedio en el periodo de LB (abril de 1976 a marzo de 2005). En cada figura se presentan los datos observados (obs-LB) y el ensamble de los tres MCG seleccionados en este estudio (sim-MCG-LB). La media es presentada como línea continua, los máximos y mínimos son presentados como líneas punteadas, y la desviación estándar corresponde al área sombreada. a) y d) presentan los ajustes estacionales entre valores observados y BCC, para la precipitación y temperatura, respectivamente; b) y e) presentan los ajustes estacionales entre valores observados y BNU, para la precipitación y temperatura, respectivamente; y c) y f) presentan los ajustes estacionales entre valores observados y MPI, para la precipitación y temperatura, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

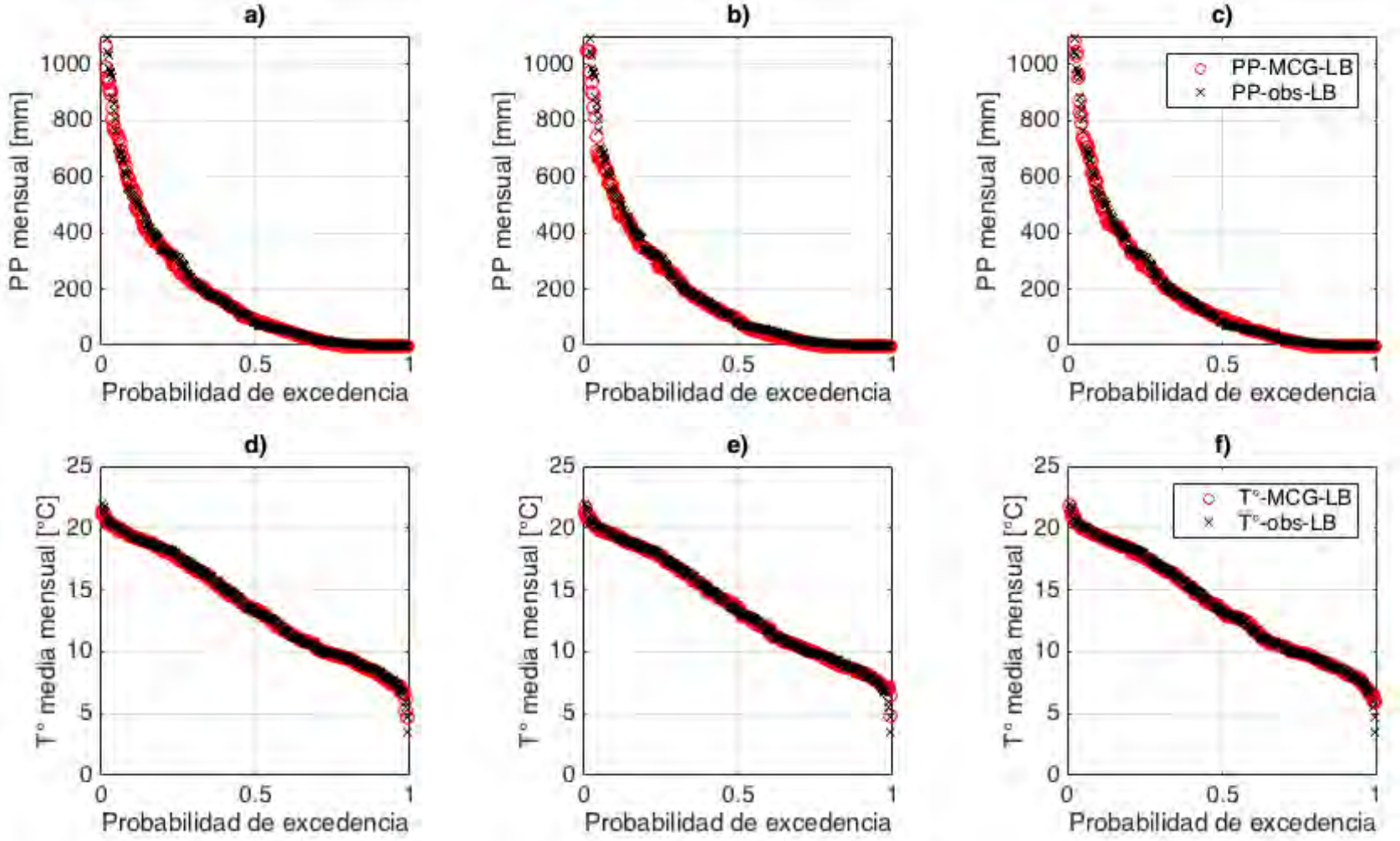


Figura 7.8. Curvas de duración de precipitaciones mensuales y temperaturas medias mensuales en el periodo de LB (abril de 1976 a marzo de 2005). En cada figura se presentan los datos observados (obs-LB) y el ensamble de los tres MCG seleccionados en este estudio (sim-MCG-LB). a) y d) presentan las curvas de duración observadas y BCC para la precipitación y temperatura, respectivamente; b) y e) presentan las curvas de duración observadas y BNU para la precipitación y temperatura, respectivamente; y c) y f) presentan las curvas de duración observadas y MPI para la precipitación y temperatura, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.2. Indicadores de ajuste de las cuvas de duración de precipitación mensual y la temperatura media mensual, para cada MCG: coeficientes de bondad de ajuste o correlación (R^2), error medio y error cuadrático medio (ECM). Fuente: Elaboración propia.

Variable	MCG	R^2	Error Medio	ECM
Precipitación [mm]	BCC	0,995	5,57	22,89
	BNU	0,996	10,18	25,35
	MPI	0,996	2,11	17,08
Temperatura [°C]	BCC	0,999	0,05	0,16
	BNU	0,998	0,00	0,22
	MPI	0,998	0,00	0,20

7.3 Calibración y Validación de Modelos

En este acápite se presentan los resultados de cada subcuenca modelada, diferenciando entre ambos periodos de análisis (calibración y validación). Se analizan los resultados tanto para el caudal como para el SWE.

Como se señaló previamente, debido a limitaciones en la disponibilidad de información meteorológica observada (ver **Acápite 6.3.2**), se definió el periodo hidrológico de interés para la modelación como aquel comprendido entre los años hidrológicos 1976/77 y 2013/14 (38 años). Con dicho periodo de series observadas se ha dividido la información de tal forma que un 70% es utilizada en el proceso de calibración y el 30% restante es empleada para validar los modelos hidrológicos obtenidos. Este periodo es más corto en el caso de las series de equivalente en agua de la nieve (SWE), dado que su disponibilidad comprende el periodo hidrológico 1984/85-2014/15 (30 años). En la **Tabla 7.3** se presentan los periodos de calibración y validación utilizados para las variables observadas disponibles.

Tabla 7.3. Periodos de calibración y validación de las variables observadas: Caudal y SWE. Fuente: Elaboración Propia.

Variable Observada	Periodo de Calibración	Periodo de Validación
Q [m^3/s]	1976/77 - 2002/03 (27 años)	2003/04-2013/14 (11 años)
SWE [m]	1984/85 - 2002/03 (19 años)	2003/04-2013/14 (11 años)

7.3.1 Melado

7.3.1.1 Caudales

En la **Figura 7.9** se presentan las series de tiempo de los caudales medios mensuales observados (negro), junto con las series de tiempo de caudales medios mensuales simulados en el periodo de calibración (rojo) y validación (verde).

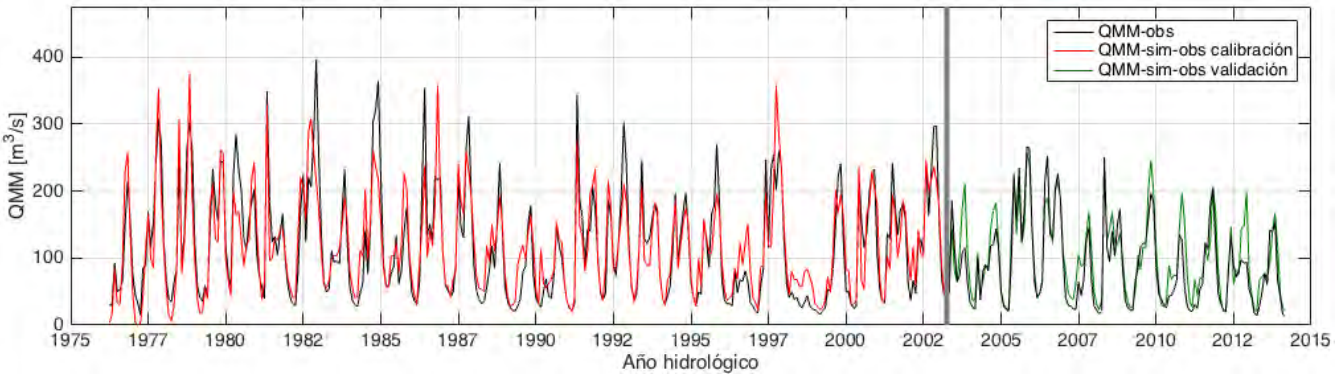


Figura 7.9. Series de tiempo de caudales medios mensuales observados (QMM-obs) y simulados en el periodo de calibración (QMM-sim-obs calibración) y validación (QMM-sim-obs validación), en Melado. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.10** se analiza el ajuste de la estacionalidad mediante los caudales medios mensuales promedio obtenidos para los periodos de calibración (rojo) y validación (verde). En negro se muestran los valores observados. Como se puede apreciar, en el periodo de calibración se obtiene un adecuado ajuste de la estacionalidad y de la desviación estándar, aunque los datos observados tienden a mostrar una mayor desviación estándar que los caudales simulados. En el periodo de validación, los años secos presentes en los últimos años de estadísticas impactan principalmente en el periodo de deshielos, los cuales son sobreestimados por el modelo (QMM-sim-obs), mientras que en la temporada de lluvias (invierno) se logra un ajuste adecuado. En ambos periodos (calibración y validación) se observa una mayor desviación estándar de los caudales observados, lo cual no logra ser reproducido adecuadamente en el periodo de validación (b).

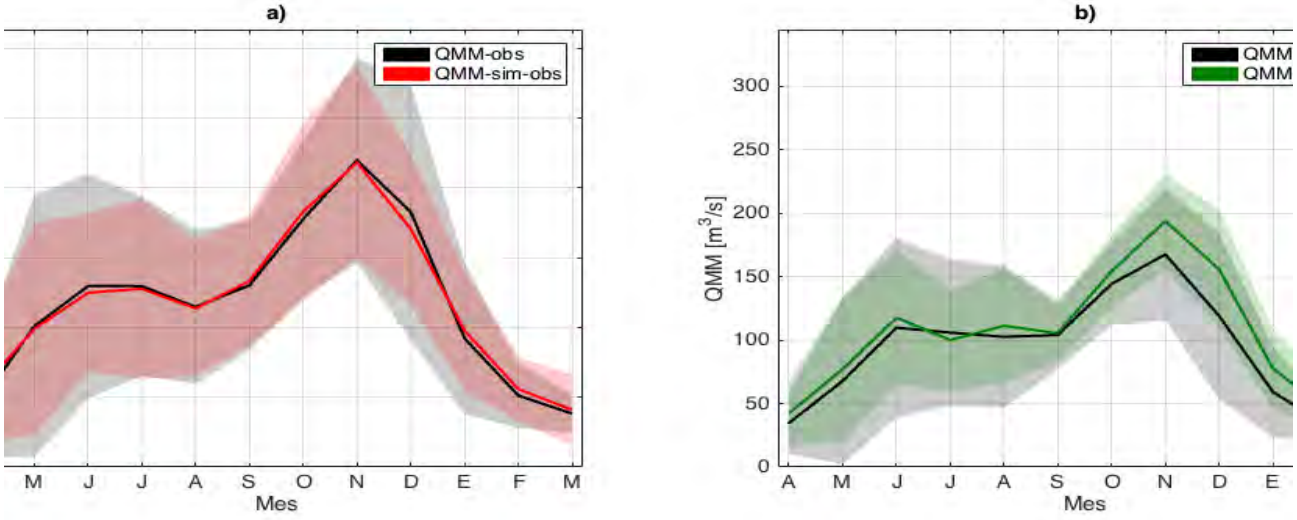


Figura 7.10. Caudales medios mensuales promedio para los periodos de calibración (a) y validación (b) en Melado. Se muestra la media y el rango de variabilidad (desviación estándar). Caudales observados (QMM-obs) y caudales simulados (QMM-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.11** se muestra el ajuste de la variabilidad mediante las curvas de duración en los periodos de calibración (rojo) y validación (verde), empleando la misma nomenclatura de colores utilizada en la figura anterior. Como se observa, el ajuste

obtenido en el periodo de calibración da cuenta de las diferencias en la desviación estándar indicada previamente. Si bien se aprecia un adecuado ajuste en caudales de baja y elevada probabilidad de excedencia, existen diferencias principalmente entre 0,5 y 0,8, equivalentes a un 50% y 80% de probabilidad de excedencia, respectivamente. En el periodo de validación se observa una sobreestimación de los caudales simulados, respecto a los observados (negro) lo cual se explica principalmente por las diferencias en el periodo de deshielo mostradas en la **Figura 7.10b**.

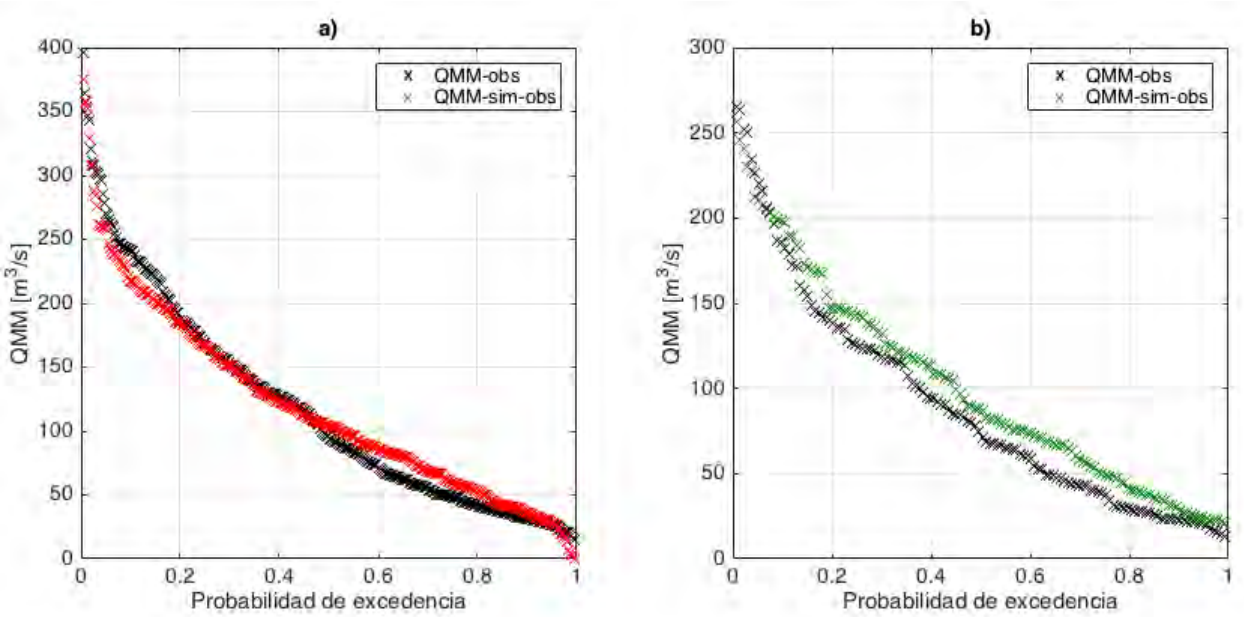


Figura 7.11. Curvas de duración de caudales medios mensuales en periodo de calibración (a) y validación (b) en Melado. Caudales observados (QMM-obs) y caudales simulados (QMM-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.12** se analiza la correlación obtenida en la representación de los caudales medios mensuales en los periodos de calibración (a), con un R^2 de 0,773, y validación (b), con un R^2 de 0,814. Como se aprecia, en ambos casos se tiene un ajuste aceptable del modelo hidrológico, observándose una mayor dispersión en los caudales altos para el periodo de calibración. Los años más secos en el periodo de validación tienden a mejorar la correlación obtenida.

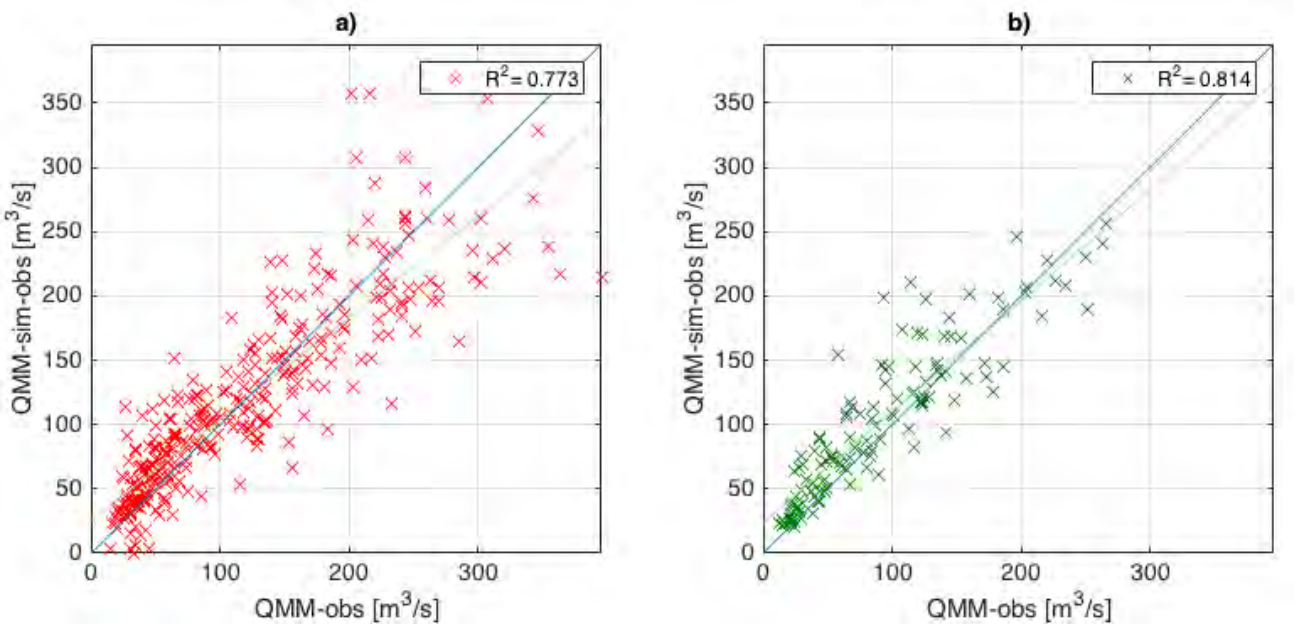


Figura 7.12. Correlación de caudales medios mensuales observados y simuados en periodo de calibración (a) y validación (b) en Melado. Se muestra además el coeficiente de ajuste para cada set de datos. Caudales observados (QMM-obs) y simulados con datos observados (QMM-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.13** se presentan las curvas de variación estacional para tres probabilidades de excedencia representativas, en el periodo conjunto de calibración y validación para una mayor representatividad. Como se observa, el modelo presenta un buen ajuste para probabilidades medias, mientras que para probabilidades de excedencia altas el modelo tiende a sobreestimar los caudales efluentes del sistema. En el caso de los caudales altos (probabilidades de excedencia bajas) el modelo presenta una leve subestimación de los caudales.

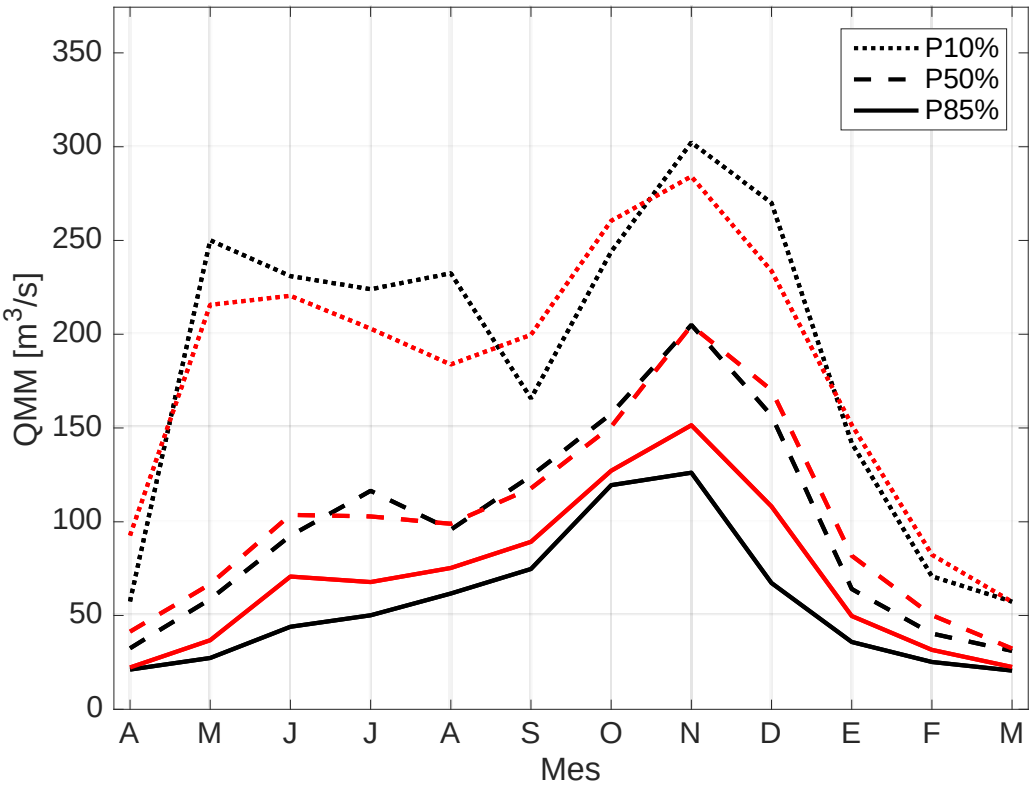


Figura 7.13. Curvas de variación estacional de los caudales medios mensuales en Melado, correspondientes a las probabilidades de excedencia de 10, 50 y 85%. En negro se muestran los caudales observados, mientras que en rojo se muestran los datos simulados. Se utiliza el periodo conjunto de calibración y validación (1976/77-2013/14). Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 7.4** se presenta un resumen de los indicadores de ajuste obtenidos en los periodos de calibación y validación, para la variable caudal: coeficientes de bondad de ajuste o correlación (R^2), error medio, error cuadrático medio (ECM) y Nash-Suttclife. Se aprecia que el modelo logra una adecuada representación de los fenómenos hidrológicos que originan los caudales en la subcuenca del Melado.

Tabla 7.4. Indicadores de ajuste del caudal en Melado: coeficientes de bondad de ajuste o correlación (R^2), error medio, error cuadrático medio (ECM) y de Nash-Sutcliffe. Fuente: Elaboración propia.

Periodo de Análisis	R^2	Error Medio [m^3/s]	ECM [$m^3/s]^2$	Nash-Sutcliffe
Calibración	0,773	0,59	39	0,773
Validación	0,814	11,4	29,4	0,779

7.3.1.2 Equivalente en agua de la nieve (SWE)

En la **Figura 7.14** se presentan las series de tiempo del SWE total mensual observado (negro), junto con las series de tiempo de SWE total mensual simulado en el periodo de calibración (rojo) y validación (verde).

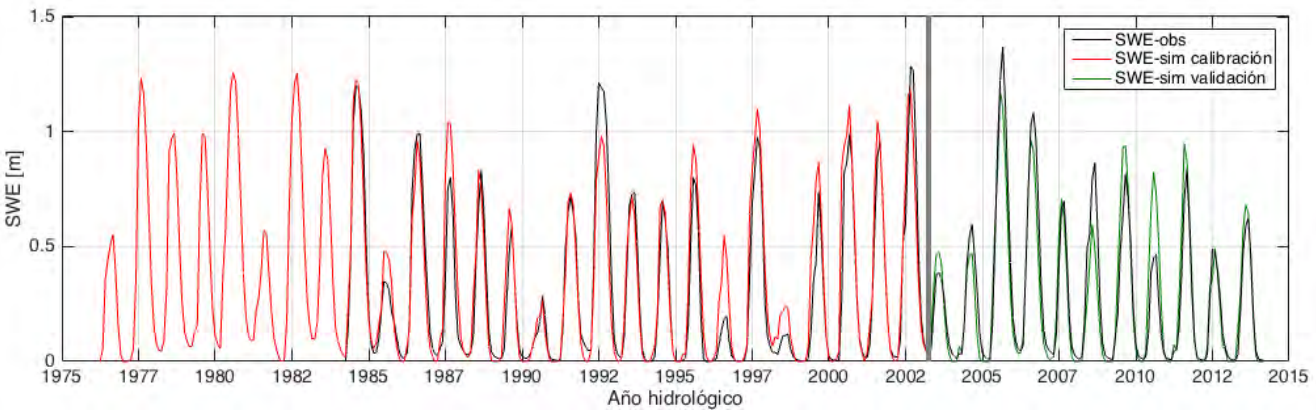


Figura 7.14. Series de tiempo de SWE total mensual observado (SWE-obs; negro) y simulado en el periodo de calibración (SWE-sim-obs calibración; rojo) y validación (SWE-sim-obs validación; verde), en Melado. Fuente: Elaboración propia.

En conjunto con el proceso de ajuste de la variable caudal, se llevó a cabo un proceso paralelo de ajuste del proceso de acumulación de nieves, gracias a la obtención del SWE mediante un análisis de imágenes satelitales [Margulis *et al.*, 2015]. En el caso de Melado, este ajuste permitió detectar dificultades en la obtención de la estacionalidad observada de acumulación de nieves, como se aprecia en la **Figura 7.15**, donde se presenta el SWE total mensual promedio para los periodos de calibración (a) y validación (b). Como se observa en el periodo de calibración, el SWE simulado tiende a ser mayor que la variable observada, lo cual mejora en el periodo de validación. También es posible ver que la máxima acumulación simulada se produce un mes antes que la variable observada.

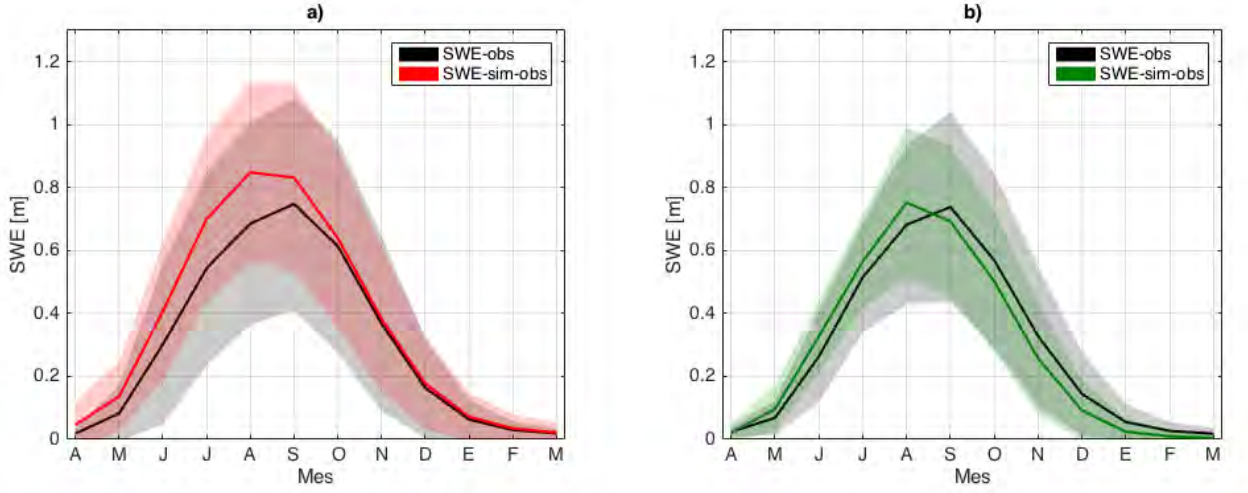


Figura 7.15. SWE total mensual promedio para los periodos de calibración (a) y validación (b) en Melado. Se muestra la media y el rango de variabilidad (desviación estándar). SWE observado (SWE-obs) y simulados con datos observados (SWE-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.16** se analiza el ajuste de la variabilidad mediante las curvas de duración del SWE total menual, para la calibración (rojo) y validación (verde). En negro se muestran los valores observados. Como se observa, en la calibración hay un ajuste adecuado para probabilidades de excedencia mayores al 60% y menores al 15%. En los rangos intermedios

el modelo tiende a sobreestimar la acumulación esperada de nieve. En la validación el ajuste general mejora, aunque no logra reproducir los meses más húmedos o de mayor acumulación de nieve.

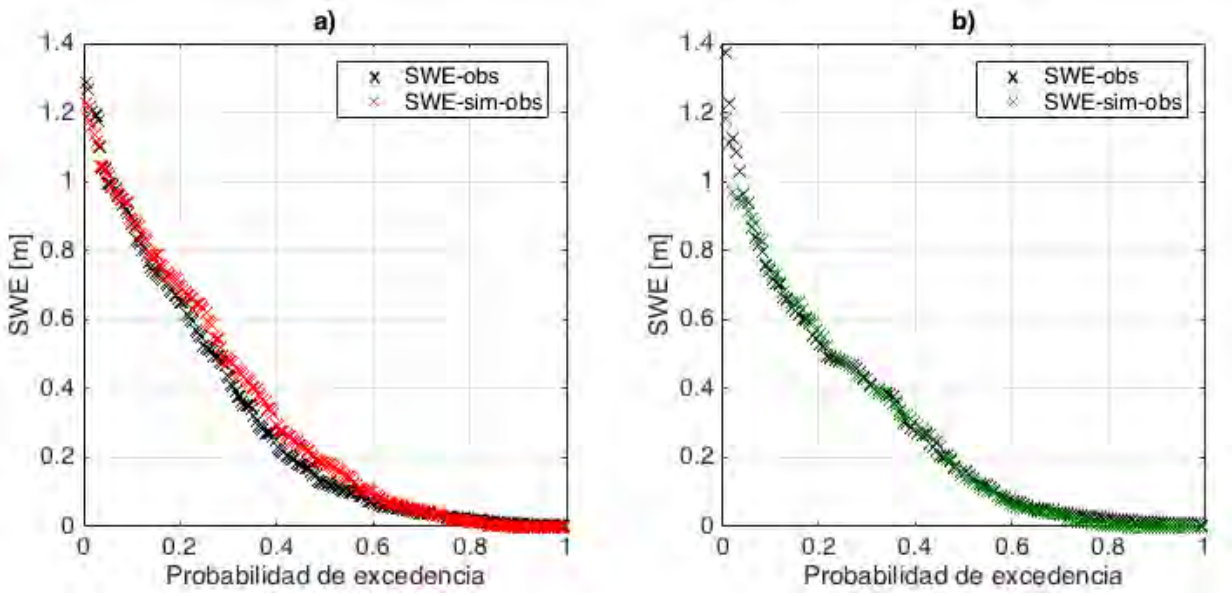


Figura 7.16. Curvas de duración de SWE total mensual en periodo de calibración (a) y validación (b) en Melado. SWE observado (SWE-obs) y simulados con datos observados (SWE-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.17** se analiza la correlación obtenida en la representación del SWE en los periodos calibración (a), con un R^2 de 0,888, y validación (b), con un R^2 de 0,870. Como se aprecia, en ambos casos se tiene un ajuste similar y aceptable del modelo hidrológico, pese a las diferencias en la estacionalidad.

En la **Tabla 7.5** se presenta un resumen de los indicadores de ajuste obtenidos en los periodos de calibación y validación, para la variable SWE: coeficientes de bondad de ajuste o correlación (R^2), error medio, error cuadrático medio (ECM) y Nash-Suttclife. Se observa que el modelo logra una adecuada representación de la acumulación de nieves en la subcuenca del Melado.

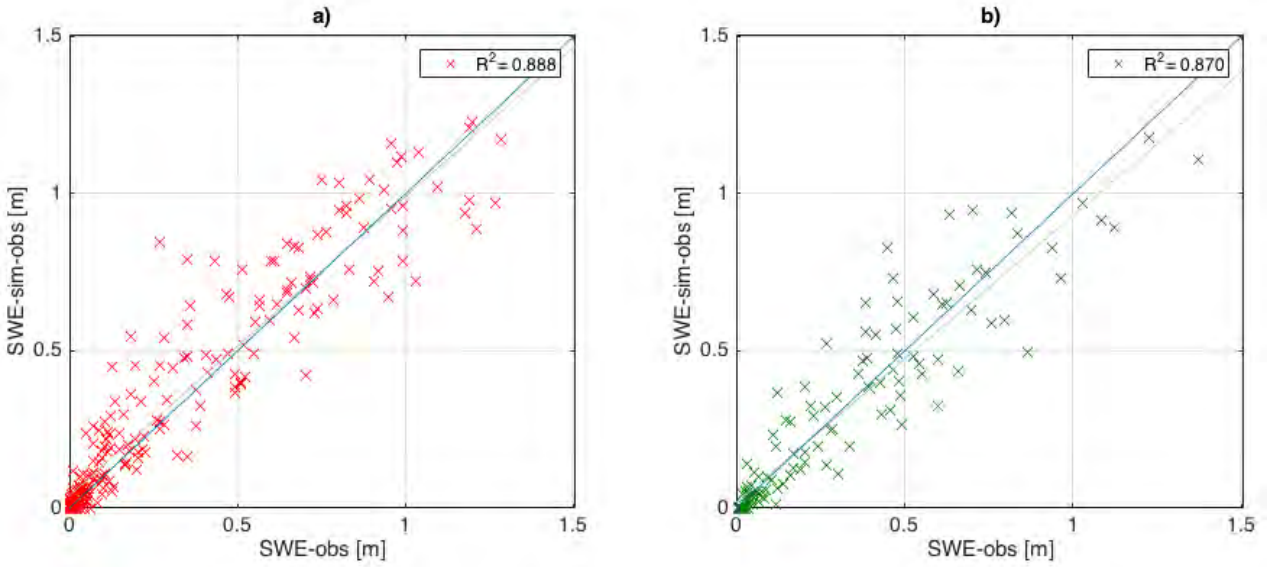


Figura 7.17. Correlación de SWE total mensual para los periodos de calibración (a) y validación (b) en Melado. Se muestra además el coeficiente de ajuste para cada set de datos. SWE observado (SWE-obs) y SWE simulados (SWE-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.5. Indicadores de ajuste de SWE en Melado: coeficientes de bondad de ajuste o correlación (R^2), error medio, error cuadrático medio (ECM) y de Nash-Sutcliffe. Fuente: Elaboración propia.

Periodo de Análisis	R^2	Error Medio [m]	ECM [m^2]	Nash-Sutcliffe
Calibración	0,888	0,03	0,10	0,879
Validación	0,870	-0,01	0,11	0,867

7.3.2 Invernada

7.3.2.1 Caudales

En la **Figura 7.18** se presentan las series de tiempo de los caudales medios mensuales observados (negro), junto con las series de tiempo de caudales medios mensuales simulados en el periodo de calibración (rojo) y validación (verde).

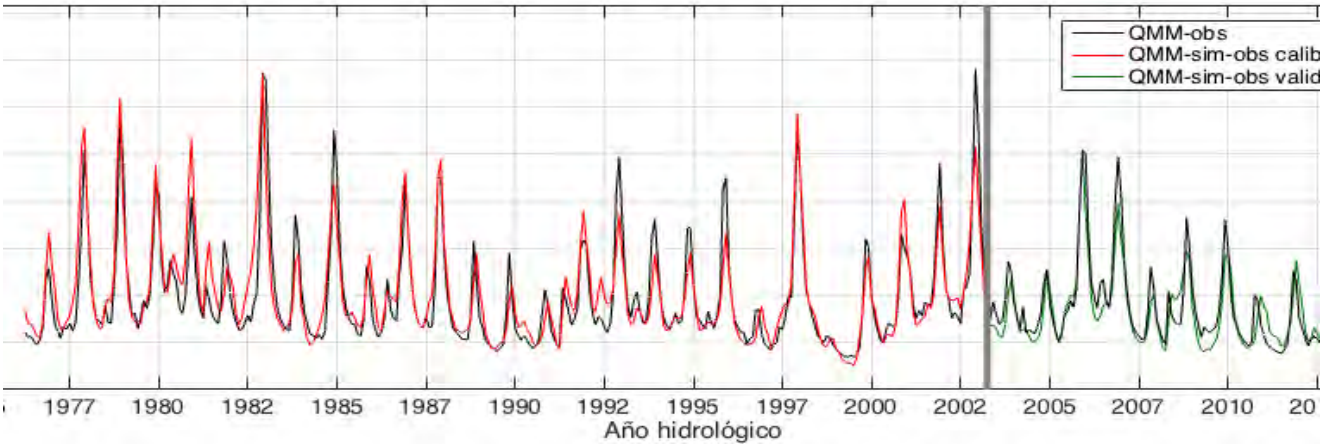


Figura 7.18. Series de tiempo de caudales medios mensuales observados (QMM-obs) y simulados en el periodo de calibración (QMM-sim-obs calibración) y validación (QMM-sim-obs validación), en Invernada. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.19** se analiza el ajuste de la estacionalidad mediante los caudales medios mensuales promedio obtenidos para los periodos de calibración (rojo) y validación (verde). En negro se muestran los valores observados. Como se puede apreciar, en el periodo de calibración (a) se obtiene un adecuado ajuste de la estacionalidad, aunque con una leve sobreestimación de la simulación en el periodo de caudales bajos (invierno). La desviación estándar también presenta una sobreestimación en invierno durante el periodo de calibración. En el periodo de validación (b), los años secos presentes en los últimos años de estadísticas impactan principalmente en el periodo de deshielo, los cuales son subestimados por el modelo (QMM-sim-obs), mientras que en la temporada inviernal se logra un ajuste adecuado. En la validación el modelo simula una menor desviación estándar que los caudales observados.

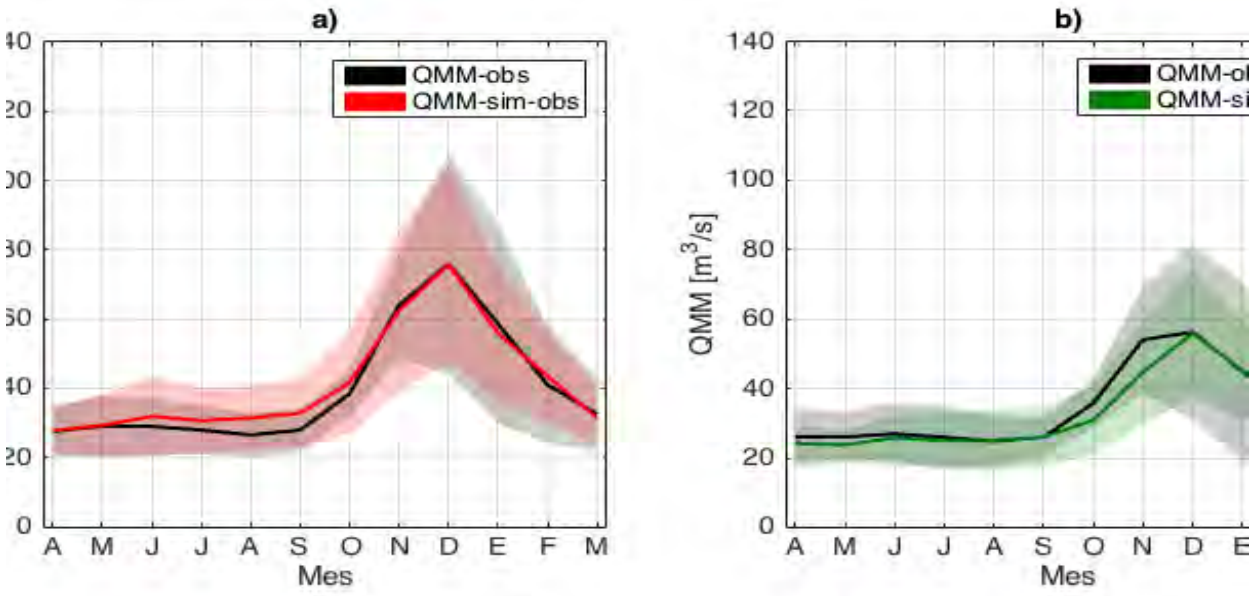


Figura 7.19. Caudales medios mensuales promedio para los periodos de calibración (a) y validación (b) en Invernada. Se muestra la media y el rango de variabilidad (desviación estándar). Caudales observados (QMM-obs) y caudales simulados (QMM-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.20** se muestra el ajuste de la variabilidad mediante las curvas de duración en los periodos de calibración (rojo) y validación (verde), empleando la misma nomenclatura de colores utilizada en la figura anterior. Como se observa, en ambos periodos se obtiene un adecuado ajuste de las curvas de duración observada y simulada, aunque en el periodo de validación (b) el modelo no logra reproducir los máximos caudales observados (bajas probabilidades de excedencia), subestimando dichos caudales.

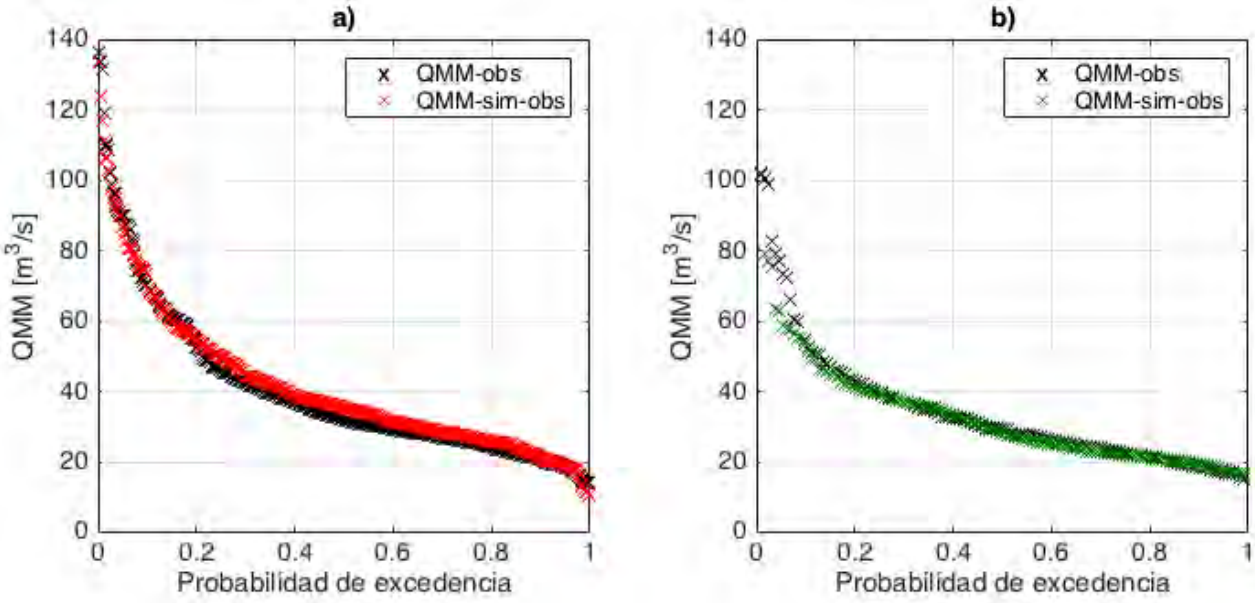


Figura 7.20. Curvas de duración de caudales medios mensuales en periodo de calibración (a) y validación (b) en Invernada. Caudales observados (QMM-obs) y caudales simulados (QMM-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.21** se analiza la correlación obtenida en la representación de los caudales medios mensuales en los periodos de calibración (a), con un R^2 de 0,790, y validación (b), con un R^2 de 0,805. Como se aprecia, en ambos casos se tiene un ajuste aceptable y similar del modelo hidrológico, observándose una mayor dispersión en los caudales altos para el periodo de calibración. Se aprecia además la subestimación de los caudales máximos en el periodo de validación.

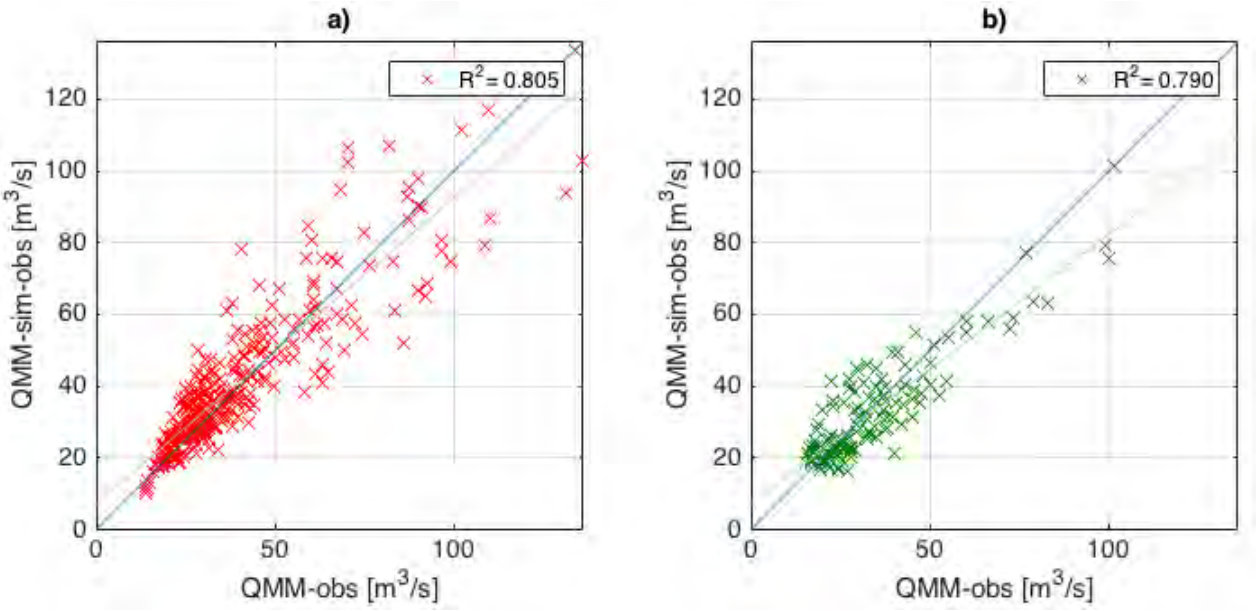


Figura 7.21. Correlación de caudales medios mensuales observados y simuados en periodo de calibración (a) y validación (b) en Invernada. Se muestra además el coeficiente de ajuste para cada set de datos. Caudales observados (QMM-obs) y simulados con datos observados (QMM-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.22** se presentan las curvas de variación estacional para tres probabilidades de excedencia representativas, en el periodo conjunto de calibración y validación para una mayor representatividad. Como se observa, el modelo presenta un buen ajuste para probabilidades medias y bajas en el periodo invernal, mientras que en el periodo de deshielo se aprecia un desfase en el mes de máxima escorrentía. Para probabilidades de excedencia altas el modelo tiende a sobreestimar los caudales invernales del sistema.

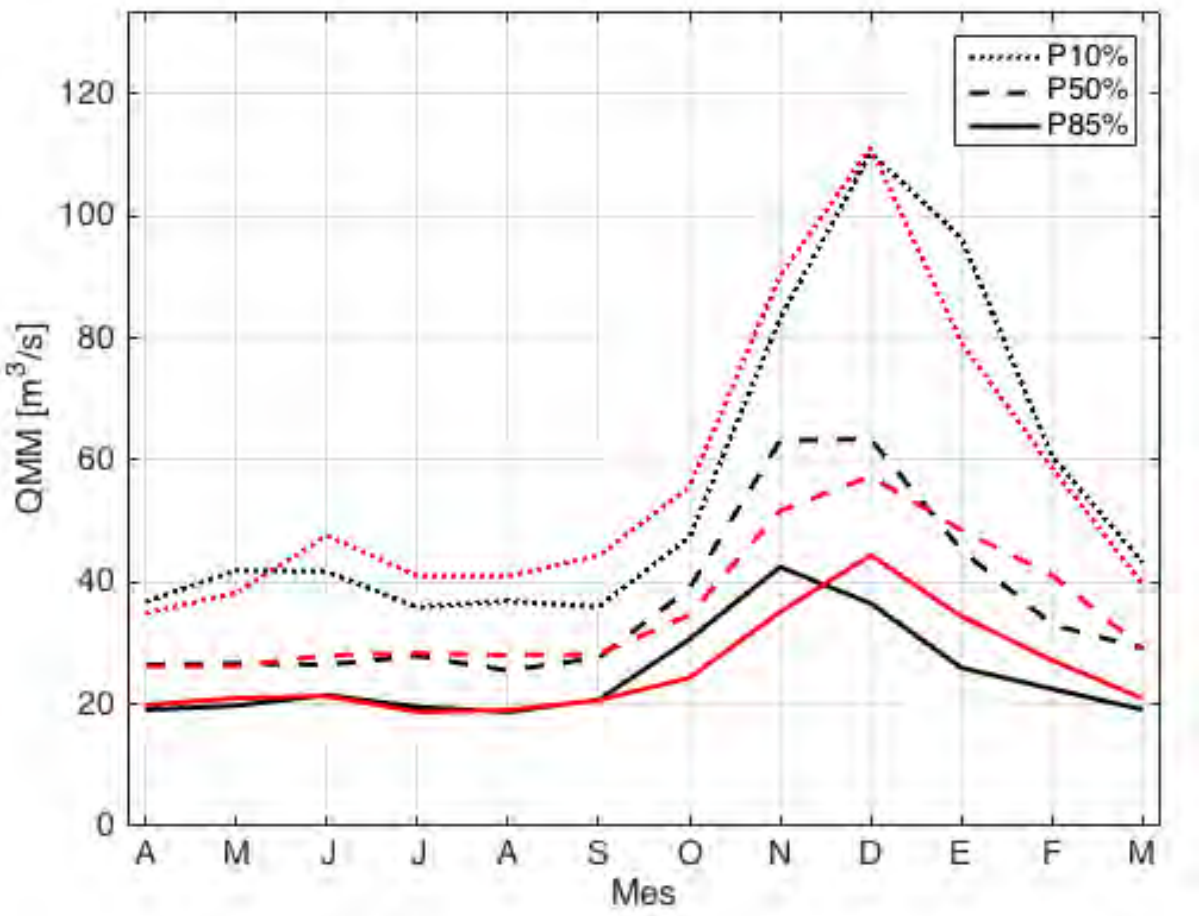


Figura 7.22. Curvas de variación estacional de los caudales medios mensuales en Invernada, correspondientes a las probabilidades de excedencia de 10, 50 y 85%. En negro se muestran los caudales observados, mientras que en rojo se muestran los datos simulados. Se utiliza el periodo conjunto de calibración y validación (1976/77-2013/14). Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 7.6** se presenta un resumen de los indicadores de ajuste obtenidos en los periodos de calibación y validación, para la variable caudal: coeficientes de bondad de ajuste o correlación (R^2), error medio, error cuadrático medio (ECM) y Nash-Suttclife. Se aprecia que el modelo logra una adecuada representación de los fenómenos hidrológicos que originan los caudales en la subcuenca de Invernada.

Tabla 7.6. Indicadores de ajuste del caudal en Invernada: coeficientes de bondad de ajuste o correlación (R^2), error medio, error cuadrático medio (ECM) y de Nash-Sutcliffe. Fuente: Elaboración propia.

Periodo de Análisis	R^2	Error Medio [m^3/s]	ECM [$m^3/s]^2$	Nash-Sutcliffe
Calibración	0,805	1,35	9,92	0,799
Validación	0,790	-1,30	7,97	0,783

7.3.2.2 Equivalente en agua de la nieve (SWE)

En la **Figura 7.23** se presentan las series de tiempo del SWE total mensual observado (negro), junto con las series de tiempo de SWE total mensual simulado en el periodo de calibración (rojo) y validación (verde).

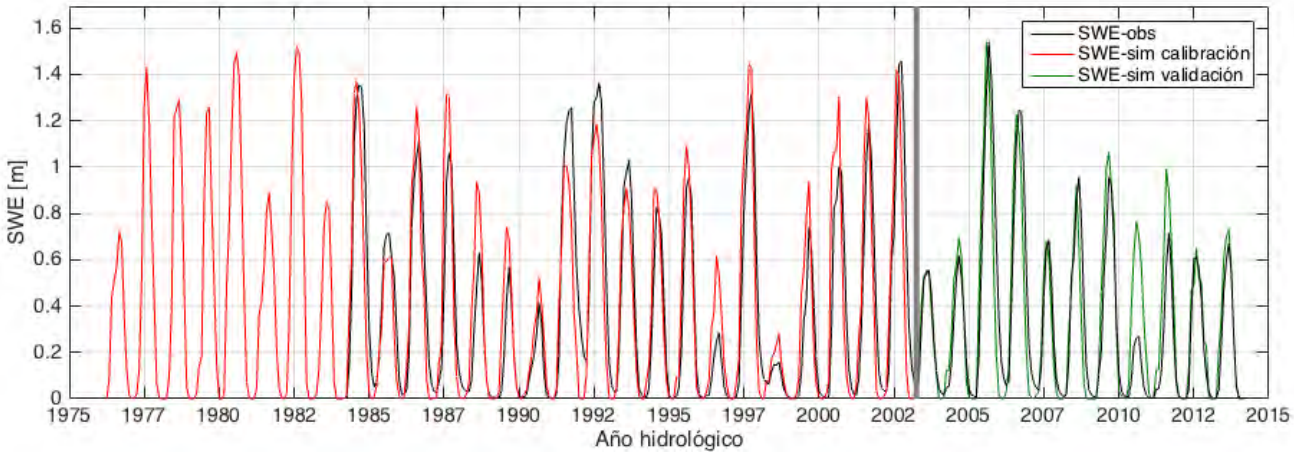


Figura 7.23. Series de tiempo de SWE total mensual observado (SWE-obs; negro) y simulado en el periodo de calibración (SWE-sim-obs calibración; rojo) y validación (SWE-sim-obs validación; verde), en Invernada. Fuente: Elaboración propia.

En conjunto con el proceso de ajuste de la variable caudal, se llevó a cabo un proceso paralelo de ajuste del proceso de acumulación de nieves, gracias a la obtención del SWE mediante un análisis de imágenes satelitales. En el caso de Invernada, este ajuste permitió detectar dificultades en la obtención de la estacionalidad observada de acumulación de nieves, como se aprecia en la **Figura 7.24**, donde se presenta el SWE total mensual promedio para los periodos de calibración (a) y validación (b). Como se observa en el periodo de calibración, el SWE simulado tiende a ser mayor que la variable observada, lo cual mejora levemente en el periodo de validación. También es posible ver que la máxima acumulación simulada se produce un mes antes que la variable observada, en ambos periodos. Debido al carácter netamente nival de Invernada, estos resultados explican el desfase observado en el mes de caudales máximos, para caudales de probabilidad de excedencia media y baja.

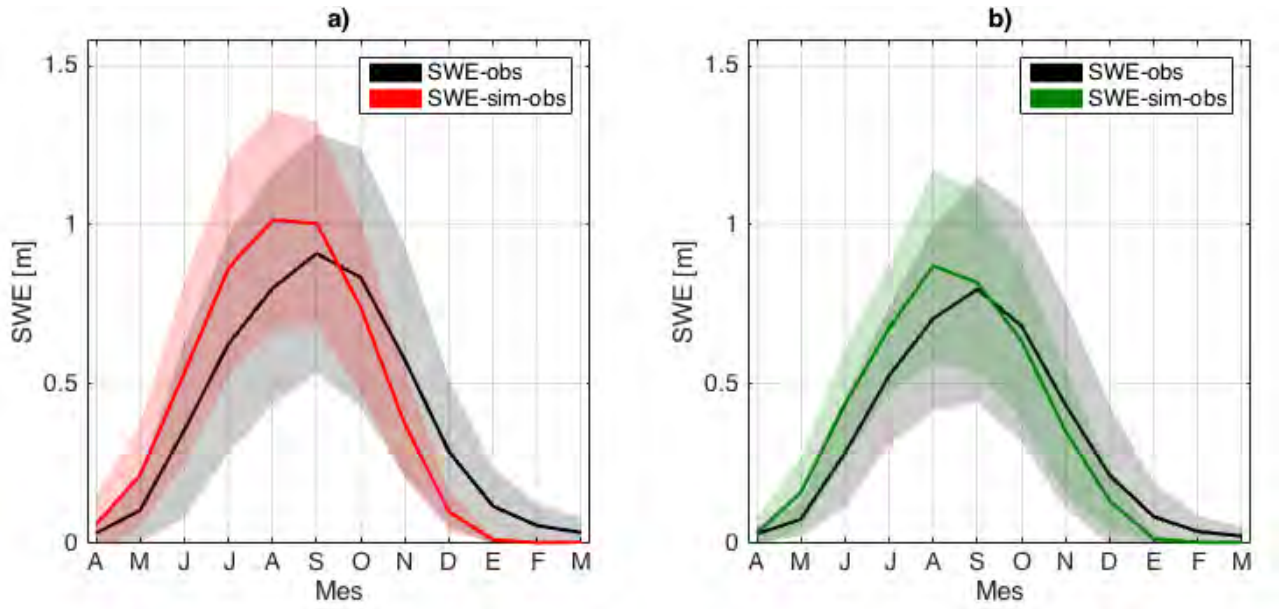


Figura 7.24. SWE total mensual promedio para los periodos de calibración (a) y validación (b) en Invernada. Se muestra la media y el rango de variabilidad (desviación estándar). SWE observado (SWE-obs) y simulados con datos observados (SWE-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.25** se analiza el ajuste de la variabilidad mediante las curvas de duración del SWE total menual, para la calibración (rojo) y validación (verde). En negro se muestran los valores observados. Como se observa, en la calibración (a) hay un ajuste adecuado para todas las probabilidades de excedencia. En la validación (b) el ajuste general es menor, aunque logra reproducir adecuadamente los meses de mayor y menor acumulación de nieve.

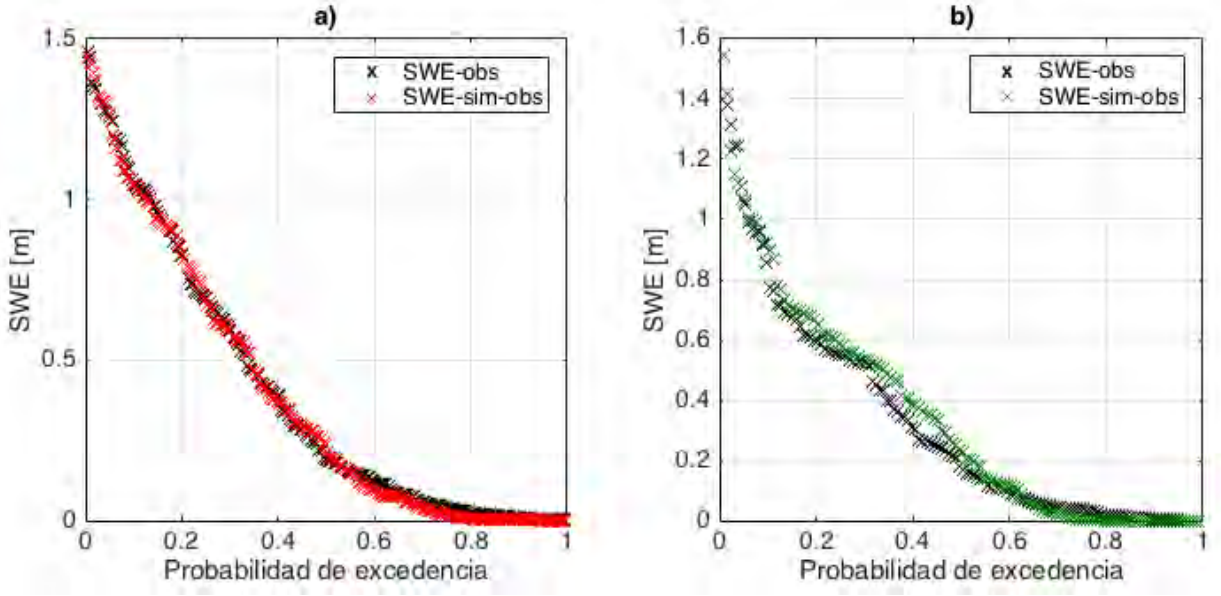


Figura 7.25. Curvas de duración de SWE total mensual en periodo de calibración (a) y validación (b) en Invernada. SWE observado (SWE-obs) y simulados con datos observados (SWE-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.26** se analiza la correlación obtenida en la representación del SWE en los periodos calibración (a), con un R^2 de 0,775, y validación (b), con un R^2 de 0,786. Como se aprecia, en ambos casos se tiene un ajuste similar y aceptable del modelo hidrológico, pese a las diferencias en la estacionalidad. En el caso de Invernada, se aprecia una importante dispersión de los caudales simulados respecto a los caudales observados, en todo el espectro de magnitudes.

En la **Tabla 7.7** se presenta un resumen de los indicadores de ajuste obtenidos en los periodos de calibación y validación, para la variable SWE: coeficientes de bondad de ajuste o correlación (R^2), error medio, error cuadrático medio (ECM) y Nash-Suttclife. Se observa que el modelo logra una adecuada representación de los fenómenos responsables de la acumulación de nieves en la subcuenca de Invernada.

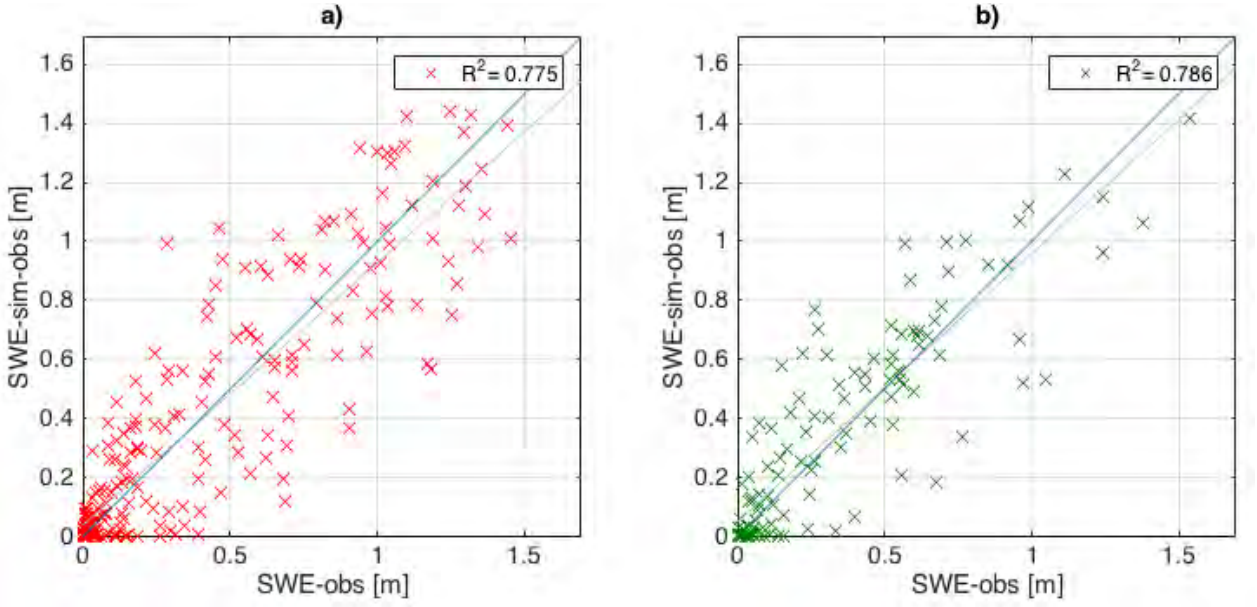


Figura 7.26. Correlación de SWE total mensual para los periodos de calibración (a) y validación (b) en Invernada. Se muestra además el coeficiente de ajuste para cada set de datos. SWE observado (SWE-obs) y SWE simulados (SWE-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.7. Indicadores de ajuste de SWE en Invernada: coeficientes de bondad de ajuste o correlación (R^2), error medio, error cuadrático medio (ECM) y de Nash-Sutcliffe. Fuente: Elaboración propia.

Periodo de Análisis	R^2	Error Medio [m]	ECM [m^2]	Nash-Sutcliffe
Calibración	0,775	-0,01	0,17	0,759
Validación	0,786	0,02	0,17	0,764

7.3.3 Maule

7.3.3.1 Caudales

En la **Figura 7.27** se presentan las series de tiempo de los caudales medios mensuales observados (negro), junto con las series de tiempo de caudales medios mensuales simulados en el periodo de calibración (rojo) y validación (verde).

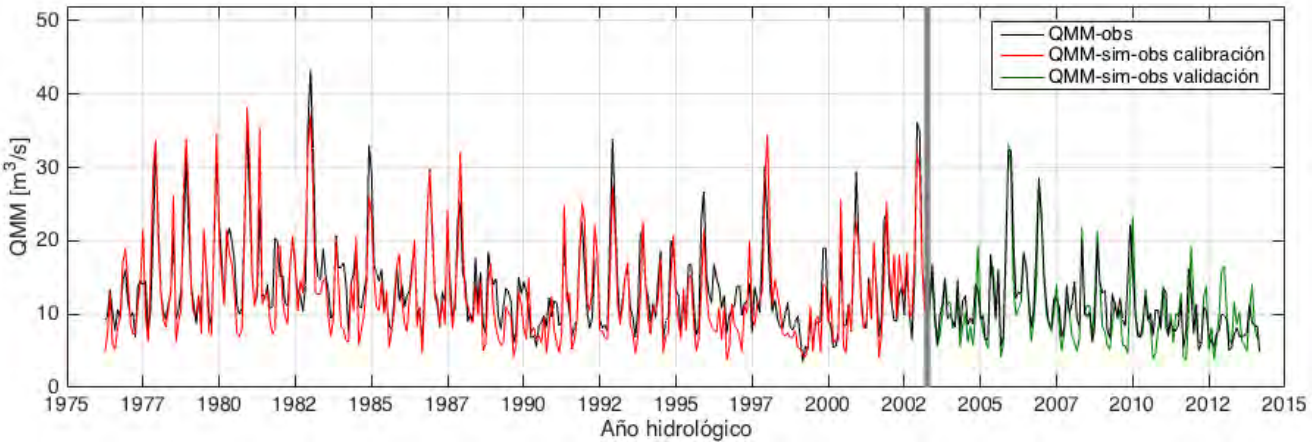


Figura 7.27. Series de tiempo de caudales medios mensuales observados (QMM-obs) y simulados en el periodo de calibración (QMM-sim-obs calibración) y validación (QMM-sim-obs validación), en Maule. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.28** se analiza el ajuste de la estacionalidad mediante los caudales medios mensuales promedio obtenidos para los periodos de calibración (rojo) y validación (verde). En negro se muestran los valores observados. Como se puede apreciar, el modelo tiende a subestimar los caudales observados en ambos periodos, mientras que la desviación estándar no muestra tendencias significativas de sobre o subrepresentación en la temporada de deshielo. En el periodo de calibración (a) se observa una mayor desviación estándar de la simulación en la temporada invernal y comienzo de los deshielos. Tanto en la calibración como en la validación los caudales simulados muestran una mayor desviación estándar en los meses de menor caudal.

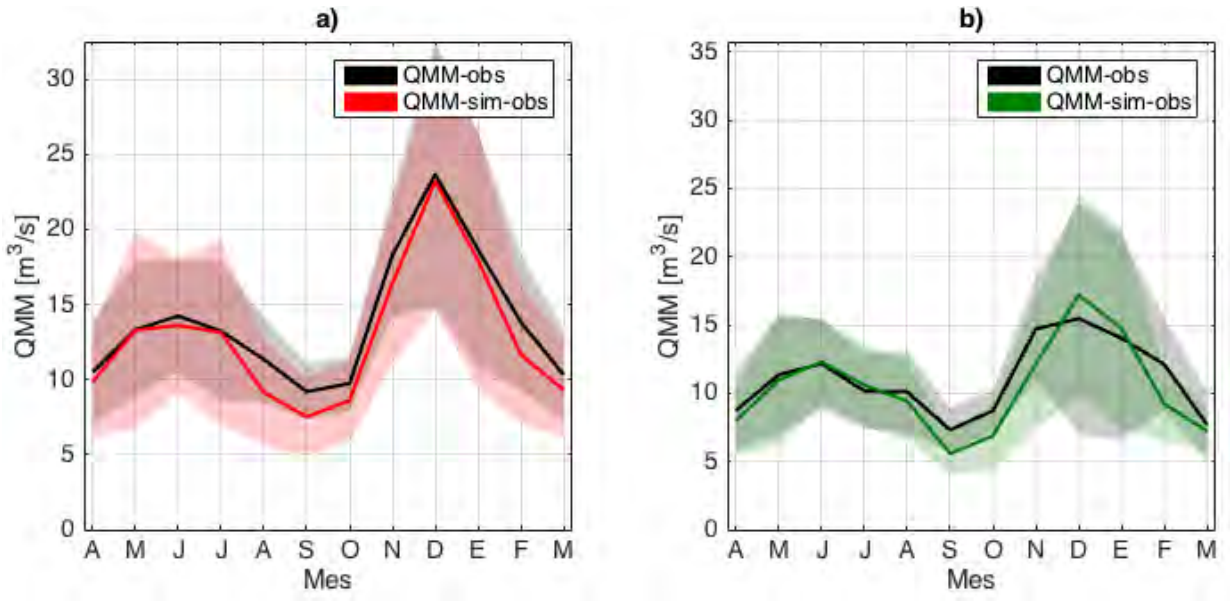


Figura 7.28. Caudales medios mensuales promedio para los periodos de calibración (a) y validación (b) en Maule. Se muestra la media y el rango de variabilidad (desviación estándar). Caudales observados (QMM-obs) y caudales simulados (QMM-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.29** se muestra el ajuste de la variabilidad mediante las curvas de duración en los periodos de calibración (rojo) y validación (verde), empleando la misma nomenclatura de colores utilizada en la figura anterior. Como se observa, se confirma la tendencia del modelo a la subestimación de los caudales observados, aunque se logra una adecuada estimación de los meses de mayores caudales, para probabilidades de excedencia mayores al 30% en el periodo de calibración y mayores al 65% en el periodo de validación.

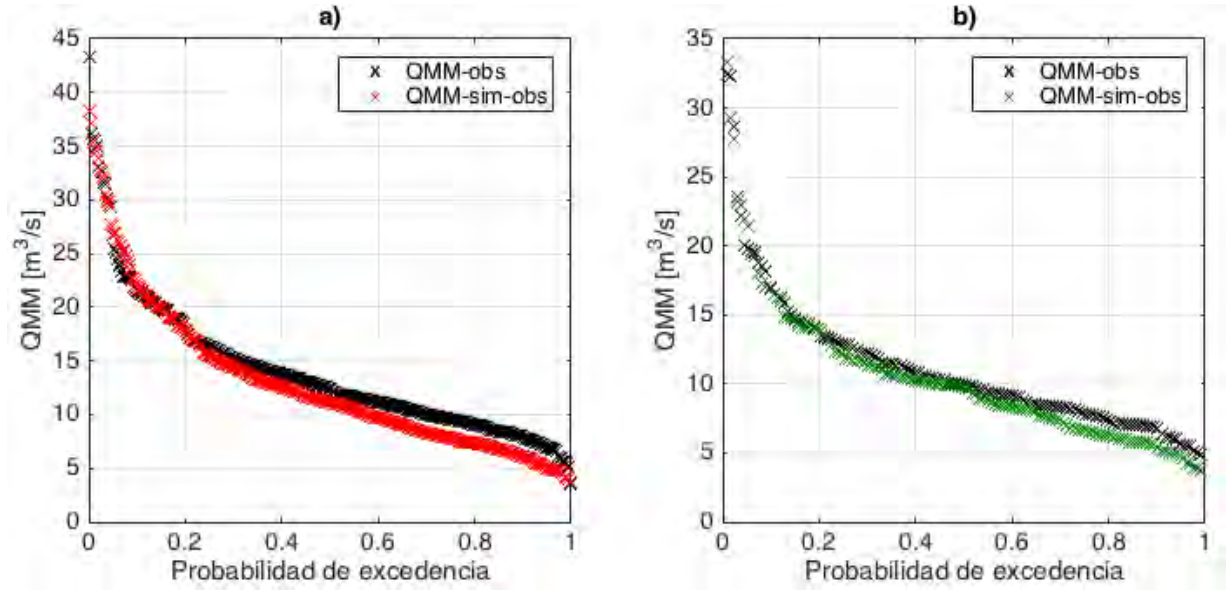


Figura 7.29. Curvas de duración de caudales medios mensuales en periodo de calibración (a) y validación (b) en Maule. Caudales observados (QMM-obs) y caudales simulados (QMM-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.30** se analiza la correlación obtenida en la representación de los caudales medios mensuales en los periodos de calibración (a), con un R^2 de 0,772, y validación (b), con un R^2 de 0,704. Como se aprecia, en ambos casos se tiene un ajuste aceptable del modelo hidrológico, observándose una mayor dispersión en la representación de los caudales altos respecto a los caudales medios y bajos, lo cual explica el coeficiente de correlación obtenido en el periodo de calibración. Los años más secos en el periodo de validación tienden a disminuir la correlación obtenida en el periodo de calibración.

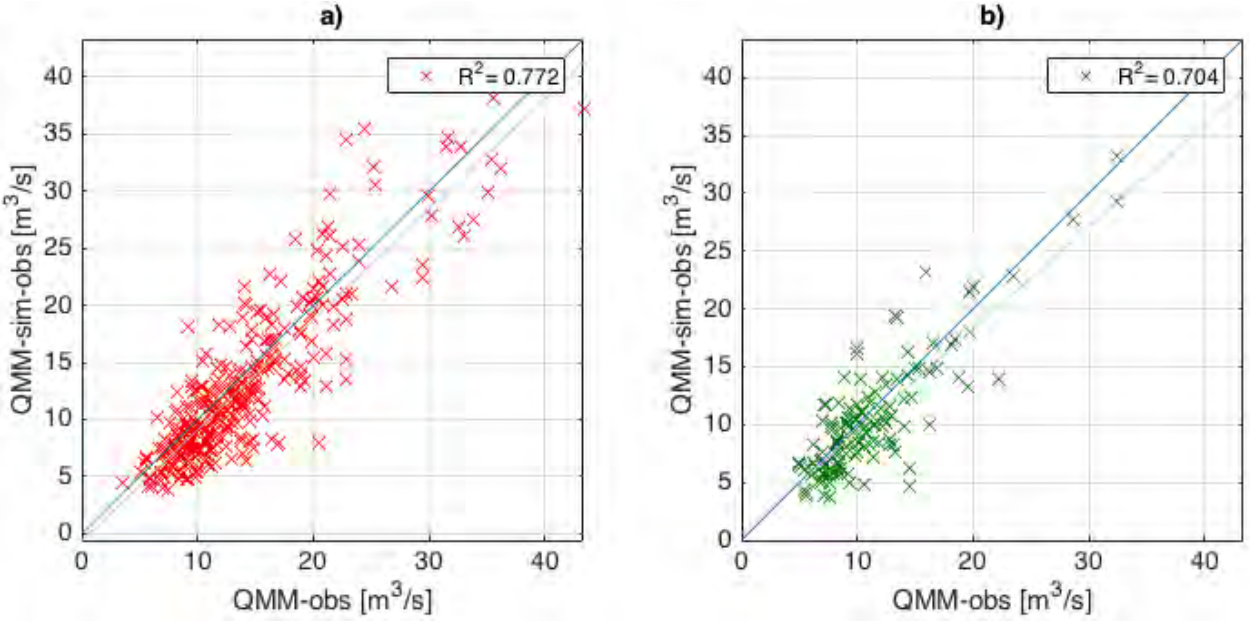


Figura 7.30. Correlación de caudales medios mensuales observados y simuados en periodo de calibración (a) y validación (b) en Maule. Se muestra además el coeficiente de ajuste para cada set de datos. Caudales observados (QMM-obs) y simulados con datos observados (QMM-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.31** se presentan las curvas de variación estacional para tres probabilidades de excedencia representativas, en el periodo conjunto de calibración y validación para una mayor representatividad. Como se observa, el modelo muestra un mejor ajuste para probabilidades bajas (años húmedos), mientras que para medias y bajas la calidad del ajuste disminuye.

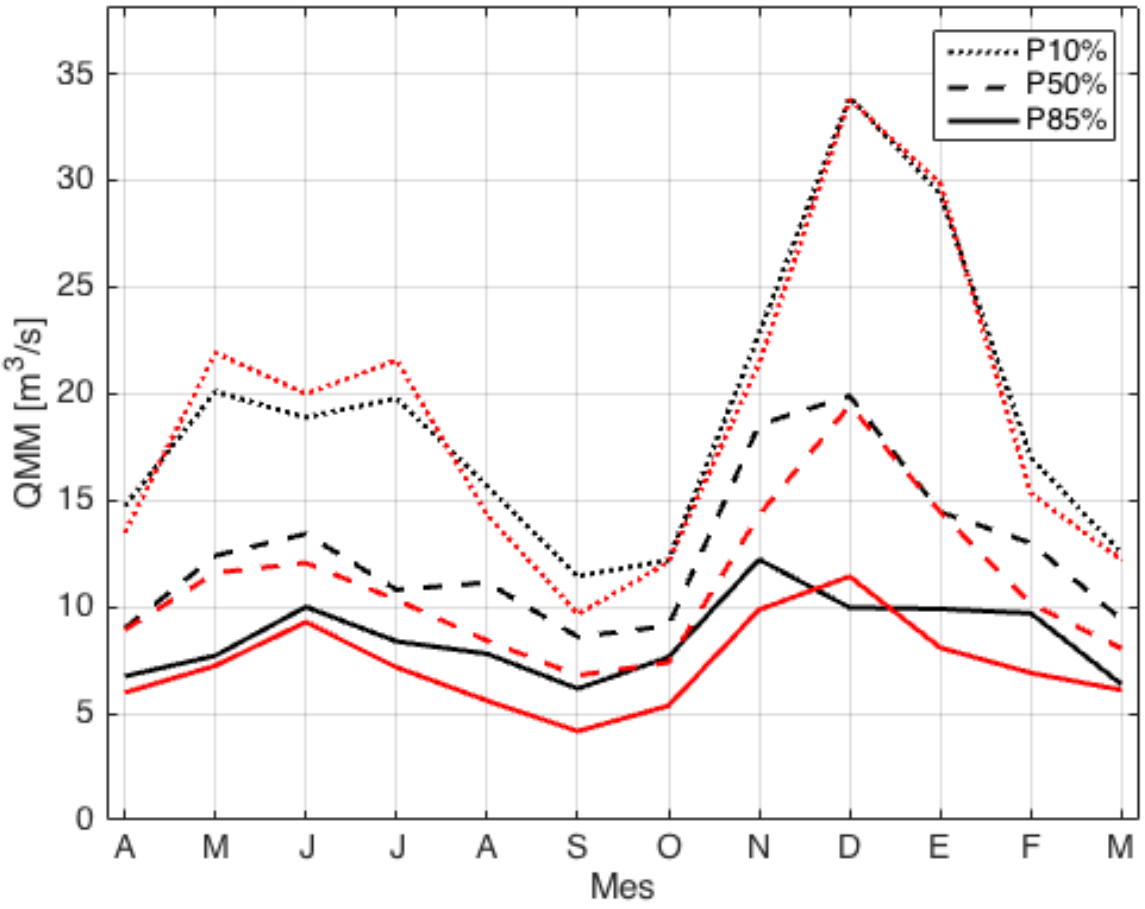


Figura 7.31. Curvas de variación estacional de los caudales medios mensuales en Maule, correspondientes a las probabilidades de excedencia de 10, 50 y 85%. En negro se muestran los caudales observados, mientras que en rojo se muestran los datos simulados. Se utiliza el periodo conjunto de calibración y validación (1976/77-2013/14). Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 7.8** se presenta un resumen de los indicadores de ajuste obtenidos en los periodos de calibación y validación, para la variable caudal: coeficientes de bondad de ajuste o correlación (R^2), error medio, error cuadrático medio (ECM) y Nash-Suttclife. Se aprecia que el modelo logra una adecuada representación de los fenómenos hidrológicos que originan los caudales en la subcuenca del Maule, aunque el coeficiente de Nash-Sutcliffe refleja las diferencias observadas en años normales a secos.

Tabla 7.8. Indicadores de ajuste del caudal en Maule: coeficientes de bondad de ajuste o correlación (R^2), error medio, error cuadrático medio (ECM) y de Nash-Sutcliffe. Fuente: Elaboración propia.

Periodo de Análisis	R^2	Error Medio [m^3/s]	ECM [$m^3/s]^2$	Nash-Sutcliffe
Calibración	0,772	-1,05	3,44	0,695
Validación	0,704	-0,69	2,92	0,639

7.3.3.2 Equivalente en agua de la nieve (SWE)

En la **Figura 7.32** se presentan las series de tiempo del SWE total mensual observado (negro), junto con las series de tiempo de SWE total mensual simulado en el periodo de calibración (rojo) y validación (verde).

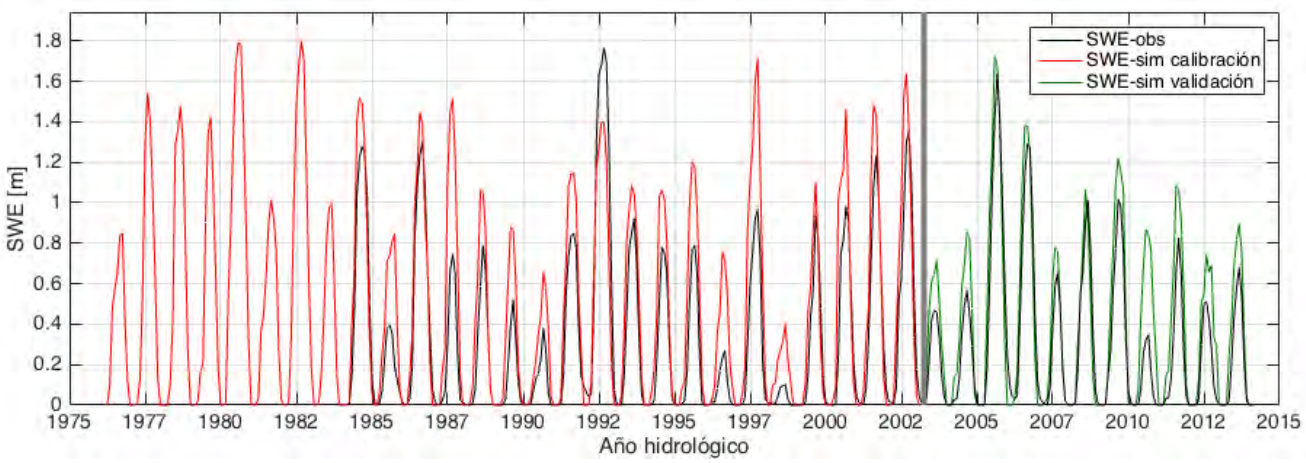


Figura 7.32. Series de tiempo de SWE total mensual observado (SWE-obs; negro) y simulado en el periodo de calibración (SWE-sim-obs calibración; rojo) y validación (SWE-sim-obs validación; verde), en Maule. Fuente: Elaboración propia.

En conjunto con el proceso de ajuste de la variable caudal, se llevó a cabo un proceso paralelo de ajuste del proceso de acumulación de nieves, gracias a la obtención del SWE mediante un análisis de imágenes satelitales. En el caso del Maule, este ajuste permitió detectar dificultades en la obtención de la estacionalidad observada de acumulación de nieves, como se aprecia en la **Figura 7.33**, donde se presenta el SWE total mensual promedio para los periodos de calibración (a) y validación (b). Como se aprecia, en ambos periodos el modelo sobreestima la acumulación de nieve sobre la subcuenca, pese a lo cual esto no logra generar caudales adecuados. En el caso particular de Maule, se observó la mayor diferencia de las subcuencas analizadas, entre las series observadas y simuladas de Q y SWE, ya que no fue posible mejorar la calibración de SWE sin disminuir la calidad de la calibración de Q, siendo este último el resultado más importante debido a su relación directa con la generación hidroeléctrica. Esto se debería a la estimación de las forzantes meteorológicas mediante el uso de gradientes (PP y T°), las cuales no estarían dando cuenta de la meteorología real en la subcuenca del Maule.

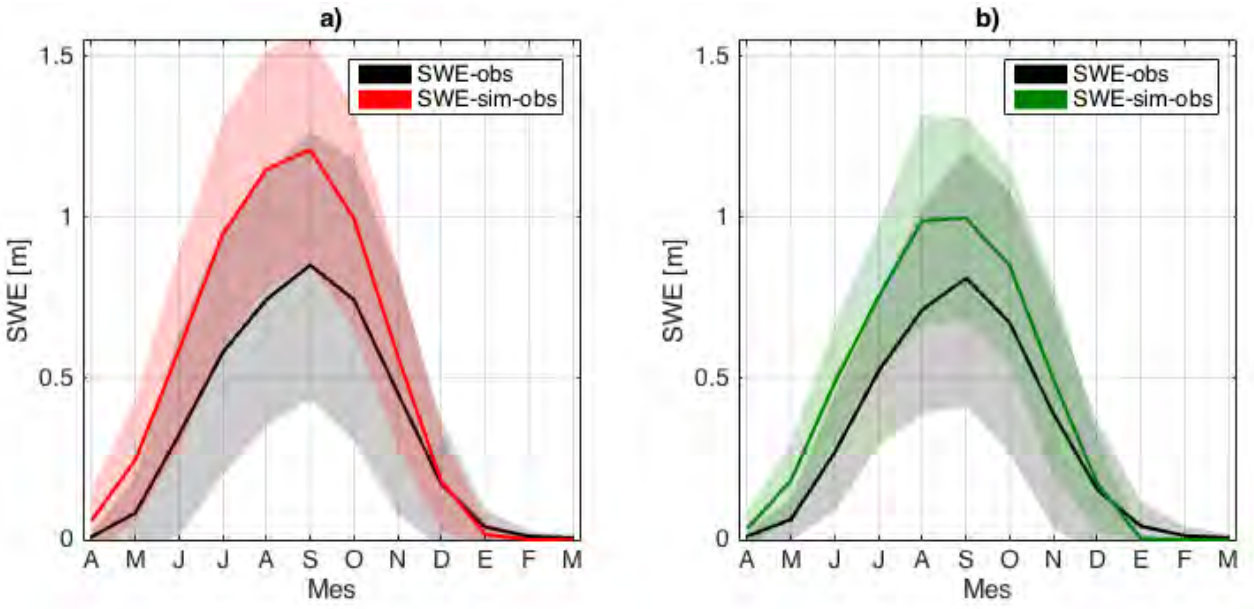


Figura 7.33. SWE total mensual promedio para los periodos de calibración (a) y validación (b) en Maule. Se muestra la media y el rango de variabilidad (desviación estándar). SWE observado (SWE-obs) y simulados con datos observados (SWE-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.34** se analiza el ajuste de la variabilidad mediante las curvas de duración del SWE total menual, para la calibración (rojo) y validación (verde). En negro se muestran los valores observados. Como se observa, en ambos periodos se obtiene una sobreestimación de la acumulación comprendida entre el 5% y 70% de probabilidad de excedencia, acorde con lo mostrado en la **Figura 7.33**.

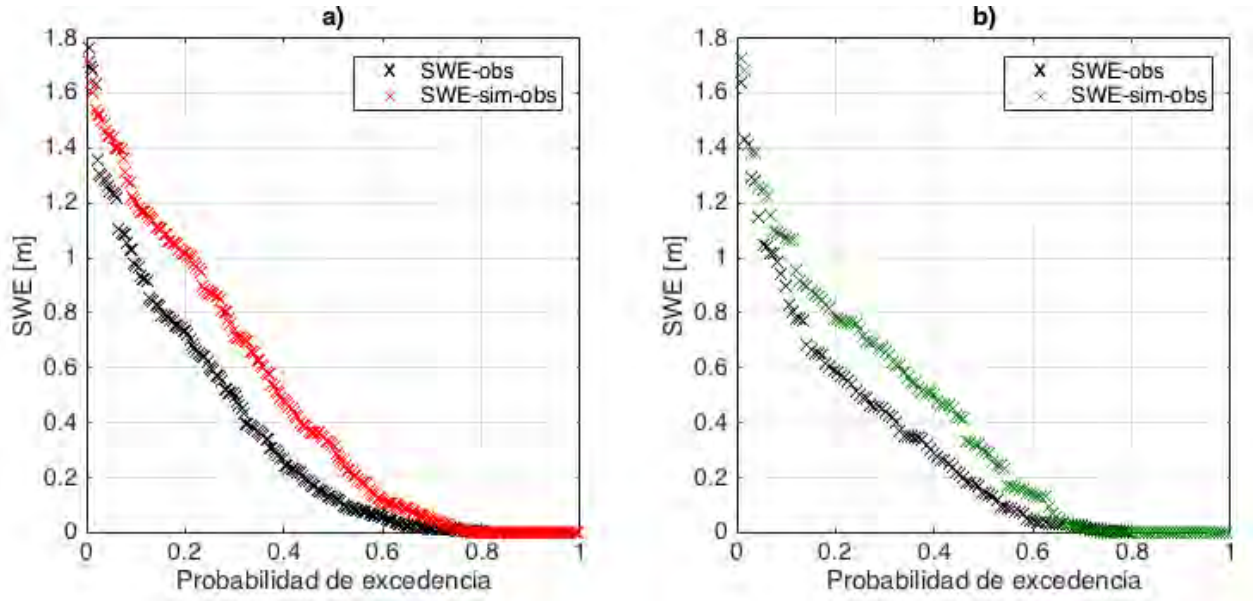


Figura 7.34. Curvas de duración de SWE total mensual en periodo de calibración (a) y validación (b) en Maule. SWE observado (SWE-obs) y simulados con datos observados (SWE-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.35** se analiza la correlación obtenida en la representación del SWE en los periodos calibración (a), con un R^2 de 0,803, y validación (b), con un R^2 de 0,861. Como se aprecia, en ambos casos se tiene un ajuste similar y aceptable del modelo hidrológico, pese a las diferencias en la magnitud y estacionalidad. También se aprecia que existe la posibilidad de mejorar la correspondencia entre las magnitudes, sin embargo, esto afecta la calidad de la calibración de los caudales.

En la **Tabla 7.9** se presenta un resumen de los indicadores de ajuste obtenidos en los periodos de calibación y validación, para la variable SWE: coeficientes de bondad de ajuste o correlación (R^2), error medio, error cuadrático medio (ECM) y Nash-Suttclife. Se observa que el modelo logra una adecuada representación de los fenómenos responsables de la acumulación de nieves en la subcuenca del Maule, aunque el coeficiente de Nash-Sutcliffe revela las diferencias obtenidas entre las series observadas y simuladas.

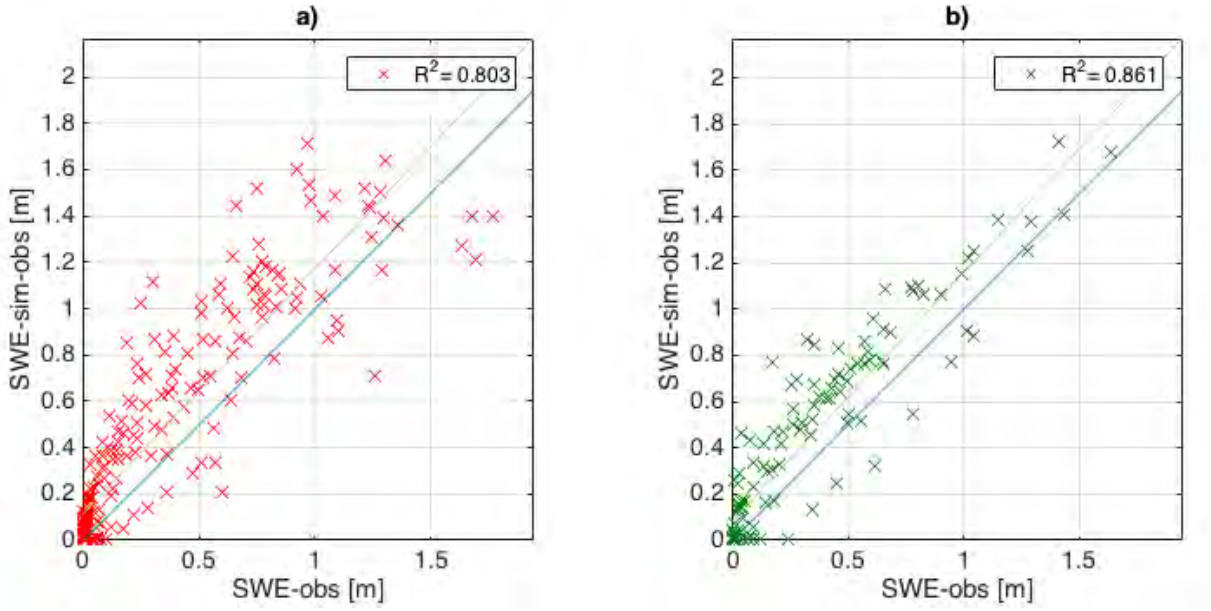


Figura 7.35. Correlación de SWE total mensual para los periodos de calibración (a) y validación (b) en Maule. Se muestra además el coeficiente de ajuste para cada set de datos. SWE observado (SWE-obs) y SWE simulados (SWE-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.9. Indicadores de ajuste de SWE en Maule: coeficientes de bondad de ajuste o correlación (R^2), error medio, error cuadrático medio (ECM) y de Nash-Sutcliffe. Fuente: Elaboración propia.

Periodo de Análisis	R^2	Error Medio [m]	ECM [m^2]	Nash-Sutcliffe
Calibración	0,803	0,13	0,22	0,619
Validación	0,861	0,11	0,20	0,724

7.3.4 Claro y Garzas

7.3.4.1 Caudales

En la **Figura 7.36** se presentan las series de tiempo de los caudales medios mensuales observados (negro), junto con las series de tiempo de caudales medios mensuales simulados en el periodo de calibración (rojo) y validación (verde).

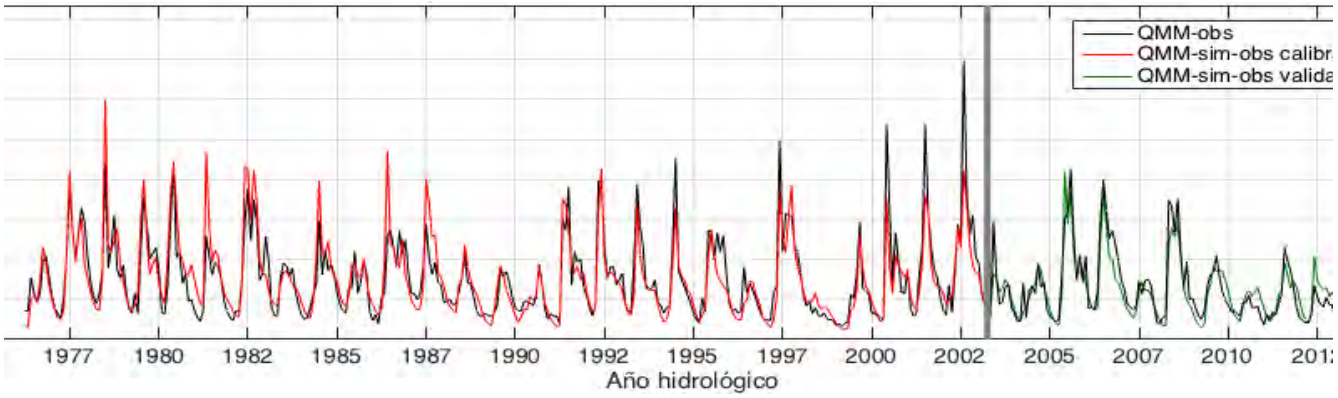


Figura 7.36. Series de tiempo de caudales medios mensuales observados (QMM-obs) y simulados en el periodo de calibración (QMM-sim-obs calibración) y validación (QMM-sim-obs validación), en Claro+Garzas. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.37** se analiza el ajuste de la estacionalidad mediante los caudales medios mensuales promedio obtenidos para los periodos de calibración (rojo) y validación (verde). En negro se muestran los valores observados. Como se puede apreciar, se obtiene un adecuado ajuste de la estacionalidad en ambos periodos, aunque en el periodo de validación los caudales simulados muestran una menor desviación estándar que los caudales observados. En el periodo de validación, los años secos presentes en los últimos años de estadística impactan durante todo el año, lo cual se debería a la simulación combinada de dos subcuencas de características diferentes, donde el 53% del área de Claro se encuentra bajo la línea de nieves promedio, en contraste con Garzas, que posee el 82% de su área bajo la línea de nieves promedio.

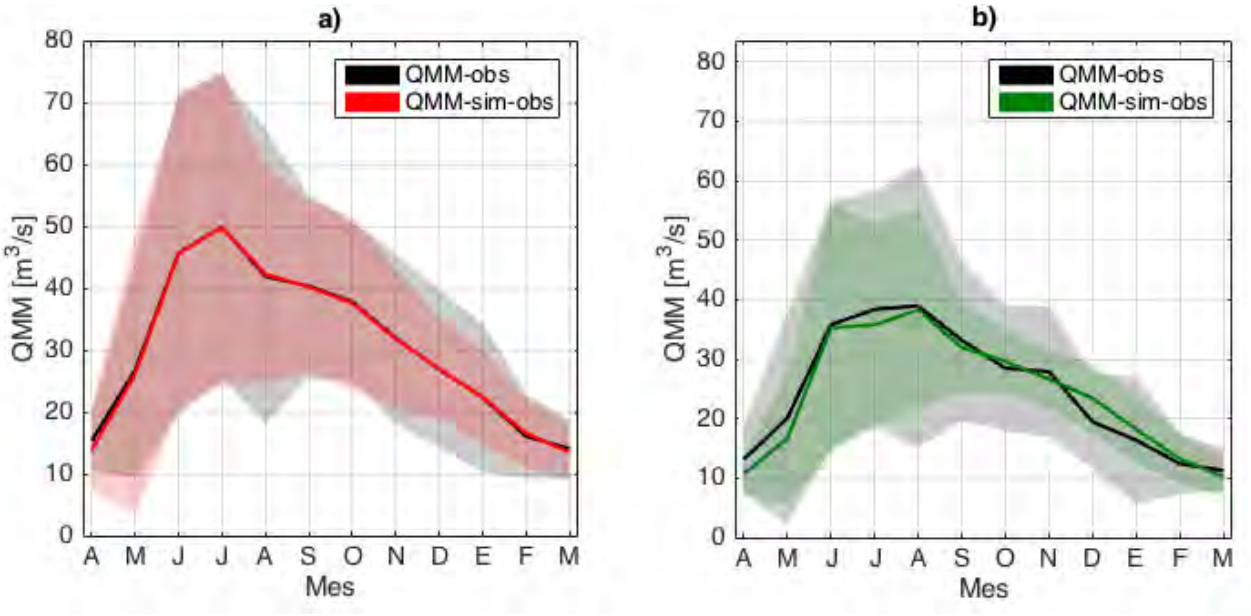


Figura 7.37. Caudales medios mensuales promedio para los periodos de calibración (a) y validación (b) en Claro+Garzas. Se muestra la media y el rango de variabilidad (desviación estándar). Caudales observados (QMM-obs) y caudales simulados (QMM-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.38** se muestra el ajuste de la variabilidad mediante las curvas de duración en los periodos de calibración (rojo) y validación (verde), empleando la misma nomenclatura de colores utilizada en la figura anterior. Se aprecia un ajuste adecuado en el periodo de calibración, salvo por la dificultad del modelo en la simulación de los caudales medios mensuales máximos del periodo. En el periodo de validación se observan algunas diferencias entre el 40% y 60% de probabilidad de excedencia, donde los caudales simulados sobreestiman las observaciones, así como entre el 5% y el 20% de probabilidad de excedencia (reflejo de caudales máximos), donde el modelo subestima los caudales observados.

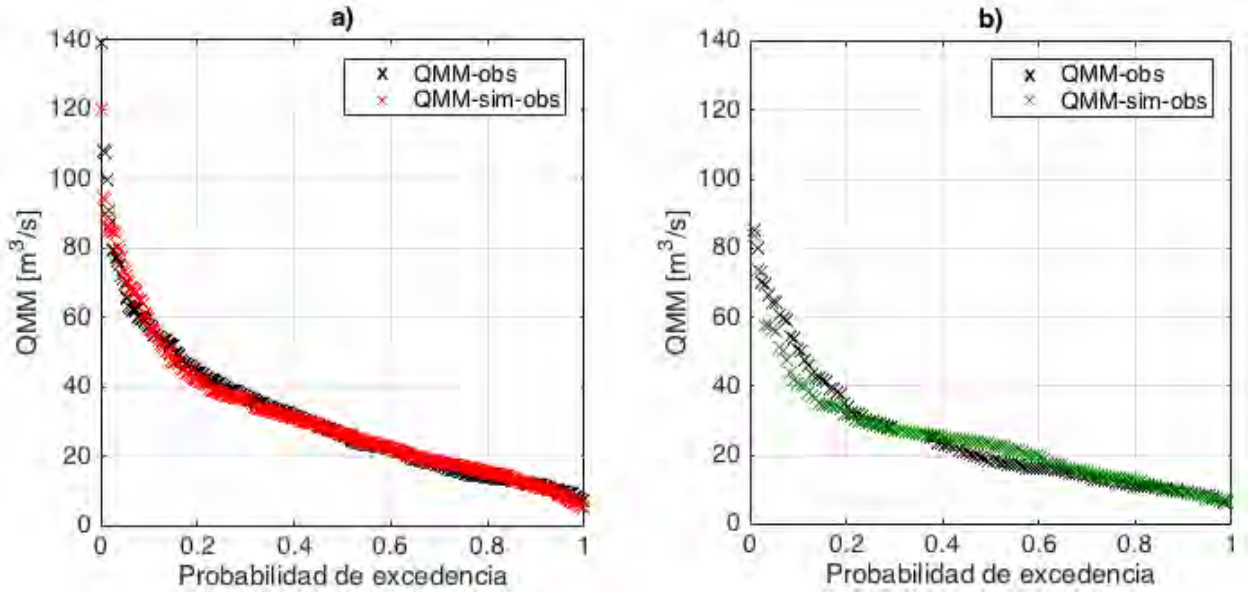


Figura 7.38. Curvas de duración de caudales medios mensuales en periodo de calibración (a) y validación (b) en Claro+Garzas. Caudales observados (QMM-obs) y caudales simulados (QMM-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.39** se analiza la correlación obtenida en la representación de los caudales medios mensuales en los periodos de calibración (a), con un R^2 de 0,751, y validación (b), con un R^2 de 0,799. Como se aprecia, en ambos casos se tiene un ajuste aceptable del modelo hidrológico, observándose una mayor dispersión en los caudales altos para el periodo de calibración. Los años más secos en el periodo de validación tienden a mejorar la correlación obtenida.

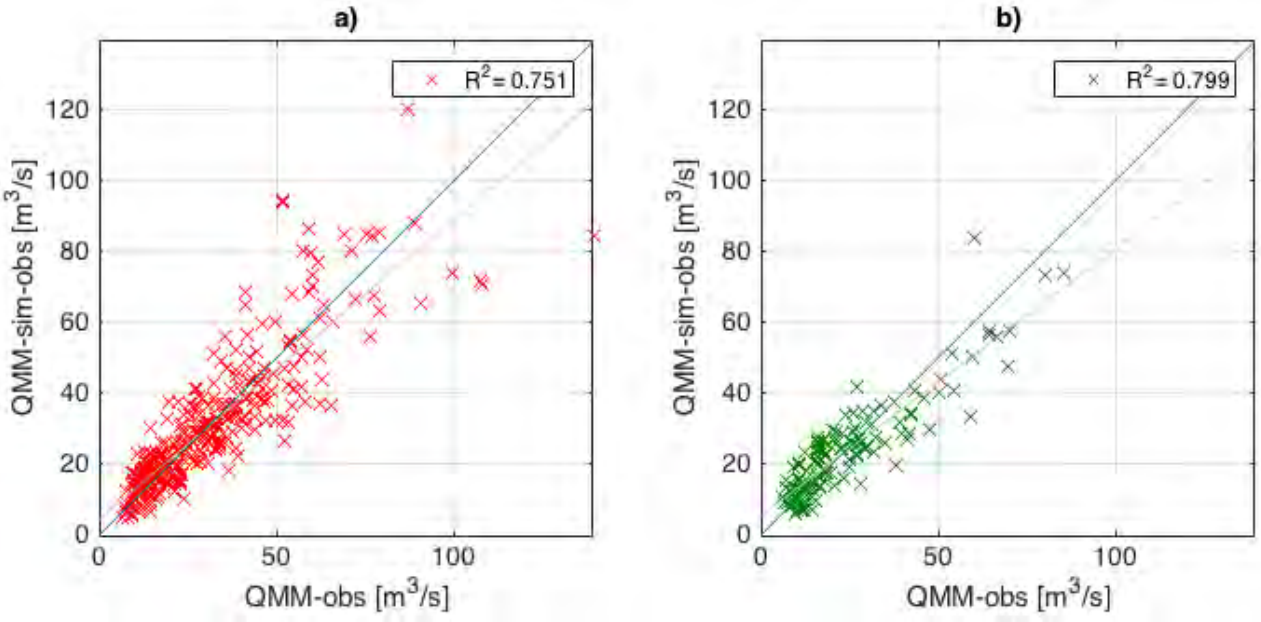


Figura 7.39. Correlación de caudales medios mensuales observados y simuados en periodo de calibración (a) y validación (b) en Claro+Garzas. Se muestra además el coeficiente de ajuste para cada set de datos. Caudales observados (QMM-obs) y simulados con datos observados (QMM-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.40** se presentan las curvas de variación estacional para tres probabilidades de excedencia representativas, en el periodo conjunto de calibración y validación para una mayor representatividad. Como se observa, el modelo presenta un buen ajuste en todo el rango de probabilidades, con una leve tendencia a sobreestimar los caudales observados en años secos, mientras que en años húmedos (P10%) el modelo subestima los caudales observados.

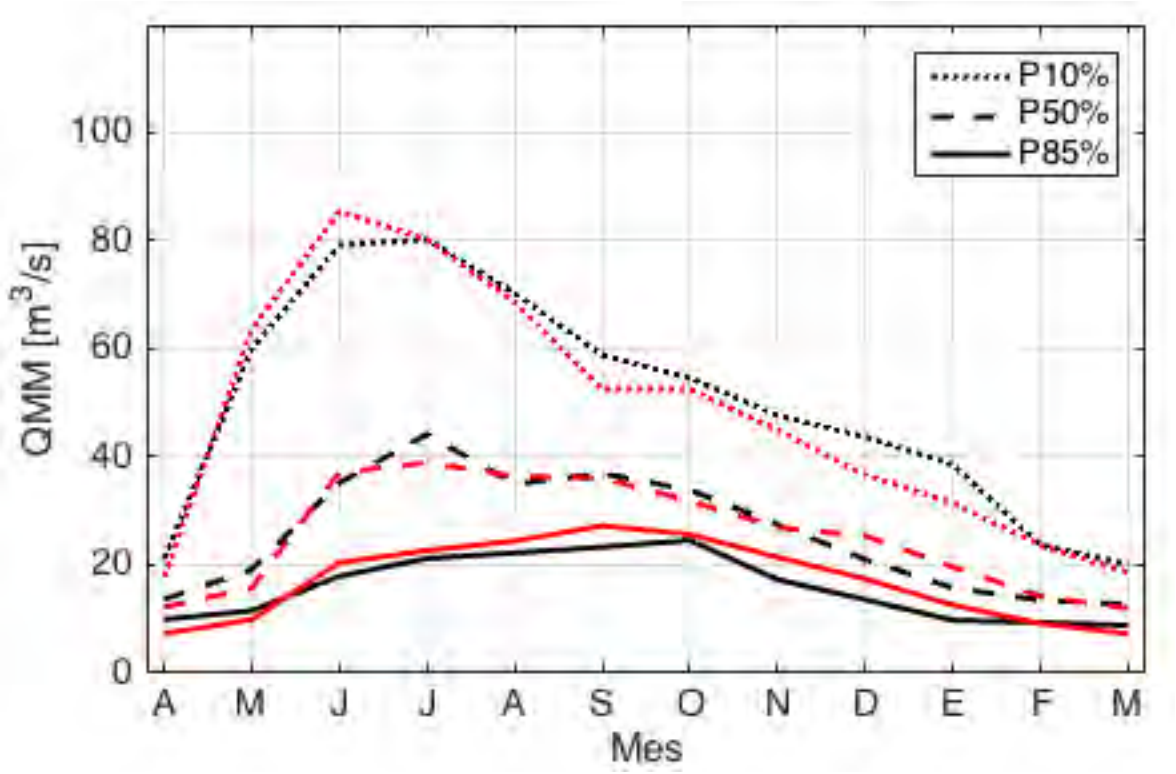


Figura 7.40. Curvas de variación estacional de los caudales medios mensuales en Claro+Garzas, correspondientes a las probabilidades de excedencia de 10, 50 y 85%. En negro se muestran los caudales observados, mientras que en rojo se muestran los datos simulados. Se utiliza el periodo conjunto de calibración y validación (1976/77-2013/14). Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 7.10** se presenta un resumen de los indicadores de ajuste obtenidos en los periodos de calibación y validación, para la variable caudal: coeficientes de bondad de ajuste o correlación (R^2), error medio, error cuadrático medio (ECM) y Nash-Suttclife. Se aprecia que el modelo logra una adecuada representación de los fenómenos hidrológicos que originan los caudales en las subcuencas de Claro y Garzas.

Tabla 7.10. Indicadores de ajuste del caudal en Claro+Garzas: coeficientes de bondad de ajuste o correlación (R^2), error medio, error cuadrático medio (ECM) y de Nash-Sutcliffe. Fuente: Elaboración propia.

Periodo de Análisis	R^2	Error Medio [m^3/s]	ECM [$m^3/s]^2$	Nash-Sutcliffe
Calibración	0,751	-0,18	10,10	0,740
Validación	0,799	-0,46	7,54	0,796

7.3.4.2 Equivalente en agua de la nieve (SWE)

En la **Figura 7.41** se presentan las series de tiempo del SWE total mensual observado (negro), junto con las series de tiempo de SWE total mensual simulado en el periodo de calibración (rojo) y validación (verde). Como se aprecia, en el caso de la variable de estado SWE se puede calibrar cada cuenca por separado, a diferencia del caudal. En a) se presenta Claro y en b) Garzas.

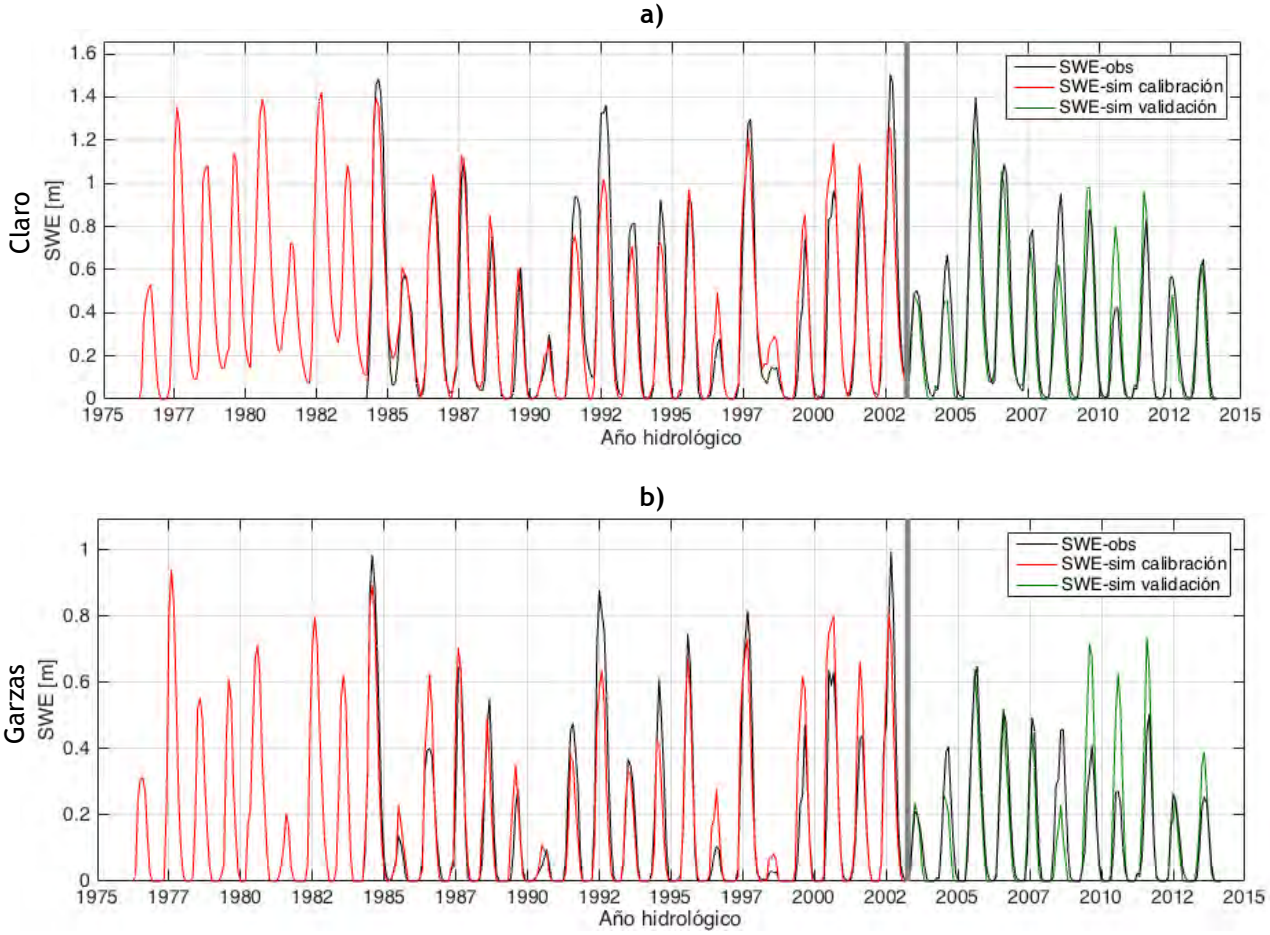


Figura 7.41. Series de tiempo de SWE total mensual observado (SWE-obs; negro) y simulado en el periodo de calibración (SWE-sim-obs calibración; rojo) y validación (SWE-sim-obs validación; verde). En a) Claro y b) Garzas. Fuente: Elaboración propia.

En conjunto con el proceso de ajuste de la variable caudal, se llevó a cabo un proceso paralelo de ajuste del proceso de acumulación de nieves, gracias a la obtención del SWE mediante un análisis de imágenes satelitales. En el caso de Claro y Garzas, este ajuste permitió detectar dificultades en la obtención de la estacionalidad observada de acumulación de nieves, como se aprecia en la **Figura 7.42**, donde se presenta el SWE total mensual promedio para los periodos de calibración (a) y validación (b), donde la primera fila muestra el resultado en Claro y la segunda fila muestra el resultado en Garzas. Como se observa, en ambos periodos y subcuencas, el SWE simulado tiende a ser de la misma magnitud que la variable observada, salvo que el SWE máximo tiende a ser levemente

mayor y se adelanta un mes respecto al SWE observado. En general, la desviación estándar del SWE observado tiende a ser similar o mayor que el SWE simulado, salvo en el periodo de validación en Garzas.

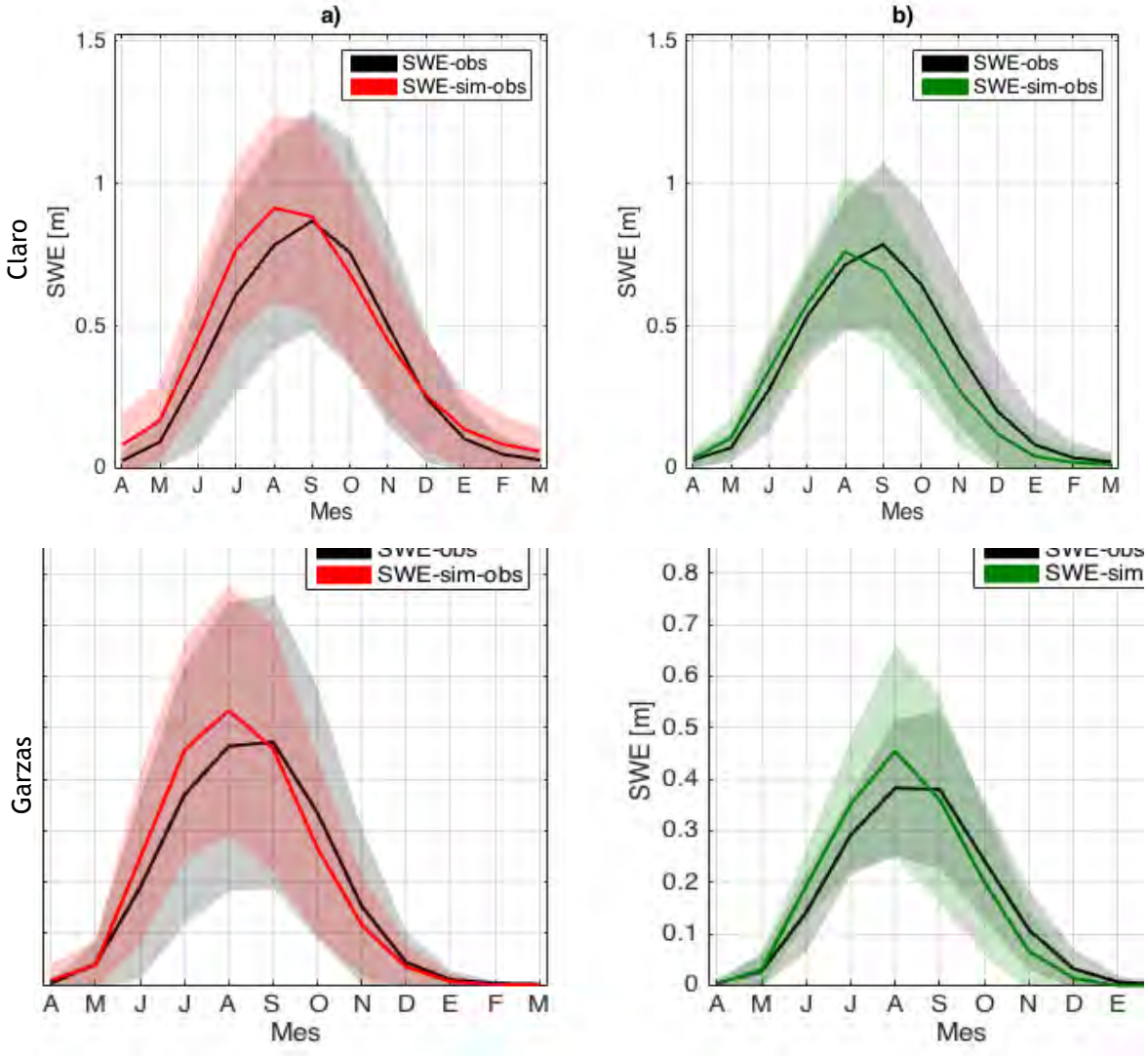


Figura 7.42. SWE total mensual promedio para los periodos de calibración (a) y validación (b). En la primera fila se presenta Claro y en la segunda fila se presenta Garzas. Se muestra la media y el rango de variabilidad (desviación estándar). SWE observado (SWE-obs) y simulados con datos observados (SWE-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.43** se analiza el ajuste de la variabilidad mediante las curvas de duración del SWE total menual, para la calibración (rojo) y validación (verde). En negro se muestran los valores observados. En la primera fila se presenta Claro y en la segunda fila se presenta Garzas. En general, se aprecia un ajuste adecuado en ambas subcuencas y periodos, con un leve mejor desempeño en el periodo de calibración de Garzas. En Claro se observa una tendencia a subestimar la acumulación de nieve en los meses de máxima acumulación.

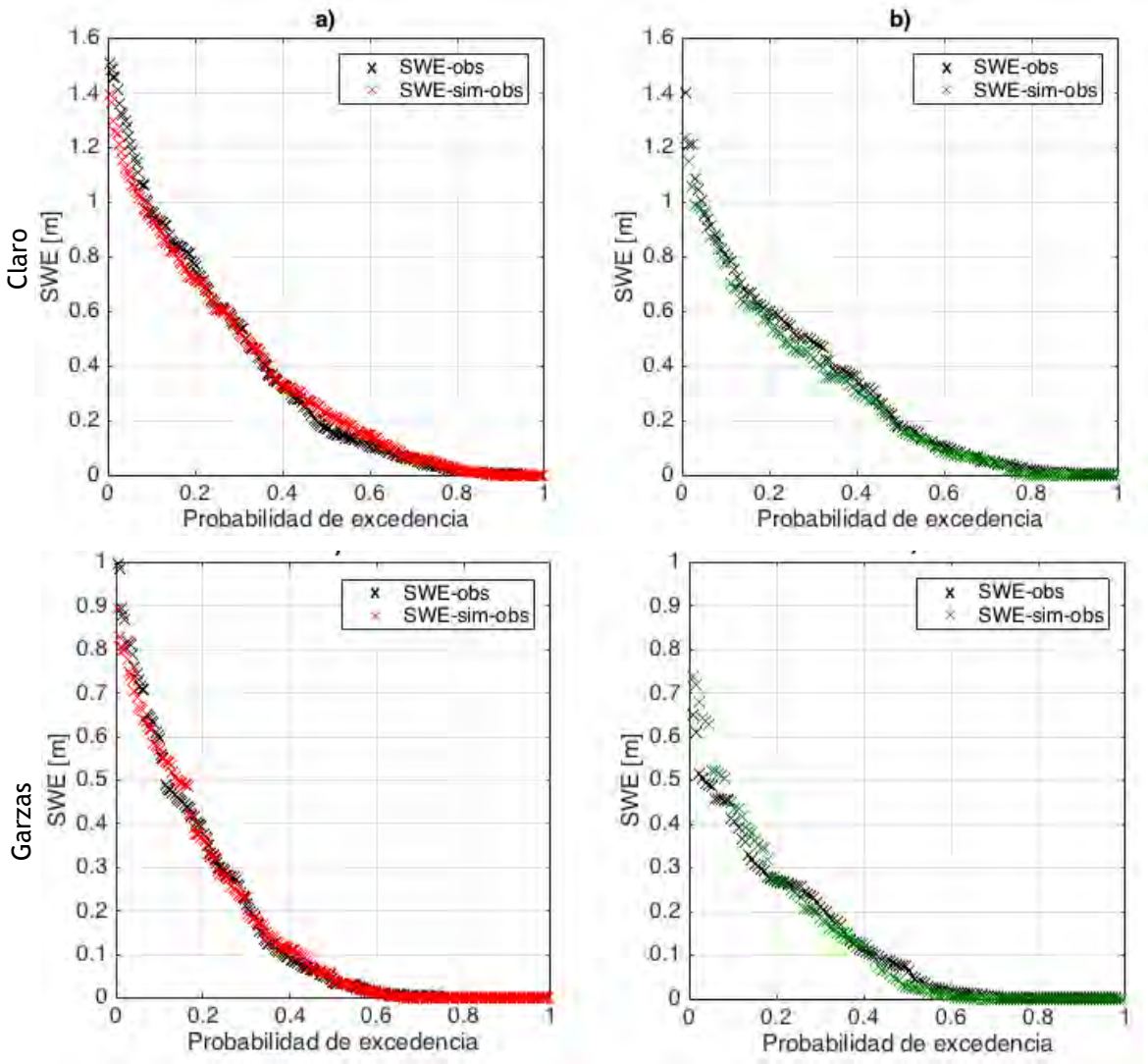


Figura 7.43. Curvas de duración de SWE total mensual en periodo de calibración (a) y validación (b). En la primera fila se presenta Claro y en la segunda fila se presenta Garzas. SWE observado (SWE-obs) y simulados con datos observados (SWE-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.44** se analiza la correlación obtenida en la representación del SWE en los periodos calibración (a) y validación (b). Como se aprecia, ambas subcuencas muestran un ajuste similar y aceptable del modelo hidrológico, pese a las diferencias en la estacionalidad. El desempeño más bajo se obtiene en Garzas, en el periodo de validación, aunque aún se considera adecuado.

En la **Tabla 7.11** se presenta un resumen de los indicadores de ajuste obtenidos en los periodos de calibación y validación, para la variable SWE en ambas subcuencas: coeficientes de bondad de ajuste o correlación (R^2), error medio, error cuadrático medio (ECM) y Nash-Suttclife. Se observa que el modelo logra una adecuada representación de los fenómenos responsables de la acumulación de nieves en ambas subcuencas, siendo el periodo de validación de Garzas el ajuste de menor calidad.

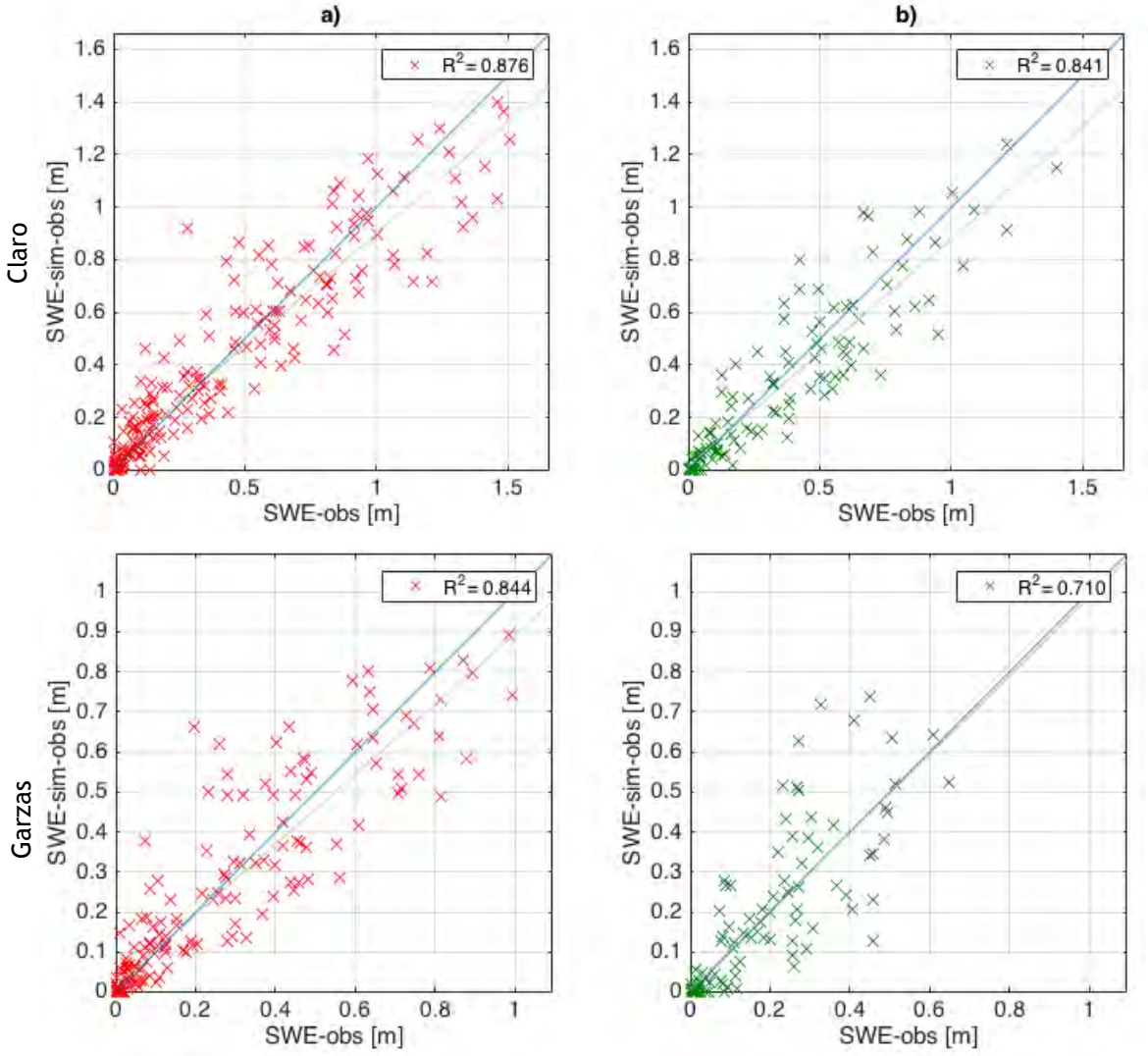


Figura 7.44. Correlación de SWE total mensual para los periodos de calibración (a) y validación (b). En la primera fila se presenta Claro y en la segunda fila se presenta Garzas. Se muestra además el coeficiente de ajuste para cada set de datos. SWE observado (SWE-obs) y SWE simulados (SWE-sim-obs). Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.11. Indicadores de ajuste de SWE en Claro y Garzas: coeficientes de bondad de ajuste o correlación (R^2), error medio, error cuadrático medio (ECM) y de Nash-Sutcliffe. Fuente: Elaboración propia.

Subcuenca	Periodo de Análisis	R^2	Error Medio [m]	ECM [m^2]	Nash-Sutcliffe
Claro	Calibración	0,876	-0,01	0,12	0,875
	Validación	0,841	-0,03	0,13	0,834
Garzas	Calibración	0,844	0,00	0,08	0,843
	Validación	0,710	0,00	0,10	0,607

7.4 Hidrología de Escenarios Futuros

El objetivo de este acápite es analizar, en el periodo de línea base (LB) concurrente[13], el ajuste estacional y de la variabilidad entre las variables caudal y SWE simuladas con datos observados (QMM-sim-obs y SWE-sim-obs) y la serie simulada con los datos de los MCG (QMM-sim-MCG y SWE-sim-MCG).

Una vez verificado que los MCG se comportan en forma equivalente a las variables simuladas en base a datos observados, se utilizan como punto de referencia para evaluar los cambios en la escorrentía futura. De esta manera, tanto la disponibilidad hídrica como la generación hidrológica pueden ser evaluadas posterioremente, en base a los datos simulados a partir de los MCG (sim-MCG).

Cabe señalar que cada MCG posee una única línea base para los distintos escenarios RCP evaluados, y que es diferente entre los distintos MCG seleccionados.

7.4.1 Validez de los MCG en línea base

El objetivo de este acápite es validar que el modelo hidrológico forzado con datos observados de precipitación y temperatura responda igual, estadísticamente, que el modelo forzado con las series escaladas de los MCG. Para esto se debe evaluar cada MCG por separado.

La **Figura 7.45** presenta el ajuste estacional del caudal obtenido entre las series simuladas con datos observados (negro) y simulados con datos de los MCG (azul), para cada subcuenca modelada. Como se aprecia, el modelo más representativo es MPI (c), mientras que BCC (a) y BNU (b) presentan las mayores diferencias en el periodo pluvial de Melado (primera fila) y Claro+Garzas (cuarta fila). También se observa que las cuencas con menor ocurrencia de escorrentía en invierno muestran un mejor desempeño desde el punto de vista de la estacionalidad: Invernada (segunda fila) y Maule (tercera fila).

En la **Figura 7.46** se comparan las curvas de duración de los caudales medios mensuales simulados con datos observados (negro) y simulados con datos de los MCG (azul), donde se observa que los 3 modelos reproducen la variabilidad en forma adecuada. Las mayores diferencias se aprecian para bajas probabilidades de excedencia (reflejo de caudales medios mensuales máximos) en la subcuenca Claro+Garzas. Estas diferencias se deben a que los caudales simulados con los datos de los 3 MCG tienden a subestimar los caudales simulados con datos observados, dando cuenta de las diferencias en el periodo pluvial que se observan en el análisis de la estacionalidad.

En la **Tabla 7.12** se presenta un resumen de los indicadores de ajuste de los caudales medios mensuales obtenidos para cada MCG y subcuenca.

[13] En este caso, el periodo de línea base es 1976/77-2004/05, el mismo empleado en el proceso de escalamiento meteorológico.

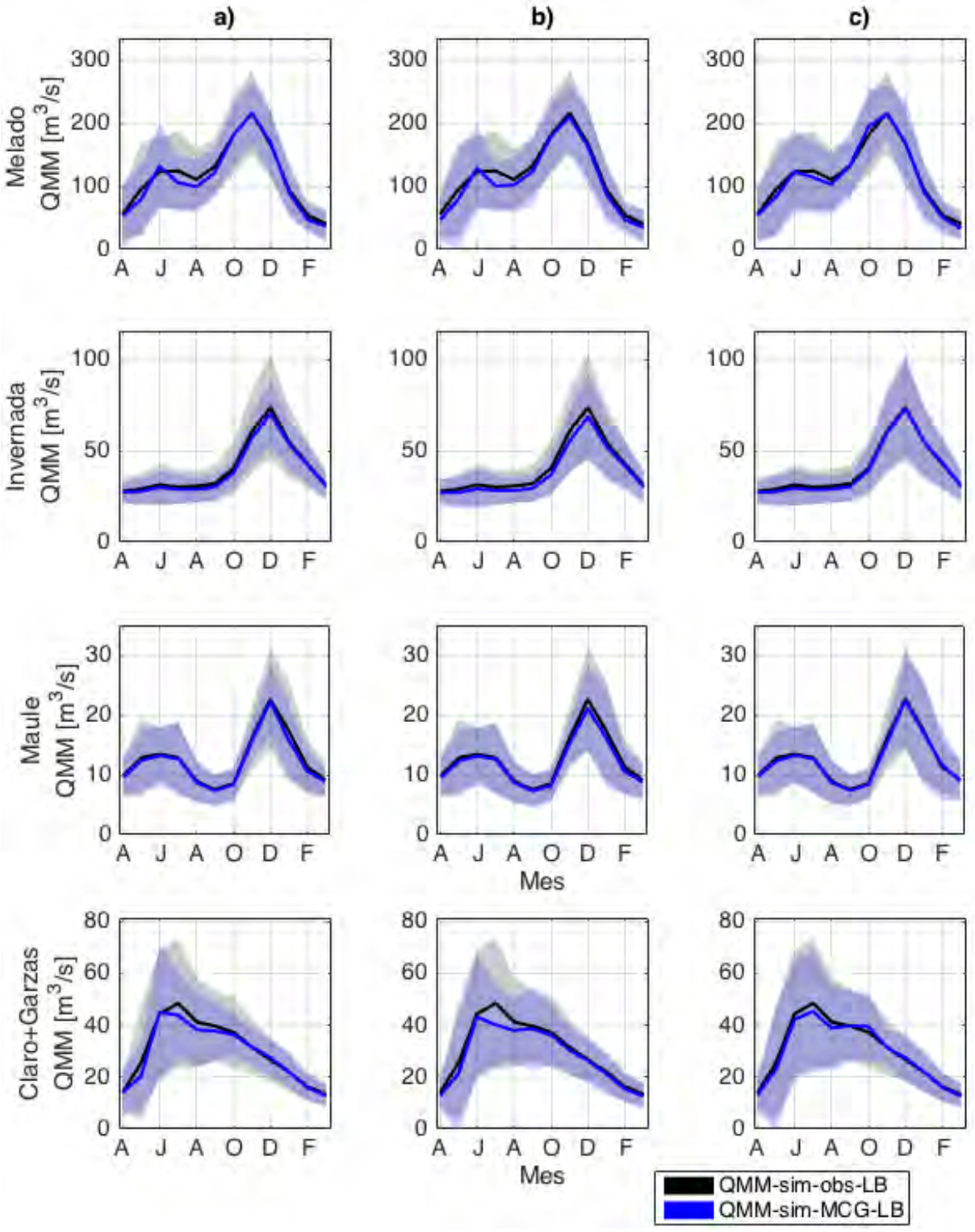


Figura 7.45. Comparación de caudales medios mensuales promedio simulados con datos meteorológicos observados en periodo línea base (QMM-sim-obs-LB) y caudales medios mensuales promedio simulados con datos de MCG en línea base (QMM-sim-MCG-LB). Se muestra la media (línea sólida) y rango variación de debido a la desviación estándar (sombreado). Los MCG se presentan agrupados por columna de la siguiente forma: a) BCC; b) BNU; y c) MPI. En cada fila se presenta una subcuenca. Fuente: Elaboración propia.

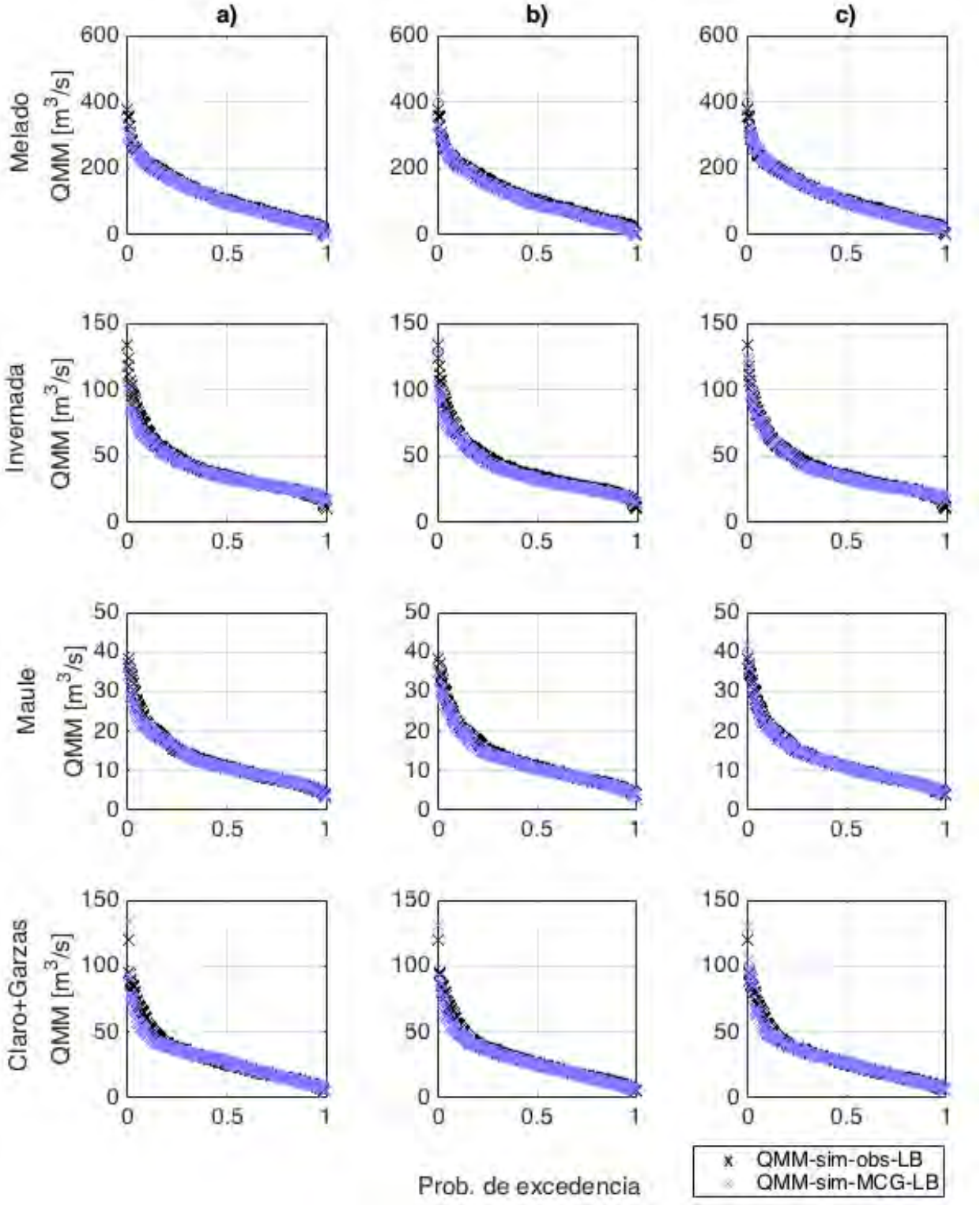


Figura 7.46. Comparación de curvas de duración de caudales medios mensuales. En cada figura se comparan las series simuladas con datos meteorológicos observados en periodo línea base (QMM-sim-obs-LB) y las series simuladas con datos de MCG en línea base (QMM-sim-MCG-LB). Los MCG se presentan agrupados por columna de la siguiente forma: a) BCC; b) BNU; y c) MPI. En cada fila se presenta una subcuenca. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.12. Indicadores de ajuste de la curva de duración de los caudales medio mensuales para cada MCG y subcuenca: coeficientes de bondad de ajuste o correlación (R^2), error medio y error cuadrático medio (ECM). Fuente: Elaboración propia.

Subcuenca	MCG	R^2	Error Medio [m^3/s]	ECM [$m^3/s]^2$
Melado	BCC	0,992	5,14	8,46
	BNU	0,994	7,79	9,54
	MPI	0,996	2,67	6,04
Invernada	BCC	0,941	1,64	4,17
	BNU	0,993	2,54	3,85
	MPI	0,991	0,94	2,22
Maule	BCC	0,990	0,41	1,13
	BNU	0,996	0,59	0,95
	MPI	0,995	0,22	0,59
Claro+Garzas	BCC	0,975	1,24	3,98
	BNU	0,981	2,00	3,65
	MPI	0,979	0,75	2,84

La **Figura 7.47** presenta el ajuste estacional entre las series simuladas con datos observados (negro) y simulados con datos de los MCG (azul), para la variable SWE. En general se obtiene un adecuado ajuste con todos los MCG, aunque MPI (c) muestra una mejor representación en todas las subcuencas, tanto de la media como de la desviación estándar.

La **Figura 7.48** muestra el ajuste de la variabilidad entre las series simuladas con datos observados (negro) y simulados con datos de los MCG (azul), para la variable SWE. Se aprecia un ajuste adecuado de todos los MCG.

En la **Tabla 7.13** se presenta un resumen de los indicadores de ajuste del SWE total mensual obtenidos para cada MCG y subcuenca.

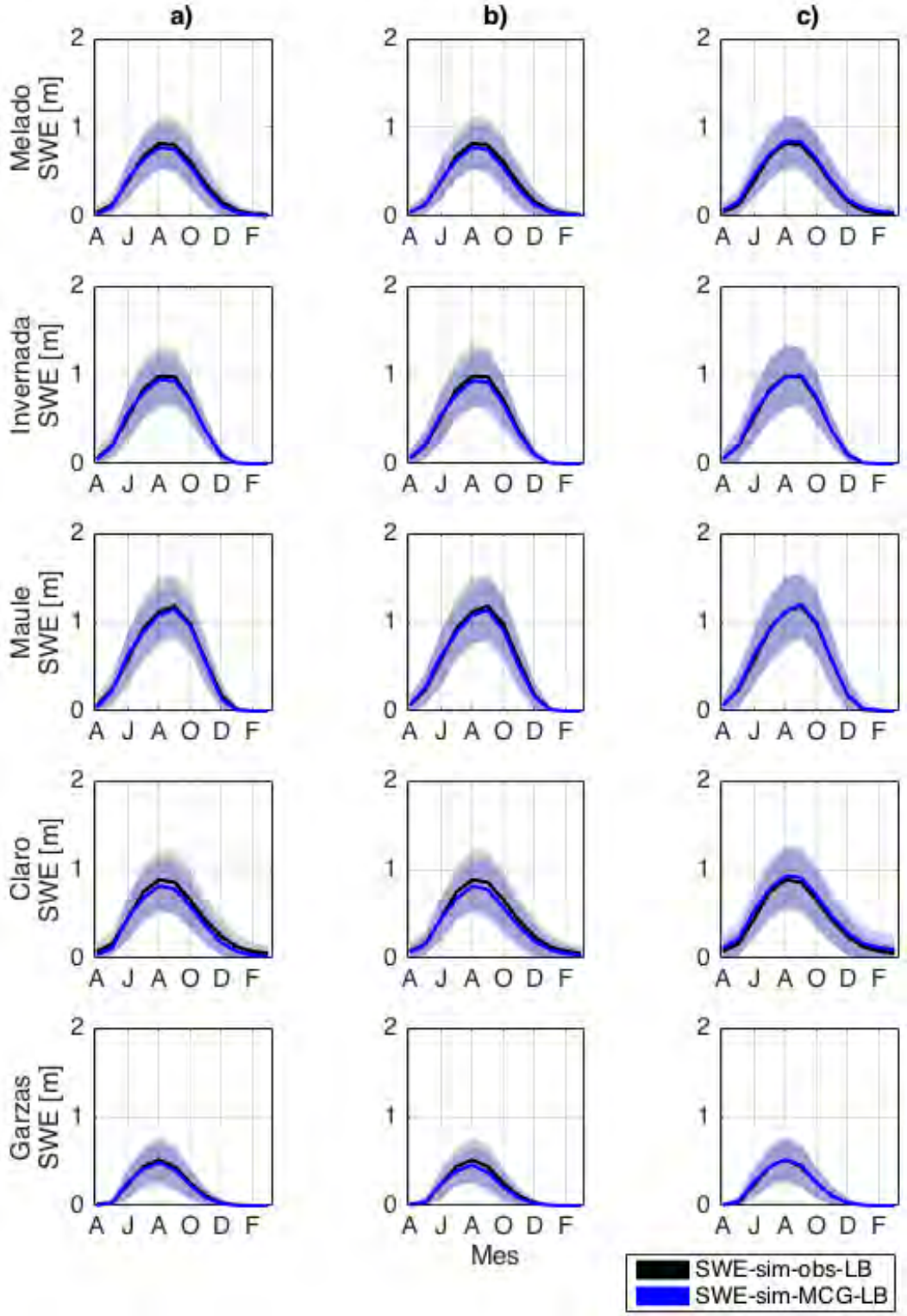


Figura 7.47. Comparación de SWE total mensual promedio simulado con datos meteorológicos observados en periodo línea base (SWE-sim-obs-LB) y SWE mensual promedio simulados con datos de MCG en línea base (SWE-sim-MCG-LB). Se muestra la media (línea sólida) y rango variación de debido a la desviación estándar (sombreado). Los MCG se presentan agrupados por columna de la siguiente forma: a) BCC; b) BNU; y c) MPI. En cada fila se presenta una subcuenca. Fuente: Elaboración propia.

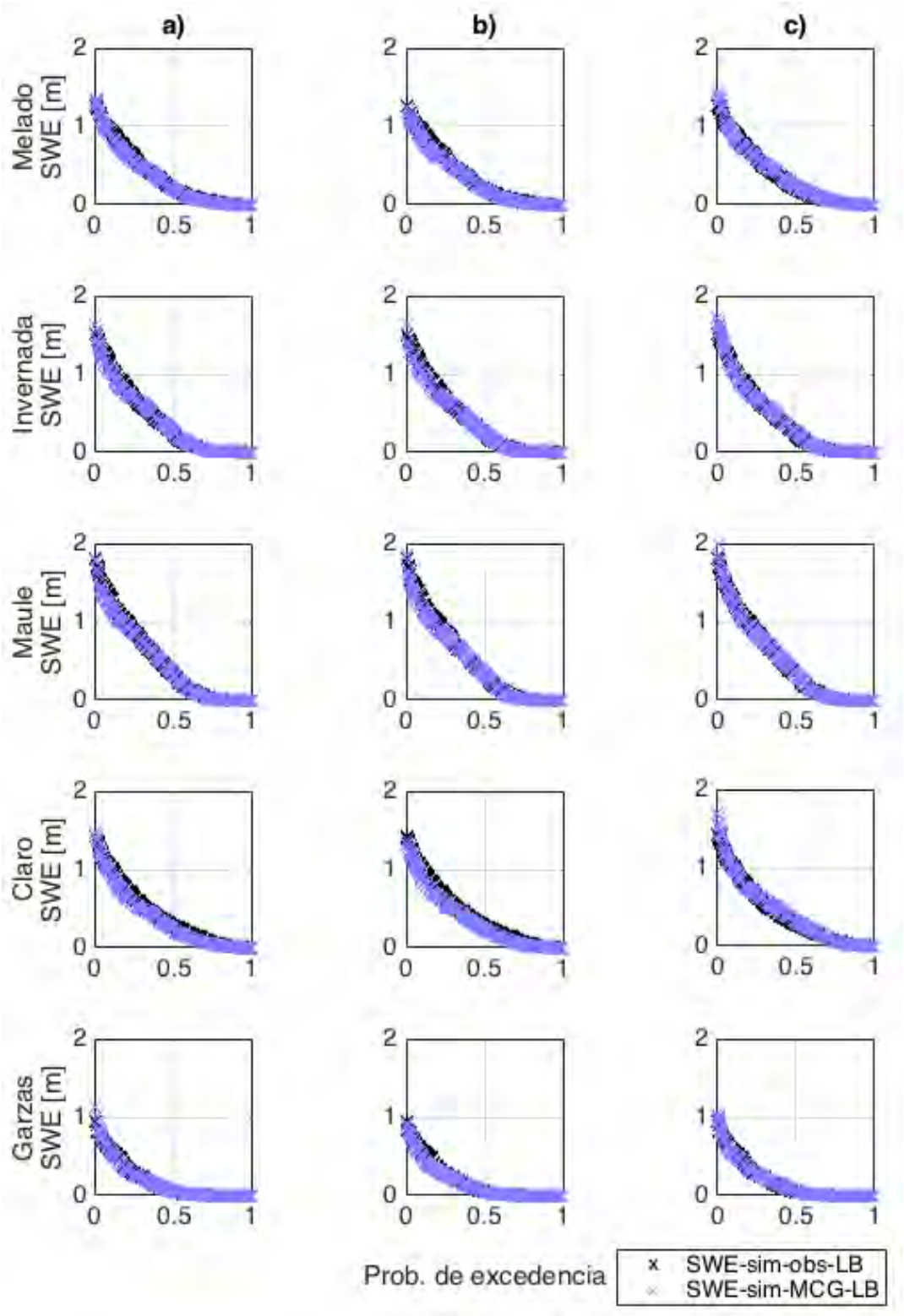


Figura 7.48. Comparación de curvas de duración del SWE total mensual simulado con datos meteorológicos observados en periodo línea base (SWE-sim-obs-LB) y SWE total mensual simulados con datos de MCG en línea base (SWE-sim-MCG-LB). Los MCG se presentan agrupados por columna de la siguiente forma: a) BCC; b) BNU; y c) MPI. En cada fila se presenta una subcuenca. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.13. Indicadores de ajuste de la curva de duración de los SWE total mensual para cada MCG y subcuenca: coeficientes de bondad de ajuste o correlación (R^2), error medio y error cuadrático medio (ECM). Fuente: Elaboración propia.

Subcuenca	MCG	R^2	Error Medio [m]	ECM [m^2]
Melado	BCC	0,995	0,02	0,04
	BNU	0,996	0,03	0,04
	MPI	0,990	-0,01	0,04
Invernada	BCC	0,993	0,01	0,05
	BNU	0,995	0,02	0,05
	MPI	0,993	0,00	0,04
Maule	BCC	0,996	0,02	0,05
	BNU	0,997	0,03	0,05
	MPI	0,994	0,00	0,04
Claro	BCC	0,995	0,05	0,06
	BNU	0,996	0,05	0,06
	MPI	0,990	-0,02	0,04
Garzas	BCC	0,987	0,00	0,03
	BNU	0,987	0,02	0,04
	MPI	0,989	0,00	0,02

7.4.2 Resultados de disponibilidad hídrica en escenarios futuros

Con el fin de analizar los impactos del cambio climático en la generación hidroeléctrica, se requiere evaluar cómo varía el ensamble de la escorrentía (Q) a futuro, obtenida empleando como forzantes las series de PP y T° de los MCG. Con esto se busca estudiar la evolución futura de la escorrentía utilizando una única fuente de información (series de PP y T° escaladas de los MCG).

La ventana futura (VF) para los RCP 4.5 y 8.5 comprende el periodo 2006-2099, sin embargo, para los fines del análisis futuro se desea observar la evolución general de los cambios en las variables de interés respecto a línea base (LB), para el ensamble de los MCG seleccionados, dando cuenta así de la variabilidad de las estimaciones de los modelos de circulación general. Las ventanas de análisis que se utilizan se definen a continuación:

- **LB**: 1976/77 – 2004/05 (29 años)
- **VF1**: 2009/10 - 2038/39 (30 años)
- **VF2**: 2039/40 - 2068/69 (30 años)
- **VF3**: 2069/70 - 2098/99 (30 años)

Como se puede observar no se ha incluido el periodo 2006-2009. Esto se debe a que se busca homologar la longitud de las ventanas futuras con la línea base. Esta similitud en la longitud de los periodos entrega una mayor robustez estadística a las comparaciones que se realizan más adelante y se considera además que la VF1 ya incorpora 5 años del periodo observado.

Por otra parte, además del caudal (Q) y su impacto en la generación hidroeléctrica (GH) resulta de interés evaluar la evolución de la precipitación (PP), la temperatura (T°) respecto a Q y SWE, lo cual se presenta en forma de cuadros resumen por ventana de análisis.

A continuación se presentan los resultados por subcuenca, de las variables de interés.

7.4.2.1 Melado

En la **Figura 7.49** se presenta la variación futura de los caudales medios mensuales promedio de Melado para los RCP 4.5 y 8.5. Se compara el ensamble de los MCG en LB con el ensamble de los MCG para las 3 ventanas futuras definidas. Como se observa, el escenario RCP8.5 es el más severo en las VF2 y VF3, mientras que en la VF1 no se producen diferencias significativas entre ambos escenarios. Esto indica que los MCG proyectan los cambios más severos en el mediano (VF2) y largo plazo (VF3), pero en el corto plazo (VF1) es esperable observar una menor escorrentía en el periodo de deshielo, así como un incremento de la escorrentía de invierno. En el escenario RCP8.5 se proyecta la desaparición casi completa de la escorrentía de deshielo en la VF3, lo que indica que a futuro se espera un área nival mucho menor a la actual, pasando de un régimen nivo-pluvial a uno pluvio-nival.

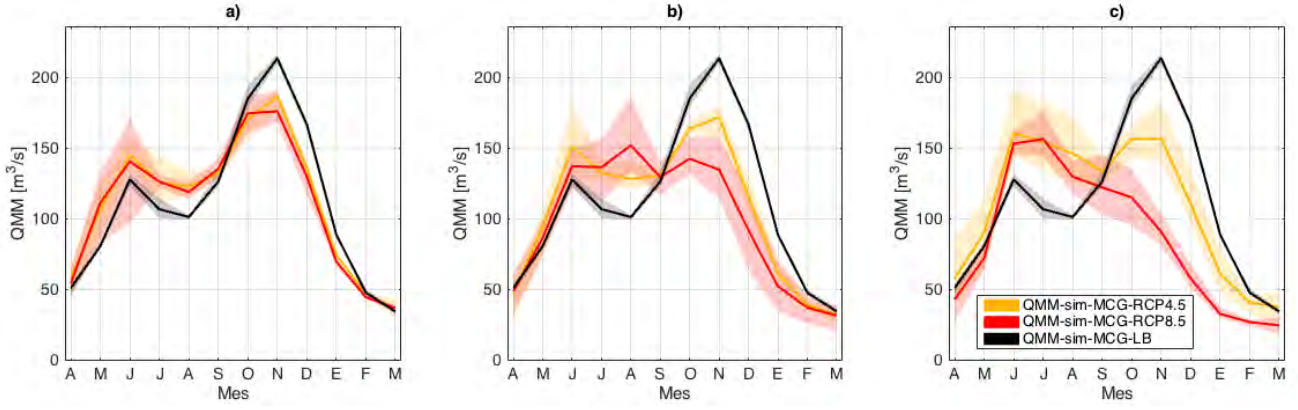


Figura 7.49. Comparación de los ensambles de caudales medios mensuales promedio de Melado, simulados en línea base (QMM-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (QMM-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (QMM-sim-MCG-RCP8.5), en las distintas ventanas futuras. La información se divide en a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3: 2069-2099. La sombra denota el rango de variación entre los máximos y mínimos del ensamble de MCG. Fuente: Elaboración propia.

Desde el punto de vista de la variabilidad, la **Figura 7.50** presenta el ensamble de las curvas de duración, siguiendo el mismo esquema anterior. Se aprecia la caída generalizada para todas las probabilidades de excedencia, siendo el RCP8.5 el escenario más severo. También se puede observar una mayor variabilidad de los MCG en la VF2, especialmente en el escenario RCP8.5, donde la amplitud del sombreado (rojo) es máxima en esta ventana de análisis.

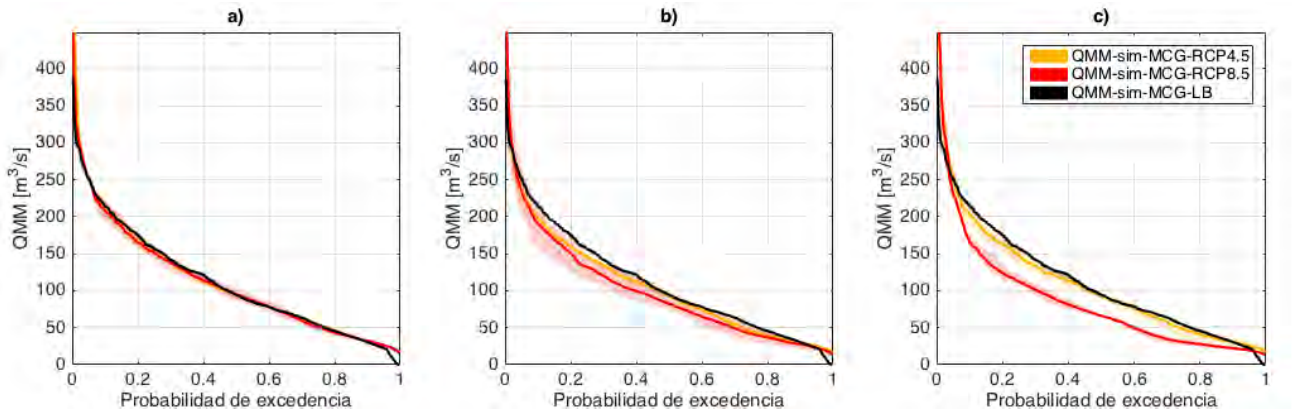


Figura 7.50. Comparación del ensamble de las curvas de duración de caudales medios mensuales en Melado, simulados en línea base (QMM-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (QMM-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (QMM-sim-MCG- RCP8.5), en las distintas ventanas futuras. La información se divide en a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3: 2069-2099. La sombra denota el rango de variación entre los máximos y mínimos del ensamble de MCG. Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 7.51** presenta el ensamble de las curvas de variación estacional de los caudales, para distintas probabilidades de excedencia. En la primera fila (naranjo) se presenta el RCP4.5 para las 3 ventanas futuras, mientras que en la segunda fila (rojo) se presentan las figuras equivalentes para el escenario RCP8.5. En negro se muestran los caudales simulados en línea base. En general, se observa que las probabilidades de excedencia más afectadas son las menores a un 50%, siendo el RCP8.5 el escenario más severo, especialmente en la VF3, en el cual se confirma el cambio del régimen hidrológico, inclusive en el caso del RCP4.5 (VF3).

En la **Tabla 7.14** se resumen los promedios por periodo y porcentajes de variación del ensamble de caudales medios anuales promedio, para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5. Se incluye además la variación de la precipitación total anual promedio y la temperatura media anual promedio en la cuenca, en el mismo periodo. En la **Tabla 7.15** se presentan los mismos resultados para el escenario RCP8.5.

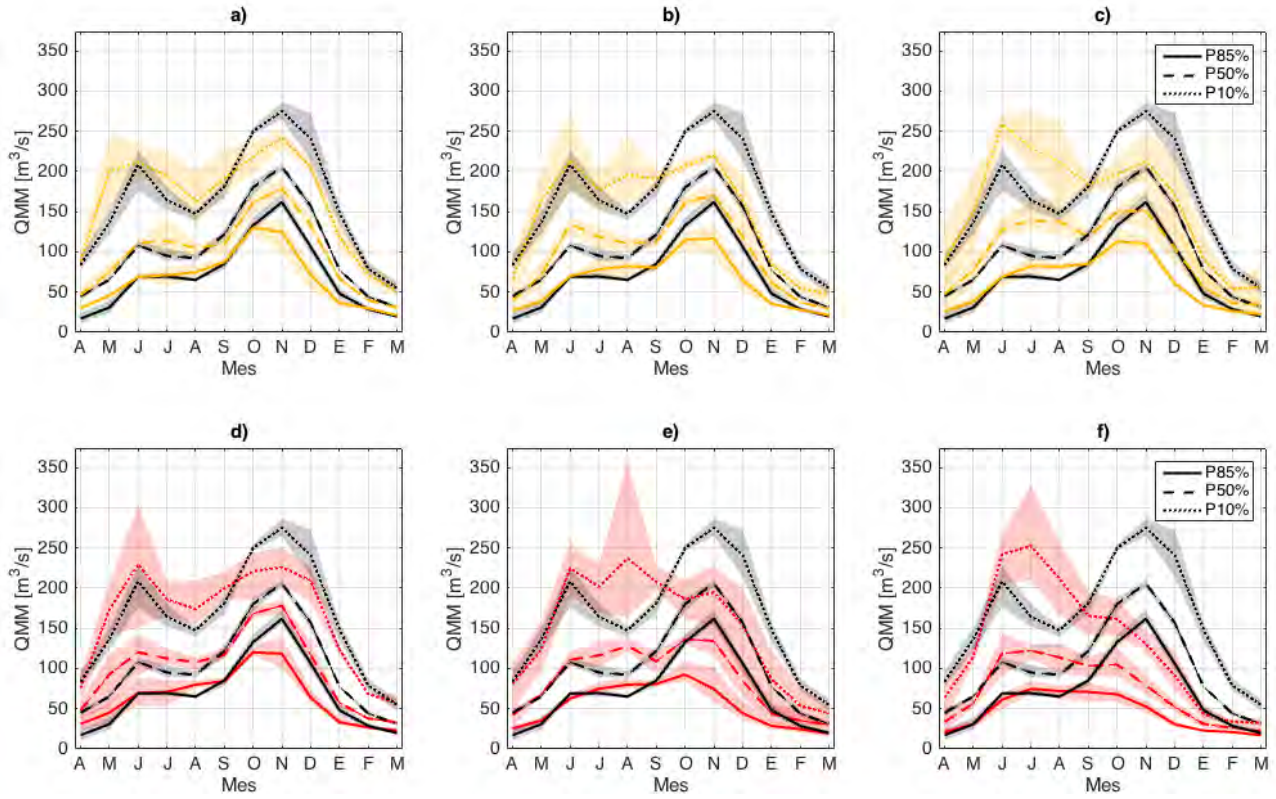


Figura 7.51. Ensamble de las curvas de variación estacional de los caudales medios mensuales en Melado. Se presentan las probabilidades de excedencia de 10, 50 y 85%. En negro se muestran los caudales simulados en línea base, en naranjo se presenta el RCP4.5 y en rojo el RCP8.5. Para escenario RCP4.5 (primera fila, naranjo): a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3:2069-2099. Para escenario RCP8.5 (segunda fila, rojo): d) VF1: Periodo 2009-2039, e) VF2: 2039-2069 y f) VF3: 2069-2099. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.14. Resumen del ensamble de caudales en Melado. Caudal medio anual promedio, precipitación total anual promedio y temperatura media anual promedio por periodo. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5. Fuente: Elaboración propia.

Ventana	Periodo	Escenario RCP4.5						
		Q		PP		T		Q/PP
		[m^3/s]	[%]	[mm]	[%]	[°C]	Δ [°C]	[mm/mm]
LB	1976-2005	111,3	0,0	2587	0,0	7,6	0,0	0,638
VF1	2009-2039	112,2	0,8	2491	-3,7	8,7	1,1	0,668
VF2	2039-2069	106,1	-4,7	2368	-8,5	9,4	1,8	0,664
VF3	2069-2099	109,4	-1,8	2453	-5,2	9,8	2,2	0,661

Tabla 7.15. Resumen del ensamble de caudales en Melado. Caudal medio anual promedio, precipitación total anual promedio y temperatura media anual promedio por periodo. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP8.5. Fuente: Elaboración propia.

Ventana	Periodo	Escenario RCP8.5						
		Q		PP		T		Q/PP
		[m^3/s]	[%]	[mm]	[%]	[°C]	Δ [°C]	[mm/mm]
LB	1976-2005	111,3	0,0	2587	0,0	7,6	0,0	0,638
VF1	2009-2039	110,4	-0,9	2446	-5,4	8,8	1,2	0,669
VF2	2039-2069	98,8	-11,3	2250	-13,0	10,2	2,6	0,651
VF3	2069-2099	85,9	-22,9	1995	-22,9	12,0	4,4	0,638

La **Figura 7.52** muestra la variación futura de SWE total mensual promedio para los RCP 4.5 y 8.5. Se compara el ensamble de los MCG en LB con el ensamble de los MCG para las 3 ventanas futuras definidas. Como se aprecia, los MCG predicen que los mayores impactos se verán en el largo plazo, siendo el RCP8.5 el escenario más severo, en el cual se espera que la acumulación se reduzca en cerca de un 75% respecto a la LB. También se aprecia la elevada variabilidad del escenario RCP8.5 en la VF2, al igual que en el caso de los caudales. En el caso de SWE, el impacto del cambio climático se observa en el corto plazo (VF1), sin diferencias significativas entre los escenarios RCP, lo cual indica que la acumulación de nieve es una variable más sensible que el caudal para evaluar impactos en el corto plazo.

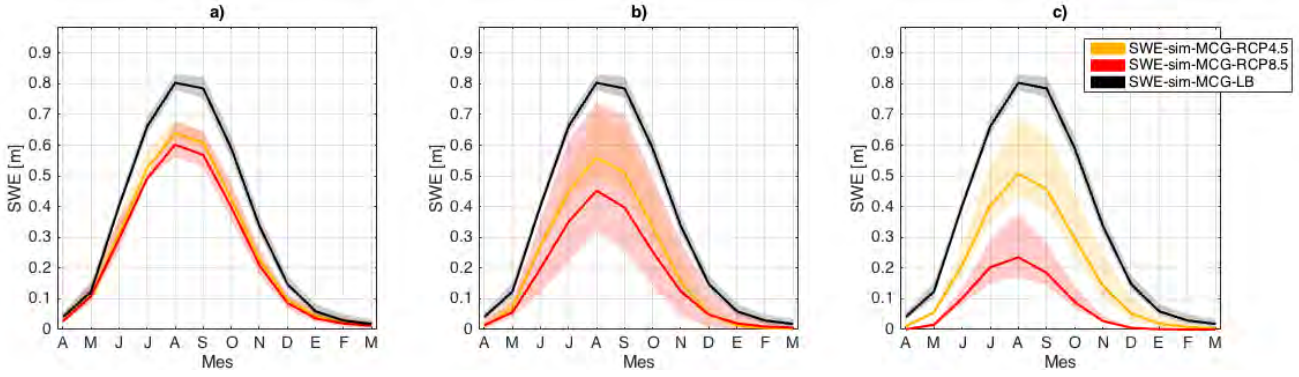


Figura 7.52. Comparación de los ensambles de SWE total mensual promedio en Melado, simulados para línea base (SWE-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (SWE-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (SWE-sim-MCG- RCP8.5), en las distintas ventanas futuras. La información se divide en a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3: 2069-2099. La sombra denota el rango de variación entre los máximos y mínimos del ensamble de MCG. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.53** se presenta el ensamble de las curvas de duración del SWE total mensual, donde se aprecia la misma respuesta que en el caso del SWE total mensual promedio, es decir, una disminución significativa de la acumulación nival en el corto plazo (VF1), para ambos escenarios RCP, una alta variabilidad de la acumulación en el mediano plazo (VF2) para el RCP 8.5 y la baja capacidad de acumulación de nieve en la cuenca, para el largo plazo en el escenario RCP8.5.

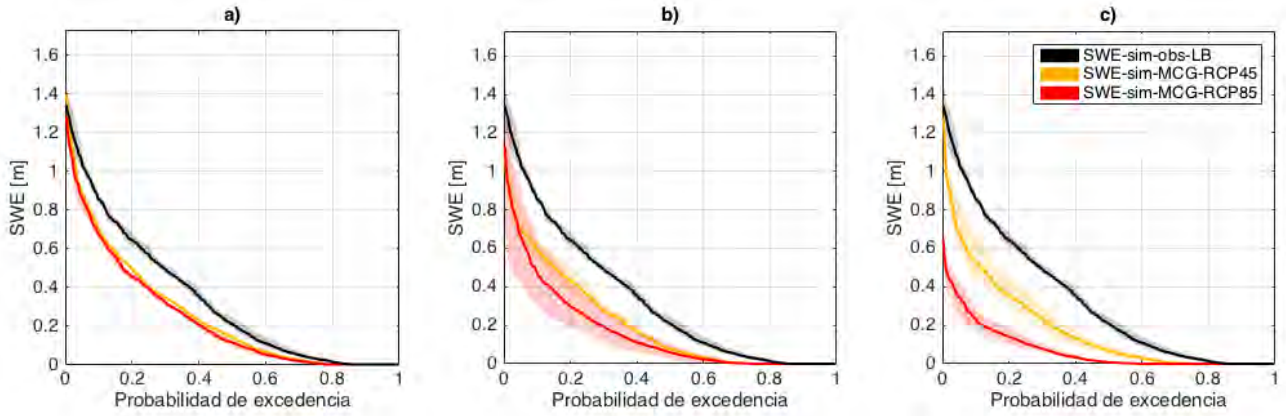


Figura 7.53. Comparación de las curvas de duración de SWE totales mensuales en Melado, simulados para línea base utilizando MCG (SWE-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (SWE-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (SWE-sim-MCG-RCP8.5), en las distintas ventanas futuras y para el ensamble de los distintos MCG. La información se divide en a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3: 2069-2099. La sombra denota el rango de variación entre los máximos y mínimos del ensamble de MCG. Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 7.16** se muestran los porcenatajes de variación del ensamble de SWE, para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5. El indicador utilizado corresponde al SWE máximo. Se incluye además la variación de la precipitación total anual promedio y la temperatura media anual promedio en la cuenca, en el mismo periodo. En la **Tabla 7.17** se presentan los mismos resultados para el escenario RCP8.5. Como se observa, los cambios en la acumulación de nieve muestran un impacto similar impacto del cambio climático que los caudales, salvo en la VF3 del escenario RCP8.5 donde la variable de estado SWE es la más afectada. Si se comparan los cambios en el SWE máximo con los cambios futuros de temperatura se observa una correspondencia importante entre ambas variables. En este sentido, la capacidad de la cuenca de acumular nieve en el invierno es un buen indicador del aumento de temperaturas en el futuro, pero el impacto del cambio climático se verá igualmente reflejado en la escorrentía superficial.

Tabla 7.16. Resumen del ensamble de SWE en Melado. SWE máximo, precipitación total anual promedio y temperatura media anual promedio por periodo. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5. Fuente: Elaboración propia.

Ventana	Periodo	Escenario RCP4.5					
		SWE Máximo		PP		T	
		[m]	[%]	[mm]	[%]	[°C]	Δ [°C]
LB	1976-2005	0,81	0,0	2587	0,0	7,6	0,0
VF1	2009-2039	0,65	-20,4	2491	-3,7	8,7	1,1
VF2	2039-2069	0,56	-30,8	2368	-8,5	9,4	1,8
VF3	2069-2099	0,51	-37,3	2453	-5,2	9,8	2,2

Tabla 7.17. Resumen del ensamble de SWE en Melado. SWE máximo, precipitación total anual promedio y temperatura media anual promedio por periodo. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP8.5. Fuente: Elaboración propia.

Ventana	Periodo	Escenario RCP8.5					
		SWE Máximo		PP		T	
		[m]	[%]	[mm]	[%]	[°C]	Δ [°C]
LB	1976-2005	0,81	0,0	2587	0,0	7,6	0,0
VF1	2009-2039	0,61	-25,0	2446	-5,4	8,8	1,2
VF2	2039-2069	0,45	-44,2	2250	-13,0	10,2	2,6
VF3	2069-2099	0,24	-70,3	1995	-22,9	12,0	4,4

7.4.2.2 Invernada

En la **Figura 7.54** se presenta la variación futura de los caudales medios mensuales promedio de Invernada para los RCP 4.5 y 8.5. Se compara el ensamble de los MCG en LB con el ensamble de los MCG para las 3 ventanas futuras definidas. Como se observa, el escenario RCP8.5 es el más severo en las VF2 y VF3, mientras que en la VF1 no se producen diferencias significativas entre ambos escenarios. Esto indica que los MCG proyectan los cambios de caudal más severos en el mediano (VF2) y largo plazo (VF3), pero en el corto plazo (VF1) es esperable observar una menor escorrentía en el periodo de deshielo. En el escenario RCP8.5 se proyecta un reducción del 43% aproximadamente en el mes de máxima escorrentía de deshielo en la VF3, lo que indica que a futuro se espera un área nival mucho menor a la actual. Debido al carácter nival de la cuenca, la reducción de caudales de deshielo no se compensará con un aumento significativo de la escorrentía en invierno.

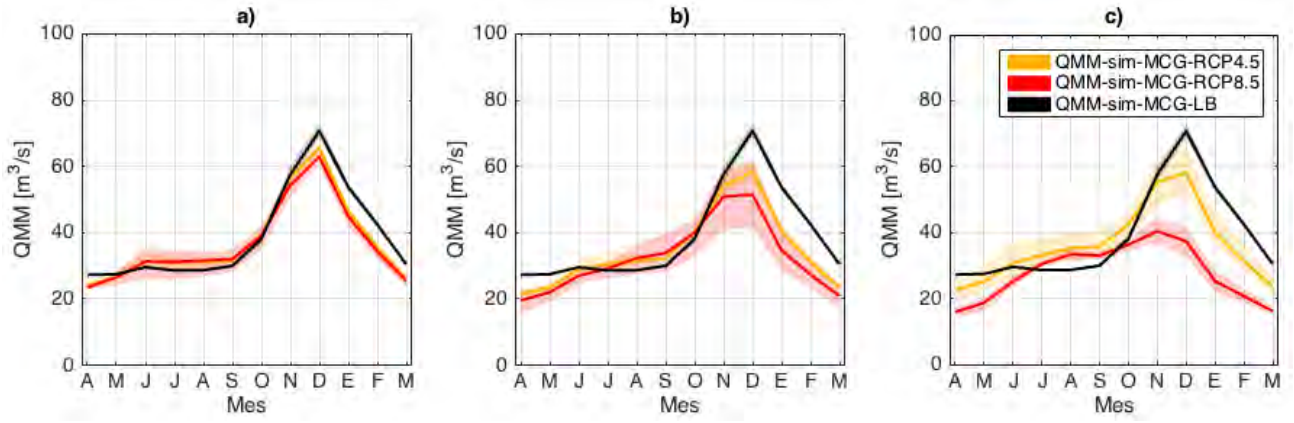


Figura 7.54. Comparación de los ensambles de caudales medios mensuales promedio de Invernada, simulados en línea base (QMM-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (QMM-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (QMM-sim-MCG-RCP8.5), en las distintas ventanas futuras. La información se divide en a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3: 2069-2099. La sombra denota el rango de variación entre los máximos y mínimos del ensamble de MCG. Fuente: Elaboración propia.

Desde el punto de vista de la variabilidad, la **Figura 7.55** presenta el ensamble de las curvas de duración, siguiendo el mismo esquema anterior. Se aprecia la caída generalizada para todas las probabilidades de excedencia en VF2 y VF3, siendo el RCP 8.5 el escenario

más severo en ambas ventanas futuras. También se puede observar una mayor variabilidad de los MCG en la VF2, especialmente en el escenario RCP8.5, donde la amplitud del sombreado (rojo) es máxima en esta ventana de análisis.

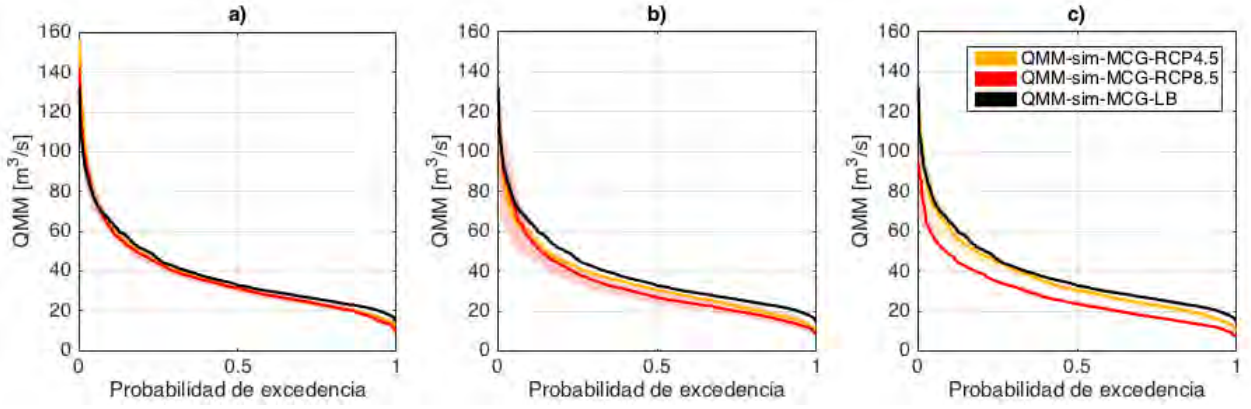


Figura 7.55. Comparación del ensamble de las curvas de duración de caudales medios mensuales de Invernada, simulados en línea base (QMM-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (QMM-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (QMM-sim-MCG- RCP8.5), en las distintas ventanas futuras. La información se divide en a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3: 2069-2099. La sombra denota el rango de variación entre los máximos y mínimos del ensamble de MCG. Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 7.56** presenta el ensamble de las curvas de variación estacional de los caudales, para distintas probabilidades de excedencia. En la primera fila (naranjo) se presenta el RCP4.5 para las 3 ventanas futuras, mientras que en la segunda fila (rojo) se presentan las figuras equivalentes para el escenario RCP 8.5. En negro se muestran los caudales simulados en línea base. En general, se observa que las probabilidades de excedencia más afectadas son las menores a un 50%, siendo el RCP8.5 el escenario más severo, especialmente en la VF3, donde los años húmedos disminuyen su escorrentía significativamente, a magnitudes cercanas al 50% de probabilidad de excedencia de línea base, pero con una relativa mayor escorrentía en invierno. En ambos escenarios se espera una menor relevancia de los aportes nivales a la escorrentía media anual.

En la **Tabla 7.18** se resumen los promedios por periodo y porcentajes de variación del ensamble de caudales medios anuales promedio, para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5. Se incluye además la variación de la precipitación total anual promedio y la temperatura media anual promedio en la cuenca, en el mismo periodo. En la **Tabla 7.19** se presentan los mismos resultados para el escenario RCP8.5. En general, se observa que la escorrentía disminuye en mayor medida que las precipitaciones en la VF3, mientras que en el corto plazo (VF1) se espera un descenso equivalente en ambas variables. También se aprecia en el escenario RCP4.5 un cambio de la tendencia al descenso recién en el largo plazo (VF3), siendo sus impactos mayores en la VF2.

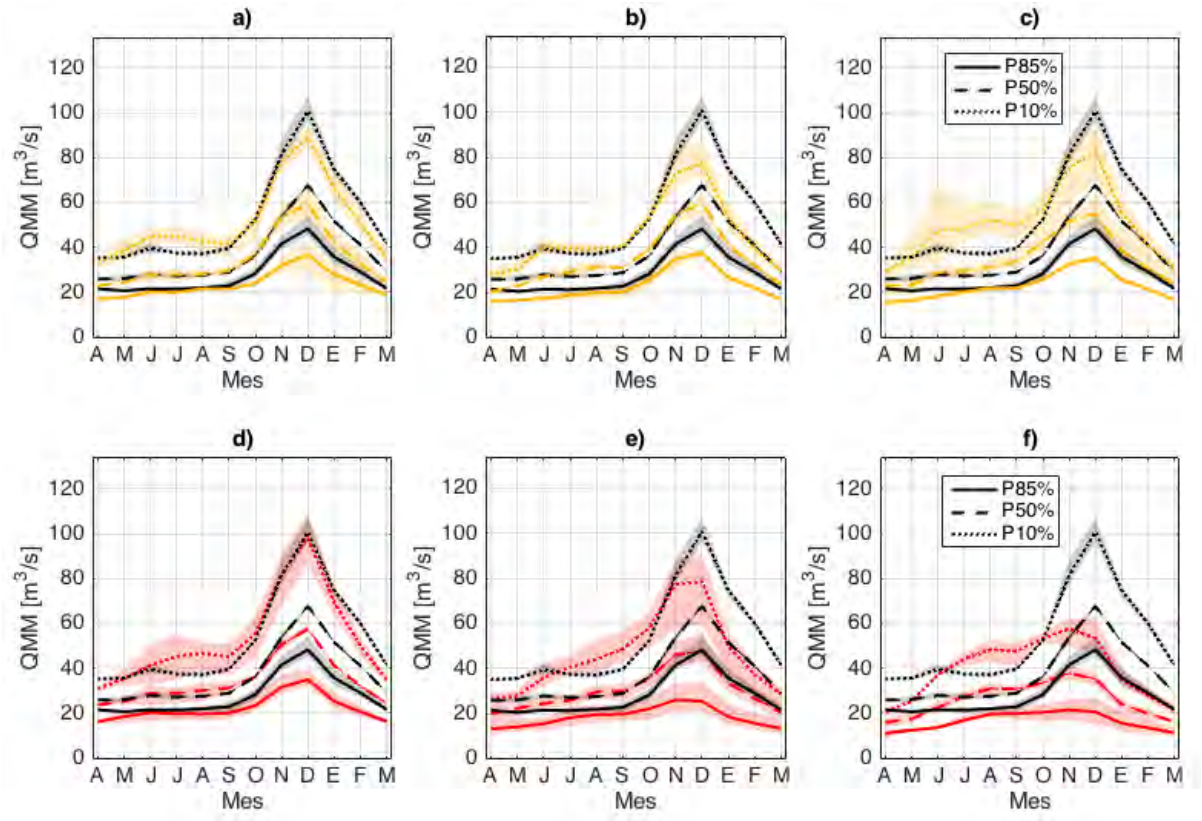


Figura 7.56. Ensamble de las curvas de variación estacional de los caudales medios mensuales de Invernada. Se presentan las probabilidades de excedencia de 10, 50 y 85%. En negro se muestran los caudales simulados en línea base, en naranjo se presenta el RCP4.5 y en rojo el RCP8.5. Para escenario RCP4.5 (primera fila, naranjo): a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3:2069-2099. Para escenario RCP8.5 (segunda fila, rojo): d) VF1: Periodo 2009-2039, e) VF2: 2039-2069 y f) VF3: 2069-2099. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.18. Resumen del ensamble de caudales de Invernada. Caudal medio anual promedio, precipitación total anual promedio y temperatura media anual promedio por periodo. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5. Fuente: Elaboración propia.

Ventana	Periodo	Escenario RCP4.5						
		Q		PP		T		Q/PP
		[m^3/s]	[%]	[mm]	[%]	[°C]	Δ [°C]	[mm/mm]
LB	1976-2005	38,7	0,0	2305	0,0	5,3	0,0	0,640
VF1	2009-2039	37,1	-4,1	2209	-4,2	6,4	1,1	0,641
VF2	2039-2069	34,7	-10,5	2086	-9,5	7,1	1,8	0,634
VF3	2069-2099	36,1	-6,7	2170	-5,8	7,5	2,2	0,634

Tabla 7.19. Resumen del ensamble de caudales de Invernada. Caudal medio anual promedio, precipitación total anual promedio y temperatura media anual promedio por periodo. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP8.5. Fuente: Elaboración propia.

Ventana	Periodo	Escenario RCP8.5						
		Q		PP		T		Q/PP
		[m^3/s]	[%]	[mm]	[%]	[°C]	Δ [°C]	[mm/mm]
LB	1976-2005	38,7	0,0	2305	0,0	5,3	0,0	0,640
VF1	2009-2039	36,4	-6,0	2164	-6,1	6,5	1,2	0,641
VF2	2039-2069	34,8	-10,2	1968	-14,6	7,9	2,6	0,673
VF3	2069-2099	26,3	-32,2	1713	-25,7	9,7	4,4	0,585

La **Figura 7.57** muestra la variación futura de SWE total mensual promedio para los RCP 4.5 y 8.5. Se compara el ensamble de los MCG en LB con el ensamble de los MCG para las 3 ventanas futuras definidas. Como se aprecia, los MCG predicen que los mayores impactos se verán en el largo plazo, siendo el RCP8.5 el escenario más severo, en el cual se espera que la acumulación se reduzca en cerca de un 60% respecto a la LB. También se aprecia la elevada variabilidad del escenario RCP8.5 en la VF2, al igual que en el caso de los caudales. En el caso de SWE, el impacto del cambio climático se observa en el corto plazo (VF1), sin diferencias significativas entre los escenarios RCP, lo cual indica que la acumulación de nieve es una variable más sensible que el caudal para evaluar impactos en el corto plazo.

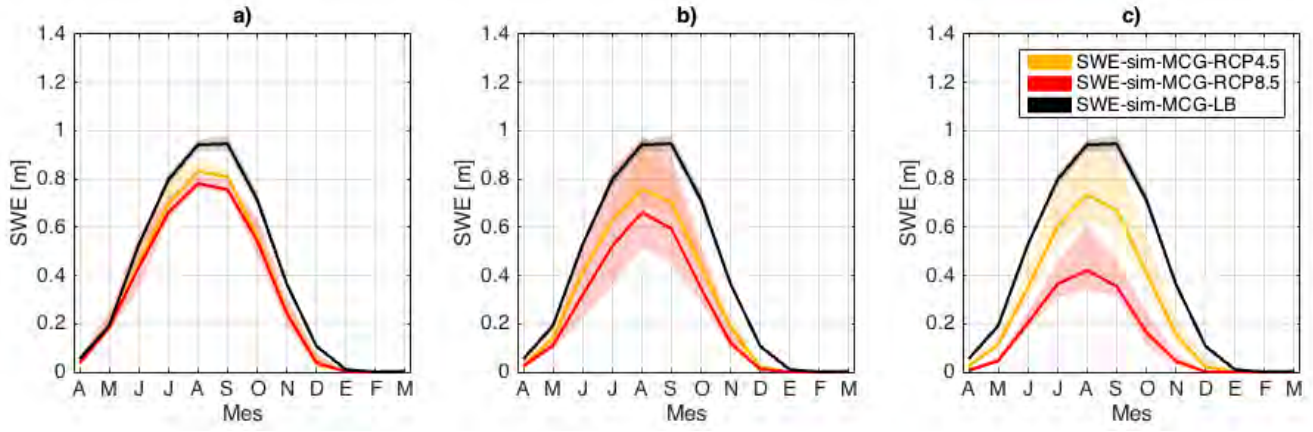


Figura 7.57. Comparación de los ensambles de SWE total mensual promedio de Invernada, simulados para línea base (SWE-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (SWE-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (SWE-sim-MCG- RCP8.5), en las distintas ventanas futuras. La información se divide en a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3: 2069-2099. La sombra denota el rango de variación entre los máximos y mínimos del ensamble de MCG. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.58** se presenta el ensamble de las curvas de duración del SWE total mensual, donde se aprecia la misma respuesta que en el caso del SWE total mensual promedio, es decir, una disminución significativa de la acumulación nival en el corto plazo (VF1), para ambos escenarios RCP, una alta variabilidad de la acumulación en el mediano plazo (VF2) para el RCP 8.5 y la baja capacidad de acumulación de nieve en la cuenca, para el largo plazo en el escenario RCP8.5.

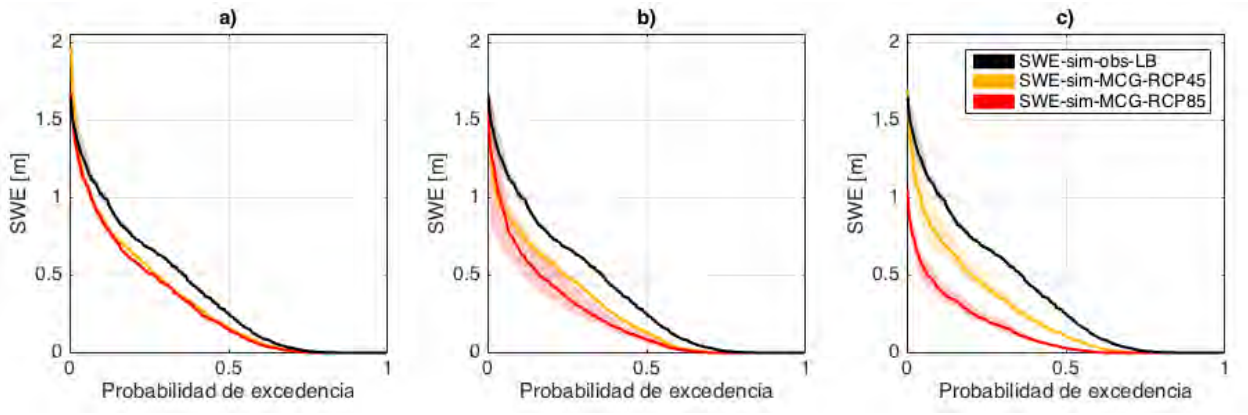


Figura 7.58. Comparación de las curvas de duración de SWE totales mensuales de Invernada, simulados para línea base utilizando MCG (SWE-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (SWE-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (SWE-sim-MCG-RCP8.5), en las distintas ventanas futuras y para el ensamble de los distintos MCG. La información se divide en a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3: 2069-2099. La sombra denota el rango de variación entre los máximos y mínimos del ensamble de MCG. Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 7.20** se muestran los porcenatajes de variación del ensamble de SWE, para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5. El indicador utilizado corresponde al SWE máximo. Se incluye además la variación de la precipitación total anual promedio y la temperatura media anual promedio en la cuenca, en el mismo periodo. En la **Tabla 7.21** se presentan los mismos resultados para el escenario RCP8.5. Como se observa, los cambios en la acumulación de nieve muestran un mayor impacto del cambio climático que la precipitación y los caudales. Es más, si se comparan los cambios en el SWE máximo con los cambios futuros de temperatura se observa una correspondencia importante entre ambas variables. De esta forma, es posible indicar que el impacto más importante del aumento de temperaturas en el futuro se verá reflejado directamente en la capacidad de la cuenca de acumular nieve en el invierno.

Tabla 7.20. Resumen del ensamble de SWE en Invernada. SWE máximo, precipitación total anual promedio y temperatura media anual promedio por periodo. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5. Fuente: Elaboración propia.

Ventana	Periodo	Escenario RCP4.5					
		SWE Máximo		PP		T	
		[m]	[%]	[mm]	[%]	[°C]	Δ [°C]
LB	1976-2005	0,98	0,0	2305	0,0	5,3	0,0
VF1	2009-2039	0,86	-11,8	2209	-4,2	6,4	1,1
VF2	2039-2069	0,77	-21,1	2086	-9,5	7,1	1,8
VF3	2069-2099	0,75	-23,5	2170	-5,8	7,5	2,2

Tabla 7.21. Resumen del ensamble de SWE en Invernada. SWE máximo, precipitación total anual promedio y temperatura media anual promedio por periodo. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP8.5. Fuente: Elaboración propia.

Ventana	Periodo	Escenario RCP8.5					
		SWE Máximo		PP		T	
		[m]	[%]	[mm]	[%]	[°C]	Δ [°C]
LB	1976-2005	0,98	0,0	2305	0,0	5,3	0,0
VF1	2009-2039	0,81	-17,3	2164	-6,1	6,5	1,2
VF2	2039-2069	0,67	-31,6	1968	-14,6	7,9	2,6
VF3	2069-2099	0,43	-55,6	1713	-25,7	9,7	4,4

7.4.2.3 Maule

En la **Figura 7.59** se presenta la variación futura de los caudales medios mensuales promedio de Maule para los RCP 4.5 y 8.5. Se compara el ensamble de los MCG en LB con el ensamble de los MCG para las 3 ventanas futuras definidas. Como se observa, el escenario RCP8.5 es el más severo en las VF2 y VF3, mientras que en la VF1 no se producen diferencias significativas entre ambos escenarios, los cuales proyectan importantes disminuciones de los caudales invernales. En el mediano (VF2) y largo plazo (VF3) se espera una mayor disminución de los caudales de primavera y verano, manteniendo a la baja los caudales invernales. En el escenario RCP8.5 se proyecta el adelantamiento de la escorrentía máxima de deshielo en la VF3. Debido al carácter nival de la cuenca, la reducción de caudales de deshielo no se compensará con un aumento significativo de la escorrentía en invierno, siendo esta última la más afectada en todo el periodo futuro de análisis.

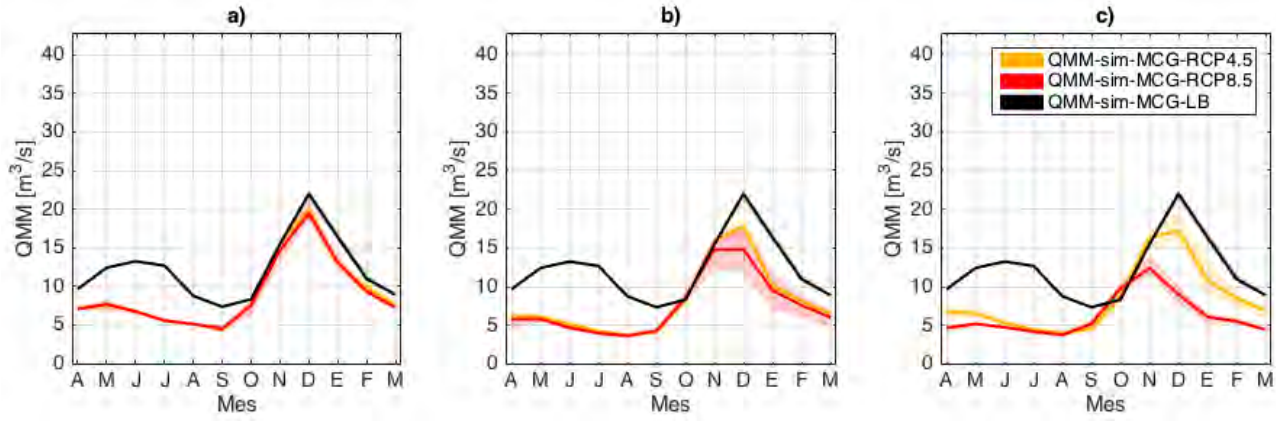


Figura 7.59. Comparación de los ensambles de caudales medios mensuales promedio en Maule, simulados en línea base (QMM-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (QMM-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (QMM-sim-MCG-RCP8.5), en las distintas ventanas futuras. La información se divide en a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3: 2069-2099. La sombra denota el rango de variación entre los máximos y mínimos del ensamble de MCG. Fuente: Elaboración propia.

Desde el punto de vista de la variabilidad, la **Figura 7.60** presenta el ensamble de las curvas de duración, siguiendo el mismo esquema anterior. Se aprecia la caída generalizada

para todas las probabilidades de excedencia, siendo el RCP 8.5 el escenario más severo. También se puede observar una mayor variabilidad de los MCG en la VF2, especialmente en el escenario RCP8.5, donde la amplitud del sombreado (rojo) es máxima en esta ventana de análisis. En la VF3 se aprecia la mayor reducción de los caudales máximos en el RCP8.5, mientras que en las 3 ventanas se aprecia una reducción importante de los caudales bajos.

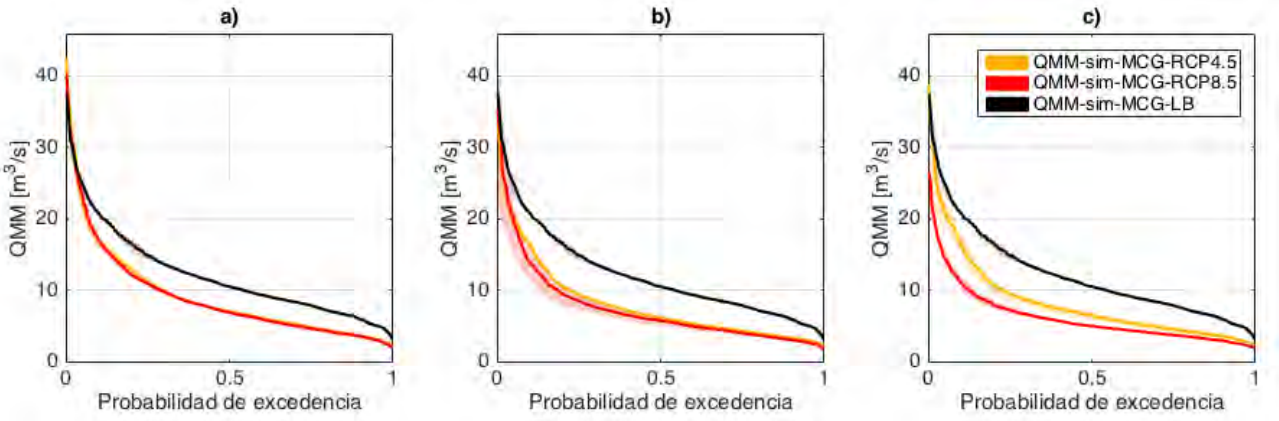


Figura 7.60. Comparación del ensamble de las curvas de duración de caudales medios mensuales en Maule, simulados en línea base (QMM-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (QMM-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (QMM-sim-MCG-RCP8.5), en las distintas ventanas futuras. La información se divide en a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3: 2069-2099. La sombra denota el rango de variación entre los máximos y mínimos del ensamble de MCG. Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 7.61** presenta el ensamble de las curvas de variación estacional de los caudales, para distintas probabilidades de excedencia. En la primera fila (naranjo) se presenta el RCP4.5 para las 3 ventanas futuras, mientras que en la segunda fila (rojo) se presentan las figuras equivalentes para el escenario RCP 8.5. En negro se muestran los caudales simulados en línea base. Se aprecia la caída generalizada de los caudales de invierno en ambos escenarios y ventanas futuras. También se observa que el adelantamiento del caudal máximo se produce en la VF2 en el caso del RCP8.5, para probabilidades de excedencia medias a bajas (años normales a secos). En el caso del escenario RCP4.5 este adelantamiento se produciría en la VF3.

En la **Tabla 7.22** se resumen los promedios por periodo y porcentajes de variación del ensamble de caudales medios anuales promedio, para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5. Se incluye además la variación de la precipitación total anual promedio y la temperatura media anual promedio en la cuenca, en el mismo periodo. En la **Tabla 7.23** se presentan los mismos resultados para el escenario RCP8.5. Como se observa, la reducción de los caudales de invierno tiene un importante efecto en el porcentaje de reducción de caudales, en ambos RCP y desde la VF1, mostrando un fuerte desacople respecto a la reducción de las precipitaciones. Es más, entre ambos RCP se observan diferencias significativas recién en la VF3, en relación al porcentaje de reducción del caudal medio anual.

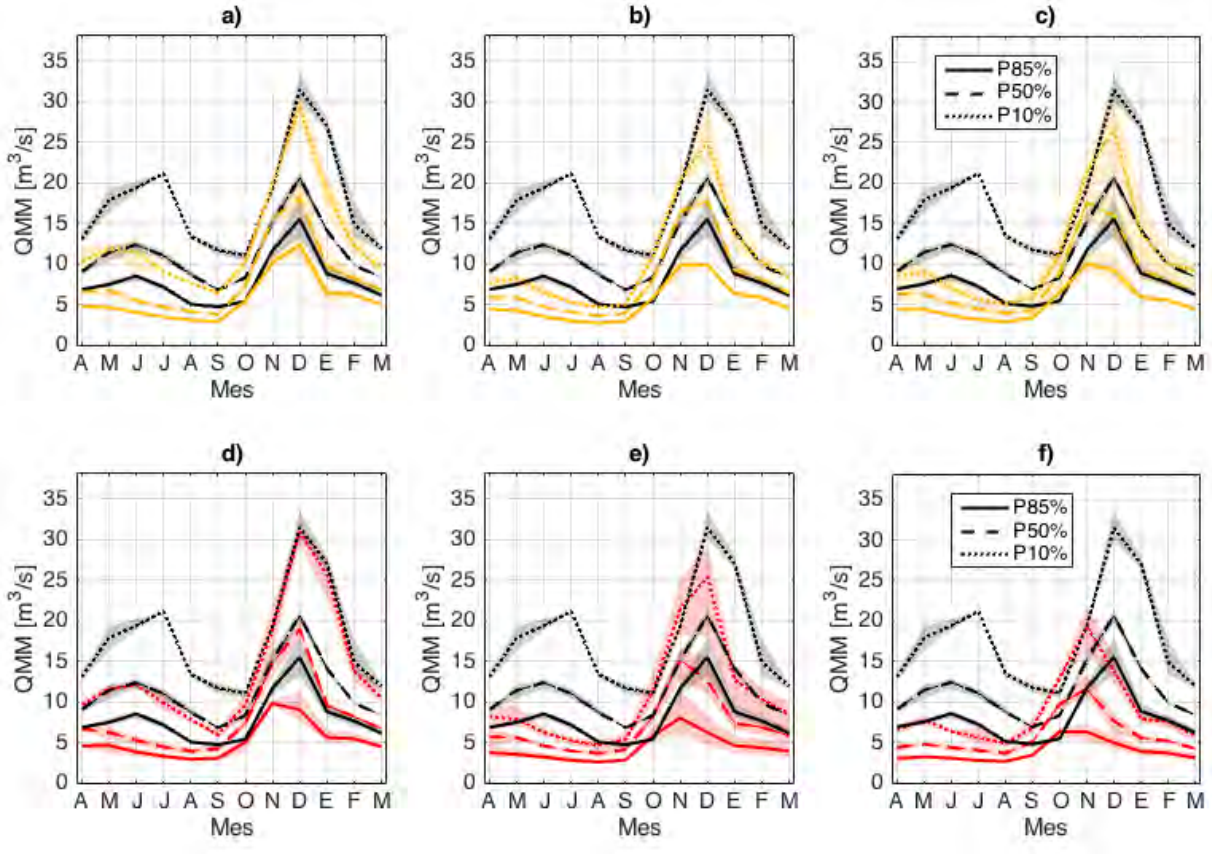


Figura 7.61. Ensamble de las curvas de variación estacional de los caudales medios mensuales en Maule. Se presentan las probabilidades de excedencia de 10, 50 y 85%. En negro se muestran los caudales simulados en línea base, en naranjo se presenta el RCP4.5 y en rojo el RCP8.5. Para escenario RCP4.5 (primera fila, naranjo): a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3:2069-2099. Para escenario RCP8.5 (segunda fila, rojo): d) VF1: Periodo 2009-2039, e) VF2: 2039-2069 y f) VF3: 2069-2099. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.22. Resumen del ensamble de caudales en Maule. Caudal medio anual promedio, precipitación total anual promedio y temperatura media anual promedio por periodo. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5. Fuente: Elaboración propia.

Ventana	Periodo	Escenario RCP4.5						
		Q		PP		T		Q/PP
		[m^3/s]	[%]	[mm]	[%]	[°C]	Δ [°C]	[mm/mm]
LB	1976-2005	12,2	0,0	2556	0,0	5,6	0,0	0,605
VF1	2009-2039	9,2	-24,8	2460	-3,8	6,7	1,1	0,472
VF2	2039-2069	8,0	-34,1	2337	-8,6	7,4	1,8	0,436
VF3	2069-2099	8,3	-31,5	2422	-5,3	7,8	2,2	0,437

Tabla 7.23. Resumen del ensamble de caudales en Maule. Caudal medio anual promedio, precipitación total anual promedio y temperatura media anual promedio por periodo. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP8.5. Fuente: Elaboración propia.

Ventana	Periodo	Escenario RCP8.5						
		Q		PP		T		Q/PP
		[m^3/s]	[%]	[mm]	[%]	[°C]	Δ [°C]	[mm/mm]
LB	1976-2005	12,2	0,0	2556	0,0	5,6	0,0	0,605
VF1	2009-2039	9,0	-26,1	2415	-5,5	6,8	1,2	0,473
VF2	2039-2069	8,0	-34,4	2219	-13,2	8,2	2,6	0,457
VF3	2069-2099	5,9	-51,3	1964	-23,2	10,0	4,4	0,383

La **Figura 7.62** muestra la variación futura de SWE total mensual promedio para los RCP 4.5 y 8.5. Se compara el ensamble de los MCG en LB con el ensamble de los MCG para las 3 ventanas futuras definidas. Como se aprecia, los MCG predicen que los mayores impactos se verán en el largo plazo, siendo el RCP8.5 el escenario más severo, en el cual se espera que la acumulación se reduzca en cerca de un 50% respecto a la LB. También se aprecia la elevada variabilidad del escenario RCP8.5 en la VF2, al igual que en el caso de los caudales. En el caso de SWE, el impacto del cambio climático se observa en el corto plazo (VF1), sin diferencias significativas entre los escenarios RCP. En el caso de Maule, la sensibilidad de la variable de estado SWE al cambio climático es menor que la sensibilidad de los caudales, a diferencia de lo observado en otras subcuencas.

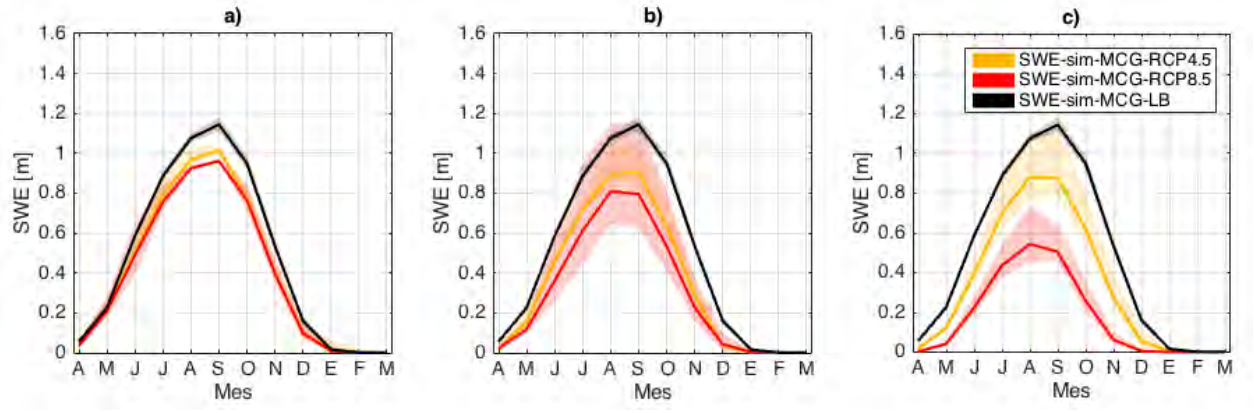


Figura 7.62. Comparación de los ensambles de SWE total mensual promedio en Maule, simulados para línea base (SWE-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (SWE-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (SWE-sim-MCG- RCP8.5), en las distintas ventanas futuras. La información se divide en a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3: 2069-2099. La sombra denota el rango de variación entre los máximos y mínimos del ensamble de MCG. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.63** se presenta el ensamble de las curvas de duración del SWE total mensual, donde se aprecia la misma respuesta que en el caso del SWE total mensual promedio, es decir, una disminución significativa de la acumulación nival en el corto plazo (VF1), para ambos escenarios RCP, una alta variabilidad de la acumulación en el mediano plazo (VF2) para el RCP 8.5 y la baja capacidad de acumulación de nieve en la cuenca, para el largo plazo en el escenario RCP8.5.

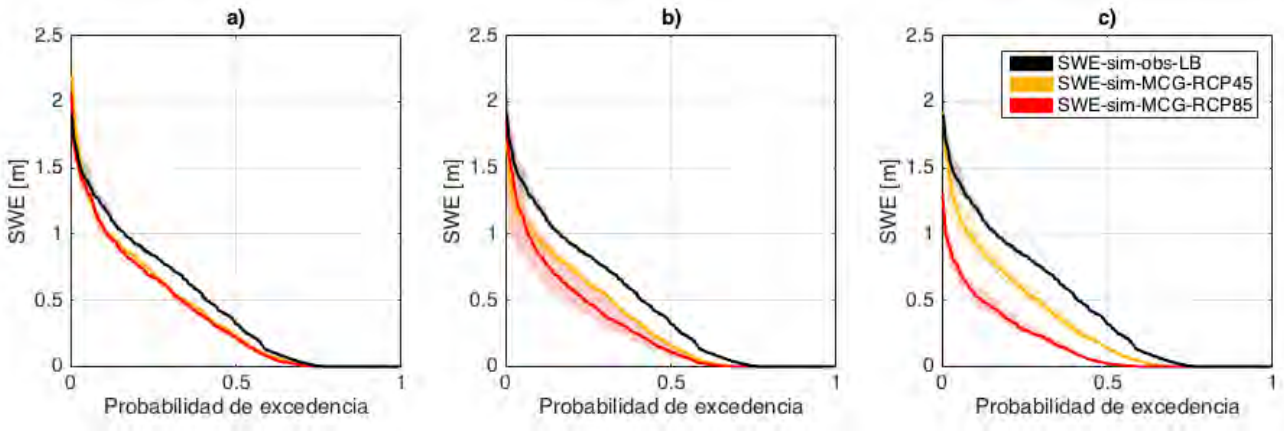


Figura 7.63. Comparación de las curvas de duración de SWE totales mensuales en Maule, simulados para línea base utilizando MCG (SWE-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (SWE-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (SWE-sim-MCG-RCP8.5), en las distintas ventanas futuras y para el ensamble de los distintos MCG. La información se divide en a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3: 2069-2099. La sombra denota el rango de variación entre los máximos y mínimos del ensamble de MCG. Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 7.24** se muestran los porcenatajes de variación del ensamble de SWE, para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5. El indicador utilizado corresponde al SWE máximo. Se incluye además la variación de la precipitación total anual promedio y la temperatura media anual promedio en la cuenca, en el mismo periodo. En la **Tabla 7.25** se presentan los mismos resultados para el escenario RCP8.5. Aquí se aprecia, en términos porcentuales, que la variable de estado SWE máximo muestra una menor sensibilidad que los caudales al cambio climático en ambos RCP, salvo en la VF3 del RCP8.5, donde tanto Q como SWE muestran el mismo porcentaje de disminución. Pese a esto, los cambios en SWE siguen siendo un mejor indicador general de los cambios de temperatura que se producirán en el futuro.

Tabla 7.24. Resumen del ensamble de SWE en Maule. SWE máximo, precipitación total anual promedio y temperatura media anual promedio por periodo. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5. Fuente: Elaboración propia.

Ventana	Periodo	Escenario RCP4.5					
		SWE Máximo		PP		T	
		[m]	[%]	[mm]	[%]	[°C]	Δ [°C]
LB	1976-2005	1,15	0,0	2556	0,0	5,6	0,0
VF1	2009-2039	1,03	-10,3	2460	-3,8	6,7	1,1
VF2	2039-2069	0,93	-19,2	2337	-8,6	7,4	1,8
VF3	2069-2099	0,92	-20,5	2422	-5,3	7,8	2,2

Tabla 7.25. Resumen del ensamble de SWE en Maule. SWE máximo, precipitación total anual promedio y temperatura media anual promedio por periodo. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP8.5. Fuente: Elaboración propia.

Ventana	Periodo	Escenario RCP8.5					
		SWE Máximo		PP		T	
		[m]	[%]	[mm]	[%]	[°C]	Δ [°C]
LB	1976-2005	1,15	0,0	2556	0,0	5,6	0,0
VF1	2009-2039	0,98	-14,5	2415	-5,5	6,8	1,2
VF2	2039-2069	0,83	-27,7	2219	-13,2	8,2	2,6
VF3	2069-2099	0,56	-51,2	1964	-23,2	10,0	4,4

7.4.2.4 Claro y Garzas

En la **Figura 7.64** se presenta la variación futura de los caudales medios mensuales promedio de Claro+Garzas para los RCP 4.5 y 8.5. Se compara el ensamble de los MCG en LB con el ensamble de los MCG para las 3 ventanas futuras definidas. Como se observa, el escenario RCP8.5 es el más severo en la VF3, mientras que en la VF1 y VF2 no se producen diferencias significativas entre ambos escenarios. Además de un aumento de la variabilidad en el futuro, se observa una importante disminución de los caudales de deshielo. En el caso de los máximos invernales se observa un retraso de estos a partir de la VF2 en el escenario RCP8.5, pero además se aprecia un aumento de la magnitud promedio de estos caudales. En general, se proyecta la desaparición casi completa de la escorrentía de deshielo en la VF3 y en ambos escenarios, lo que indica que a futuro se espera un área nival mucho menor a la actual, pasando de un régimen pluvio-nival a un régimen pluvial.

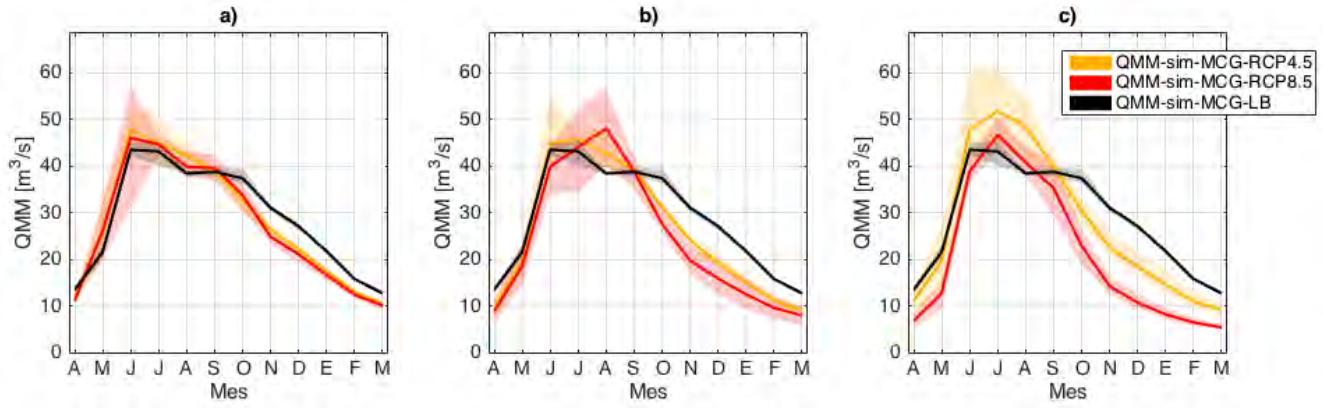


Figura 7.64. Comparación de los ensambles de caudales medios mensuales promedio en Claro+Garzas, simulados en línea base (QMM-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (QMM-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (QMM-sim-MCG-RCP8.5), en las distintas ventanas futuras. La información se divide en a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3: 2069-2099. La sombra denota el rango de variación entre los máximos y mínimos del ensamble de MCG. Fuente: Elaboración propia.

Desde el punto de vista de la variabilidad, la **Figura 7.65** presenta el ensamble de las curvas de duración, siguiendo el mismo esquema anterior. Se aprecia la caída generalizada de los caudales asociados a probabilidades de excedencia mayores a un 20%, siendo el RCP

8.5 el escenario más severo. También se puede observar un aumento de los caudales para probabilidades de excedencia menores a un 20%, dando cuenta de los resultados presentados en la **Figura 7.64**.

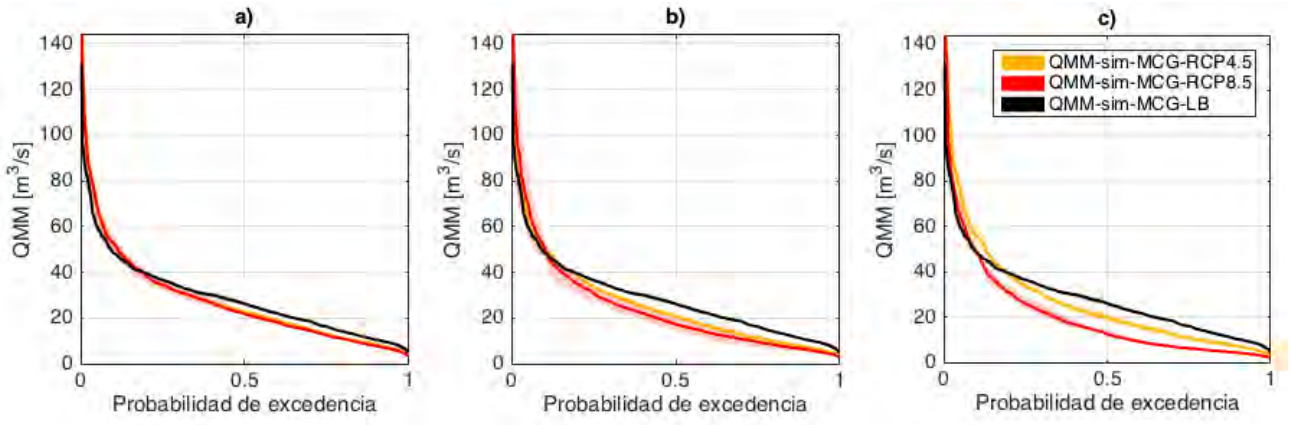


Figura 7.65. Comparación del ensamble de las curvas de duración de caudales medios mensuales en Claro+Garzas, simulados en línea base (QMM-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (QMM-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (QMM-sim-MCG- RCP8.5), en las distintas ventanas futuras. La información se divide en a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3: 2069-2099. La sombra denota el rango de variación entre los máximos y mínimos del ensamble de MCG. Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 7.66** presenta el ensamble de las curvas de variación estacional de los caudales, para distintas probabilidades de excedencia. En la primera fila (naranjo) se presenta el RCP4.5 para las 3 ventanas futuras, mientras que en la segunda fila (rojo) se presentan las figuras equivalentes para el escenario RCP 8.5. En negro se muestran los caudales simulados en línea base. En el RCP4.5 (naranjo) se observa el cambio de régimen hidrológico en la VF2, para años normales a secos, mientras que en años húmedos aún será posible contar con algo de escorrentía a comienzos de primvera, pero con un rápido descenso debido a la escasa acumulación de nieve. También se observa un retraso de los caudales máximos, el cual depende del tipo de año hidrológico que se produzca. En el escenario RCP8.5 (rojo) los cambios proyectados son similares al escenario RCP4.5, pero más pronunciados en el descenso de los caudales de deshielo.

En la **Tabla 7.26** se resumen los promedios por periodo y porcentajes de variación del ensamble de caudales medios anuales promedio, para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5. Se incluye además la variación de la precipitación total anual promedio y la temperatura media anual promedio en la cuenca, en el mismo periodo. En la **Tabla 7.27** se presentan los mismos resultados para el escenario RCP8.5. Como se aprecia, en el escenario RCP4.5 se obtiene un descenso acoplado entre el caudal y la precipitación, mientras que en el RCP8.5 estas variables se desacoplan a partir de la VF2, exibiendo el impacto más importante en el caudal medio anual promedio de la VF3.

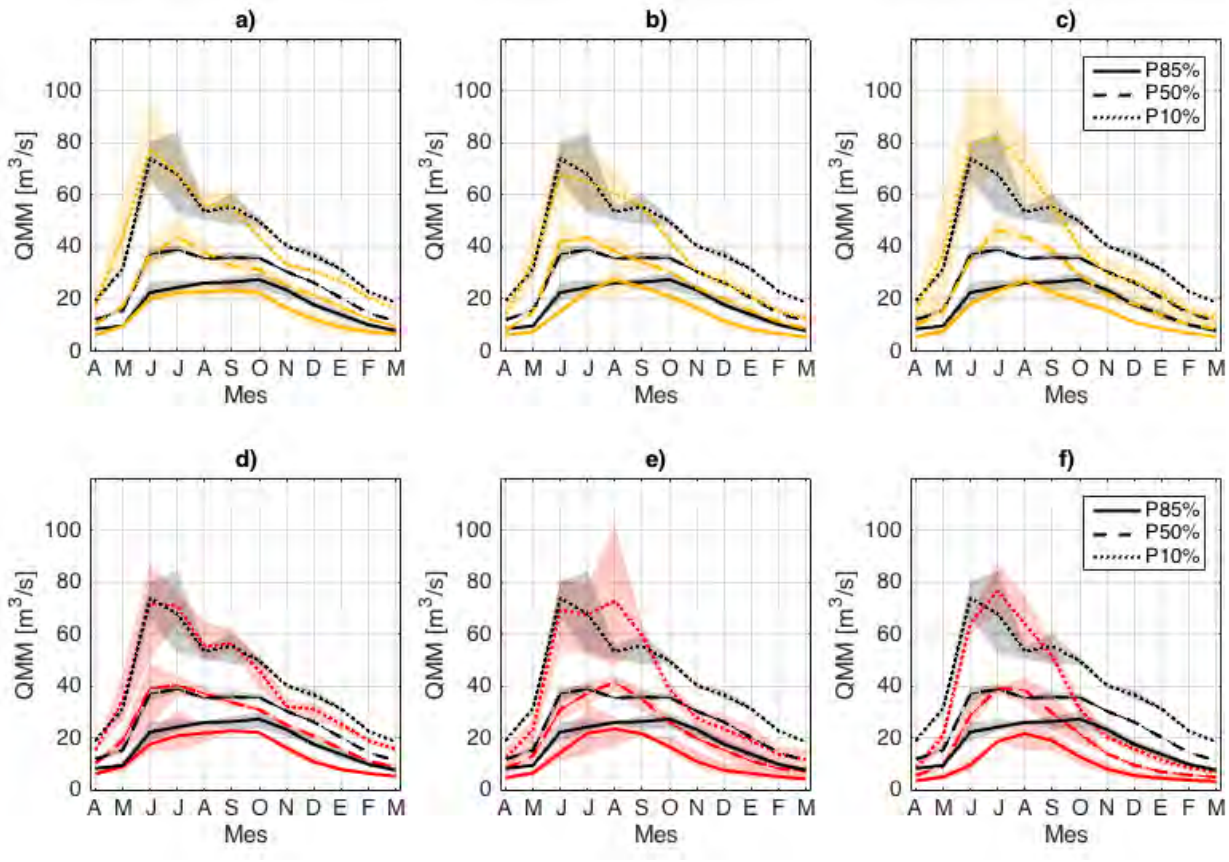


Figura 7.66. Ensamble de las curvas de variación estacional de los caudales medios mensuales en Claro+Garzas. Se presentan las probabilidades de excedencia de 10, 50 y 85%. En negro se muestran los caudales simulados en línea base, en naranjo se presenta el RCP4.5 y en rojo el RCP8.5. Para escenario RCP4.5 (primera fila, naranjo): a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3:2069-2099. Para escenario RCP8.5 (segunda fila, rojo): d) VF1: Periodo 2009-2039, e) VF2: 2039-2069 y f) VF3: 2069-2099. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.26. Resumen del ensamble de caudales en Claro+Garzas. Caudal medio anual promedio, precipitación total anual promedio y temperatura media anual promedio por periodo. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5. Fuente: Elaboración propia.

Ventana	Periodo	Escenario RCP4.5						
		Q		PP		T		Q/PP
		[m³/s]	[%]	[mm]	[%]	[°C]	Δ [°C]	[mm/mm]
LB	1976-2005	28,7	0,0	2307	0,0	7,7	0,0	0,808
VF1	2009-2039	27,8	-3,2	2211	-4,2	8,8	1,1	0,815
VF2	2039-2069	25,9	-9,6	2088	-9,5	9,5	1,8	0,807
VF3	2069-2099	27,1	-5,8	2172	-5,8	9,9	2,2	0,808

Tabla 7.27. Resumen del ensamble de caudales en Claro+Garzas. Caudal medio anual promedio, precipitación total anual promedio y temperatura media anual promedio por periodo. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP8.5. Fuente: Elaboración propia.

Ventana	Periodo	Escenario RCP8.5						
		Q		PP		T		Q/PP
		[m^3/s]	[%]	[mm]	[%]	[°C]	Δ [°C]	[mm/mm]
LB	1976-2005	28,7	0,0	2307	0,0	7,7	0,0	0,808
VF1	2009-2039	27,2	-5,3	2166	-6,1	8,9	1,2	0,814
VF2	2039-2069	26,1	-9,1	1970	-14,6	10,3	2,6	0,860
VF3	2069-2099	19,7	-31,6	1715	-25,7	12,1	4,4	0,744

La **Figura 7.67** muestra la variación futura de SWE total mensual promedio para los RCP 4.5 y 8.5. Se compara el ensamble de los MCG en LB con el ensamble de los MCG para las 3 ventanas futuras definidas. Como se aprecia, el mayor impacto se produce en Garzas (segunda fila), cuya área nival es mucho menor en magnitud y representatividad de su total modelado, que el área nival de Claro. En ambas subcuencas los MCG predicen que los mayores impactos se verán en el largo plazo, siendo el RCP8.5 el escenario más severo, en el cual se espera que la acumulación máxima se reduzca en cerca de un 70% respecto a la LB en Claro (primera fila) y en cerca de un 85% en Garzas (segunda fila). También se aprecia la elevada variabilidad del escenario RCP8.5 en la VF2, en ambas subcuencas. En ambos casos, el impacto del cambio climático se observa en el corto plazo (VF1), sin diferencias significativas entre los escenarios RCP, lo cual indica que la acumulación de nieve es una variable más sensible que el caudal para evaluar impactos en el corto plazo.

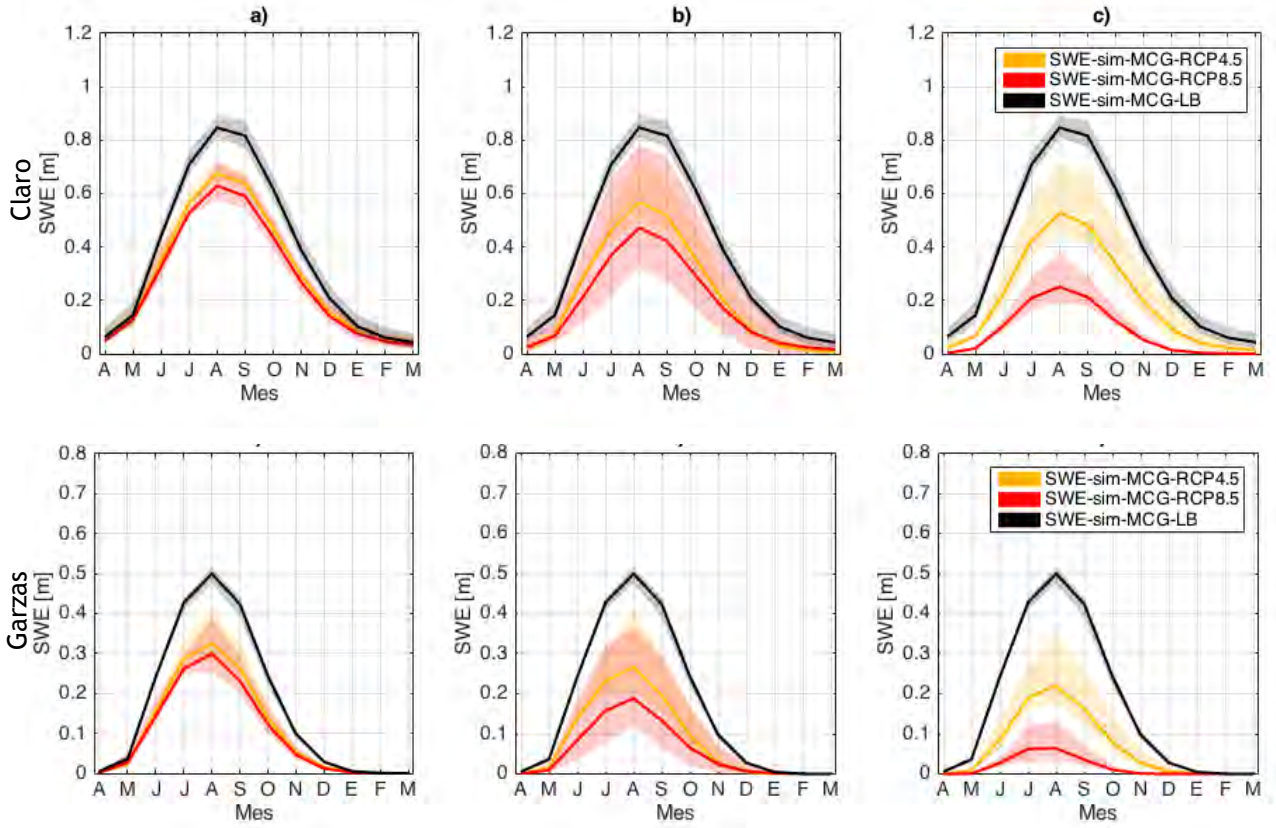


Figura 7.67. Comparación de los ensambles de SWE total mensual promedio simulados en Claro y Garzas para línea base (SWE-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (SWE-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (SWE-sim-MCG- RCP8.5), en las distintas ventanas futuras. La información se divide en a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3: 2069-2099, donde la primera fila muestra a Claro y la segunda fila muestra a Garzas. La sombra denota el rango de variación entre los máximos y mínimos del ensamble de MCG. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7.68** se presenta el ensamble de las curvas de duración del SWE total mensual, donde se aprecia la misma respuesta que en el caso del SWE total mensual promedio, es decir, una disminución significativa de la acumulación nival en el corto plazo (VF1), para ambos escenarios RCP y subcuencas, una alta variabilidad de la acumulación en el mediano plazo (VF2) para el RCP 8.5 y la baja capacidad de acumulación de nieve en las subcuencas, para el largo plazo en el escenario RCP8.5.

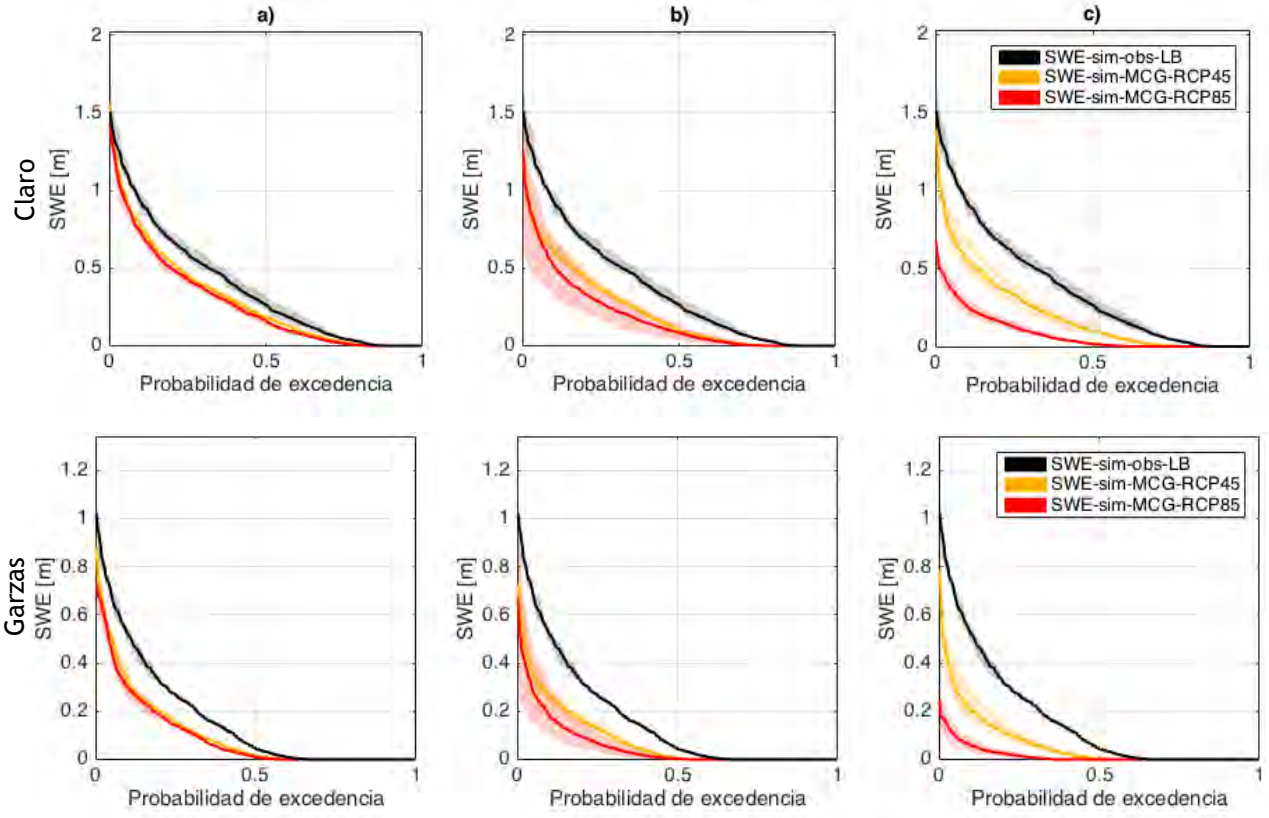


Figura 7.68. Comparación de las curvas de duración de SWE totales mensuales simulados en Claro y Garzas para línea base utilizando MCG (SWE-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (SWE-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (SWE-sim-MCG-RCP8.5), en las distintas ventanas futuras y para el ensamble de los distintos MCG. La información se divide en a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3: 2069-2099, donde la primera fila muestra a Claro y la segunda fila muestra a Garzas. La sombra denota el rango de variación entre los máximos y mínimos del ensamble de MCG. Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 7.28** se muestran los porcenatajes de variación del ensamble de SWE de Claro, para las distintas ventanas en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. El indicador utilizado corresponde al SWE máximo. Se incluye además la variación de la precipitación total anual promedio y la temperatura media anual promedio en la cuenca, en el mismo periodo. En la **Tabla 7.29** se presentan los mismos resultados para Garzas. En ambas subcuencas y escenarios se aprecia una estrecha relación entre la variación de la temperatura y el porcentaje de disminución del SWE máximo, mostrando además un mayor impacto del cambio climático que en el caso de los caudales. También se aprecia que Garzas será la subcuenca más afectada en el futuro.

Tabla 7.28. Resumen del ensamble de SWE en Claro. SWE máximo, precipitación total anual promedio y temperatura media anual promedio por periodo. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5 y RCP8.5. Fuente: Elaboración propia.

Ventana	Periodo	Escenario RCP4.5					
		SWE Máximo		PP		T	
		[m]	[%]	[mm]	[%]	[°C]	Δ [°C]
LB	1976-2005	0,85	0,0	2307	0,0	7,7	0,0
VF1	2009-2039	0,68	-19,9	2211	-4,2	8,8	1,1
VF2	2039-2069	0,57	-33,1	2088	-9,5	9,5	1,8
VF3	2069-2099	0,53	-37,7	2172	-5,8	9,9	2,2
Ventana	Periodo	Escenario RCP8.5					
		SWE Máximo		PP		T	
		[m]	[%]	[mm]	[%]	[°C]	Δ [°C]
LB	1976-2005	0,85	0,0	2307	0,0	7,7	0,0
VF1	2009-2039	0,64	-25,4	2166	-6,1	8,9	1,2
VF2	2039-2069	0,47	-44,5	1970	-14,6	10,3	2,6
VF3	2069-2099	0,26	-70,1	1715	-25,7	12,1	4,4

Tabla 7.29. Resumen del ensamble de SWE en Garzas. SWE máximo, precipitación total anual promedio y temperatura media anual promedio por periodo. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5 y RCP8.5. Fuente: Elaboración propia.

Ventana	Periodo	Escenario RCP4.5					
		SWE Máximo		PP		T	
		[m]	[%]	[mm]	[%]	[°C]	Δ [°C]
LB	1976-2005	0,50	0,0	2307	0,0	7,7	0,0
VF1	2009-2039	0,33	-34,4	2211	-4,2	8,8	1,1
VF2	2039-2069	0,27	-46,0	2088	-9,5	9,5	1,8
VF3	2069-2099	0,22	-55,6	2172	-5,8	9,9	2,2
Ventana	Periodo	Escenario RCP8.5					
		SWE Máximo		PP		T	
		[m]	[%]	[mm]	[%]	[°C]	Δ [°C]
LB	1976-2005	0,50	0,0	2307	0,0	7,7	0,0
VF1	2009-2039	0,30	-39,8	2166	-6,1	8,9	1,2
VF2	2039-2069	0,19	-61,4	1970	-14,6	10,3	2,6
VF3	2069-2099	0,07	-85,8	1715	-25,7	12,1	4,4

7.4.2.5 Resumen de Resultados

En la **Tabla 7.30** se presenta el resumen de resultados de todas las subcuencas analizadas, para el escenario RCP4.5, mientras que en la **Tabla 7.31** se presentan los mismos resultados para el escenario RCP8.5.

Tabla 7.30. Resumen de resultados de Maule Alto. SWE máximo, caudal medio anual promedio, precipitación total anual promedio y temperatura media anual promedio por periodo. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5. Fuente: Elaboración propia.

ID	Ventana	Periodo	Escenario RCP4.5							
			SWE		Q		PP		T	
			[m]	[%]	[m^3/s]	[%]	[mm]	[%]	[°C]	Δ [°C]
Melado	LB	1976-2005	0,81	0,0	111,3	0,0	2587,2	0,0	7,6	0,0
	VF1	2009-2039	0,65	-20,4	112,2	0,8	2491,2	-3,7	8,7	1,1
	VF2	2039-2069	0,56	-30,8	106,1	-4,7	2368,1	-8,5	9,4	1,8
	VF3	2069-2099	0,51	-37,3	109,4	-1,8	2452,9	-5,2	9,8	2,2
Invernada	LB	1976-2005	0,98	0,0	38,7	0,0	2304,7	0,0	5,3	0,0
	VF1	2009-2039	0,86	-11,8	37,1	-4,1	2208,7	-4,2	6,4	1,1
	VF2	2039-2069	0,77	-21,1	34,7	-10,5	2085,5	-9,5	7,1	1,8
	VF3	2069-2099	0,75	-23,5	36,1	-6,7	2170,4	-5,8	7,5	2,2
Maule	LB	1976-2005	1,15	0,0	12,2	0,0	2556,3	0,0	5,6	0,0
	VF1	2009-2039	1,03	-10,3	9,2	-24,8	2460,3	-3,8	6,7	1,1
	VF2	2039-2069	0,93	-19,2	8,0	-34,1	2337,1	-8,6	7,4	1,8
	VF3	2069-2099	0,92	-20,5	8,3	-31,5	2422,0	-5,3	7,8	2,2
Claro*	LB	1976-2005	0,85	0,0	28,7	0,0	2306,8	0,0	7,7	0,0
	VF1	2009-2039	0,68	-19,9	27,8	-3,2	2210,8	-4,2	8,8	1,1
	VF2	2039-2069	0,57	-33,1	25,9	-9,6	2087,6	-9,5	9,5	1,8
	VF3	2069-2099	0,53	-37,7	27,1	-5,8	2172,5	-5,8	9,9	2,2
Garzas*	LB	1976-2005	0,50	0,0	28,7	0,0	2306,8	0,0	7,7	0,0
	VF1	2009-2039	0,33	-34,4	27,8	-3,2	2210,8	-4,2	8,8	1,1
	VF2	2039-2069	0,27	-46,0	25,9	-9,6	2087,6	-9,5	9,5	1,8
	VF3	2069-2099	0,22	-55,6	27,1	-5,8	2172,5	-5,8	9,9	2,2

*El caudal corresponde a Claro+Garzas, mientras que SWE es independiente para cada subcuenca.

Tabla 7.31. Resumen de resultados de Maule Alto. SWE máximo, caudal medio anual promedio, precipitación total anual promedio y temperatura media anual promedio por periodo. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP8.5. Fuente: Elaboración propia.

ID	Ventana	Periodo	Escenario RCP8.5							
			SWE		Q		PP		T	
			[m]	[%]	[m^3/s]	[%]	[mm]	[%]	[°C]	Δ [°C]
Melado	LB	1976-2005	0,81	0,0	111,3	0,0	2587,2	0,0	7,6	0,0
	VF1	2009-2039	0,61	-25,0	110,4	-0,9	2446,4	-5,4	8,8	1,2
	VF2	2039-2069	0,45	-44,2	98,8	-11,3	2250,1	-13,0	10,2	2,6
	VF3	2069-2099	0,24	-70,3	85,9	-22,9	1995,3	-22,9	12,0	4,4
Invernada	LB	1976-2005	0,98	0,0	38,7	0,0	2304,7	0,0	5,3	0,0
	VF1	2009-2039	0,81	-17,3	36,4	-6,0	2163,9	-6,1	6,5	1,2
	VF2	2039-2069	0,67	-31,6	34,8	-10,2	1967,5	-14,6	7,9	2,6
	VF3	2069-2099	0,43	-55,6	26,3	-32,2	1712,7	-25,7	9,7	4,4
Maule	LB	1976-2005	1,15	0,0	12,2	0,0	2556,3	0,0	5,6	0,0
	VF1	2009-2039	0,98	-14,5	9,0	-26,1	2415,5	-5,5	6,8	1,2
	VF2	2039-2069	0,83	-27,7	8,0	-34,4	2219,1	-13,2	8,2	2,6
	VF3	2069-2099	0,56	-51,2	5,9	-51,3	1964,3	-23,2	10,0	4,4
Claro*	LB	1976-2005	0,85	0,0	28,7	0,0	2306,8	0,0	7,7	0,0
	VF1	2009-2039	0,64	-25,4	27,2	-5,3	2166,0	-6,1	8,9	1,2
	VF2	2039-2069	0,47	-44,5	26,1	-9,1	1969,6	-14,6	10,3	2,6
	VF3	2069-2099	0,26	-70,1	19,7	-31,6	1714,8	-25,7	12,1	4,4
Garzas*	LB	1976-2005	0,50	0,0	28,7	0,0	2306,8	0,0	7,7	0,0
	VF1	2009-2039	0,30	-39,8	27,2	-5,3	2166,0	-6,1	8,9	1,2
	VF2	2039-2069	0,19	-61,4	26,1	-9,1	1969,6	-14,6	10,3	2,6
	VF3	2069-2099	0,07	-85,8	19,7	-31,6	1714,8	-25,7	12,1	4,4

*El caudal corresponde a Claro+Garzas, mientras que SWE es independiente para cada subcuenca.

7.5 Generación Hidroeléctrica de Escenarios Futuros

En este acápite se presenta cómo varía la generación hidroeléctrica a futuro (por ventana futura), empleando como base las series simuladas de caudales con datos de los MCG. Se consideran dos casos de análisis, cuyo esquema de resultados se presenta en la **Figura 7.6**:

i. **Capacidad Instalada**: Se evalúa la producción del sistema Maule Alto utilizando series simuladas de energía bruta producida entre 1976 y 2099, en base a las 12 relaciones mensuales entre el caudal total (suma de las subcuencas) y la generación de la potencia instalada total, presentada en la **Figura 6.20**. Se utiliza el caudal simulado con los MCG para obtener la energía bruta producida en línea base (LB) y en ventanas futuras (VF).

ii. **Capacidad Potencial**: Se evalúa la producción del potencial hidroeléctrico empleando como referencia puntos seleccionados en la subcuenca del Melado que se indican en la **Tabla 6.16**. Se utiliza el caudal simulado con los MCG para obtener la energía bruta producida en línea base (LB) y en ventanas futuras (VF).

A continuación se presentan las figuras y cuadros resumen que permiten el análisis del cambio climático en la generación hidroeléctrica de la potencia instalda y del potencial existente en el sistema Maule Alto.

7.5.1 Capacidad Instalada

La **Figura 7.69** presenta el análisis estacional de la energía bruta producida en Maule Alto, para los escenarios RCP 4.5 y 8.5. Se compara el ensamble de la energía obtenida con los caudales de los MCG en LB y de los MCG para las 3 ventanas futuras definidas. Al igual que en el caso de la disponibilidad hídrica, la generación hidroelétrica se ve más afectada bajo el escenario RCP8.5. En general, los MCG proyectan los cambios más severos en el mediano (VF2) y largo plazo (VF3), pero en el corto plazo (VF1) es esperable observar una menor capacidad de generación en el periodo de deshielo. En el escenario RCP8.5 se proyecta una inversión de la temporada de mayor generación en la VF3, posiblemente influenciado por la menor acumulación de nieve y el cambio proyectado de régimen hidrológico nivo-pluvial a uno pluvio-nival.

Desde el punto de vista de la variabilidad, la **Figura 7.70** presenta las curvas de duración de los ensambles, siguiendo el mismo esquema anterior. Se aprecia la caída generalizada para todas las probabilidades de excedencia, siendo más importante esta disminución para probabilidades de excedencia medias-altas (reflejo de la generación base o del periodo de caudales bajos). El RCP 8.5 resulta ser el escenario más severo. También se puede observar una mayor variabilidad de la generación en la VF2, especialmente en el escenario RCP8.5, donde la amplitud del sombreado (rojo) es máxima en esta ventana de análisis. En el largo plazo (VF3) el escenario RCP4.5 se mantiene levemente por debajo de la línea base, pero en el escenario RCP8.5 se tiene un descenso importante.

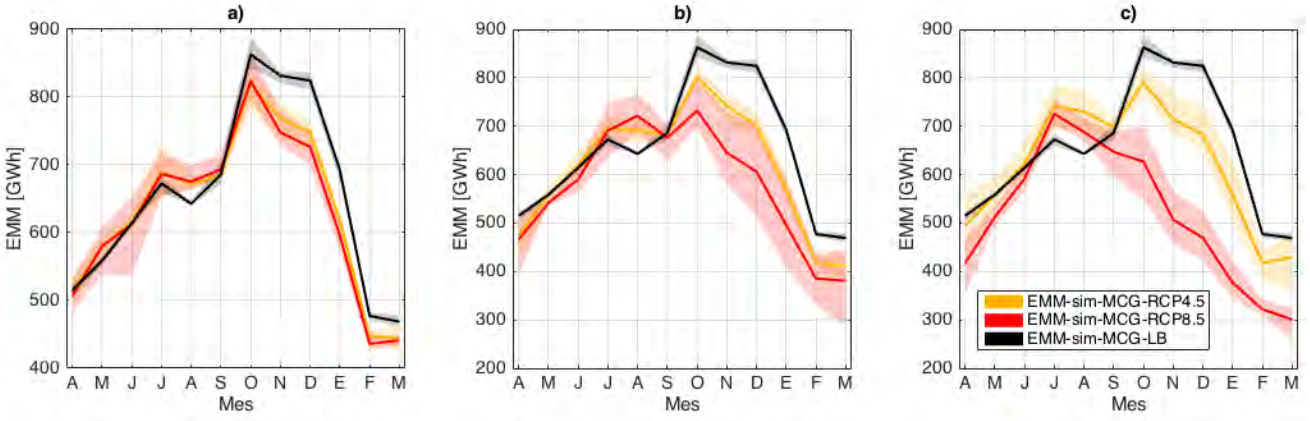


Figura 7.69. Comparación de los ensambles de energía bruta media mensual de Maule Alto, simulada en línea base (EMM-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (EMM-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (EMM-sim-MCG-RCP8.5), en las distintas ventanas futuras. La información se divide en a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3: 2069-2099. La sombra denota el rango de variación entre los máximos y mínimos del ensamble de MCG. Fuente: Elaboración propia.

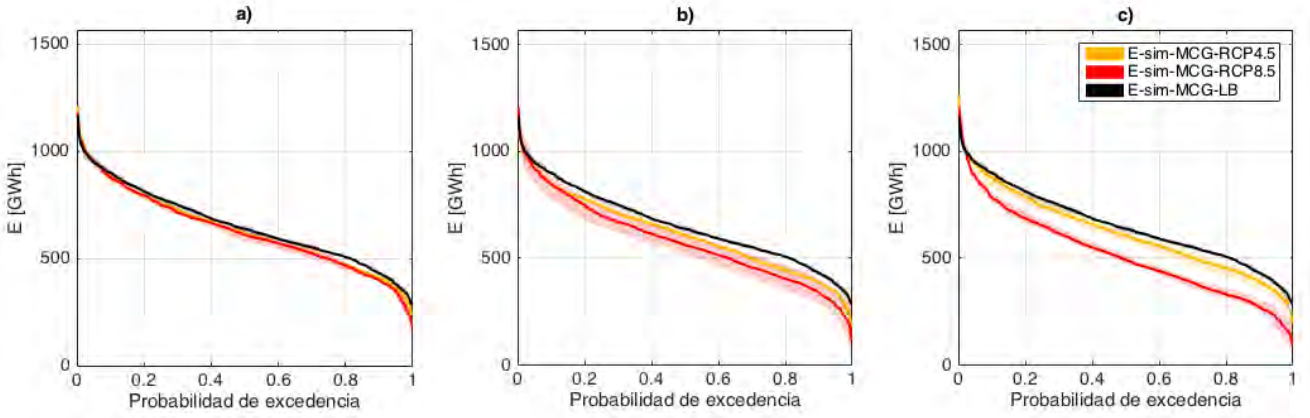


Figura 7.70. Comparación de las curvas de duración de energía bruta mensual de Maule Alto, simulada en línea base (E-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (E-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (E-sim-MCG- RCP8.5), en las distintas ventanas futuras. La información se divide en a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3: 2069-2099. La sombra denota el rango de variación entre los máximos y mínimos del ensamble de MCG. Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 7.71** presenta el ensamble de las curvas de variación estacional de la energía bruta mensual, para distintas probabilidades de excedencia. En la primera fila (naranjo) se presenta el RCP4.5 para las 3 ventanas futuras, mientras que en la segunda fila (rojo) se presentan las figuras equivalentes para el escenario RCP 8.5. En negro se muestra la energía simulada en línea base. En general, se observa que las probabilidades de excedencia más afectadas son las mayores a un 50%, siendo el RCP8.5 el escenario más severo, especialmente en la VF3, en el cual se aprecia el impacto en la generación debido al cambio proyectado en el régimen hidrológico.

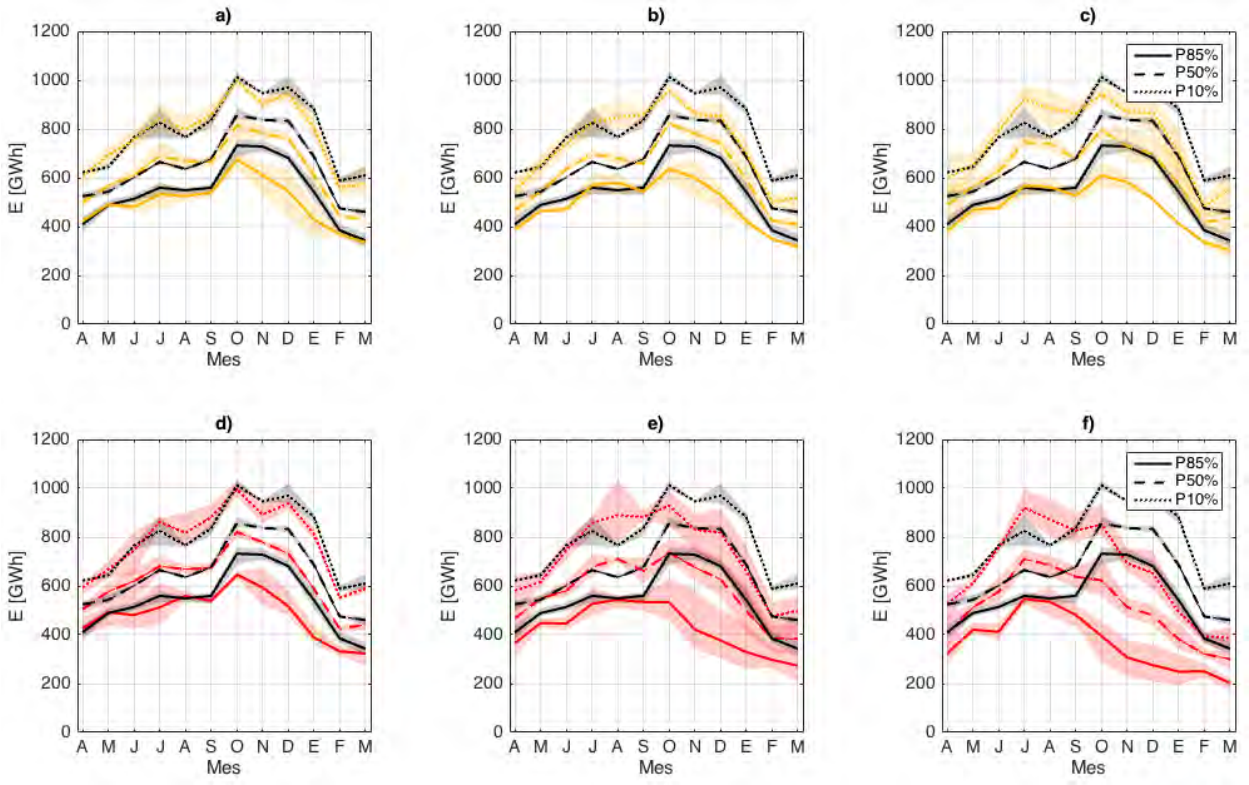


Figura 7.71. Curvas de variación estacional del ensamble de la energía bruta mensual en Maule Alto. Se presentan las probabilidades de excedencia de 10, 50 y 85%. En negro se muestran los caudales simulados en línea base, en naranjo se presenta el RCP4.5 y en rojo el RCP8.5. Para escenario RCP4.5 (primera fila, naranjo): a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3:2069-2099. Para escenario RCP8.5 (segunda fila, rojo): d) VF1: Periodo 2009-2039, e) VF2: 2039-2069 y f) VF3: 2069-2099. Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 7.32** se resumen los promedios por periodo y porcentajes de variación del ensamble de la energía total anual promedio, para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5. Se incluye además la variación del caudal medio anual promedio (suma de los caudales de las subcuencas en estudio) y de la precipitación total anual promedio (promedio ponderado por las áreas de las subcuencas en estudio), en el mismo periodo. En la **Tabla 7.33** se presentan los mismos resultados para el escenario RCP8.5.

En ambos escenarios se observa una estrecha relación entre la disminución de la precipitación, el caudal y la energía generada por el sistema Maule Alto. En el RCP4.5 esta relación es más estrecha en el largo plazo (VF3), que en el RCP8.5, pero en ambos escenarios se observa una mayor disminución de los caudales en la VF2 que de la energía generada. En el corto plazo (VF1), se tiene que ambas variables disminuyen en forma similar. La precipitación disminuye en forma más pronunciada que la energía, en todos escenarios y ventanas futuras.

Tabla 7.32. Resumen del ensamble de energía producida en Maule Alto. Energía anual promedio, caudal medio anual promedio y precipitación anual promedio. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5. Fuente: Elaboración propia.

Ventana	Periodo	Escenario RCP4.5					
		Energía Anual Promedio		Q		PP	
		[GWh]	[%]	[m^3/s]	[%]	[mm]	[%]
LB	1976-2005	7846	0,0	191	0,0	2485	0,0
VF1	2009-2039	7602	-3,1	186	-2,4	2389	-3,9
VF2	2039-2069	7364	-6,1	175	-8,5	2266	-8,8
VF3	2069-2099	7439	-5,2	181	-5,3	2351	-5,4

Tabla 7.33. Resumen del ensamble de energía producida en Maule Alto. Energía anual promedio, caudal medio anual promedio y precipitación anual promedio. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP8.5. Fuente: Elaboración propia.

Ventana	Periodo	Escenario RCP8.5					
		Energía Anual Promedio		Q		PP	
		[GWh]	[%]	[m^3/s]	[%]	[mm]	[%]
LB	1976-2005	7846	0,0	191	0,0	2485	0,0
VF1	2009-2039	7526	-4,1	183	-4,2	2344	-5,7
VF2	2039-2069	6930	-11,7	168	-12,2	2148	-13,6
VF3	2069-2099	6183	-21,2	138	-27,9	1893	-23,8

7.5.2 Capacidad Potencial

En la **Figura 7.72** se presenta el análisis de estacionalidad en distintos puntos de captación con potencial hidroelétrico en Melado. En cada fila se presenta un punto identificado por su ID (ver **Tabla 6.16**), mientras que las columnas representan las 3 ventanas futuras, definidas para el análisis del impacto del cambio climático en el potencial de generación hidroeléctrica.

Con el fin de interpretar los resultados obtenidos en la **Figura 7.72**, se ha generado la **Tabla 7.34**, en la cual se han ordenado los puntos (ID) de mayor a menor área de captación (o menor a mayor elevación). En colores se han agrupado dos pares de ID, considerando sus características y los resultados del análisis estacional.

En primer lugar, se destacan los puntos ID58 e ID327 (rojo), los cuales se caracterizan por ubicarse a elevaciones similares y poseer caudales relativamente bajos, tanto el caudal de diseño (Qdis) para la generación como la restricción impuesta por el caudal ecológico (Qeco). En este caso, se aprecia en la **Figura 7.72** que ambos puntos proveen un potencial de generación relativamente constante durante el año, con bajas en línea base entre un 30% (ID58) y un 20% (ID327) aproximadamente, durante la temporada seca (entre febrero y

abril). En línea base (línea negra) se observa que la capacidad de generación crece durante el año, alcanzando su máximo entre octubre y diciembre, en plena temporada de deshielos. El análisis futuro muestra que la máxima generación se desplaza hacia el invierno bajo el RCP8.5, mientras que en el RCP4.5 ambas temporadas poseen una relevancia similar. Tanto en línea base como en las ventanas futuras, se aprecia que el punto ID58 muestra una mayor diferencia entre máxima y mínima generación, lo cual se puede atribuir a su mayor caudal disponible y ecológico, respecto a ID327.

Tabla 7.34. Características de las captaciones de centrales hidroeléctricas potenciales en la subcuenca del Melado. Fuente Elaboración propia.

Object_ID	Elevación Captación [msnm]	Área Captación [km^2]	Qdis [m^3/s]	Qeco [m^3/s]	dz [m]
86	722	2129	126,8	22,2	37
21	924	1834	94,2	18,6	215
43	995	1356	109,8	13,1	70
58	1219	617	18	4,1	300
327	1248	416	7,6	3,1	120
22	1283	406	80	10,8	200

Por otra parte, en la **Tabla 7.34** se destacan los puntos ID21 e ID22 (celeste), los cuales se caracterizan por tener caudales y altura de caída (dz) similares, pero con áreas de captación en una proporción de 4,5:1, respectivamente. En la **Figura 7.72** se aprecia esta diferencia de áreas en la magnitud de la generación hidroeléctrica, sin embargo, ambos puntos poseen (en línea base) un predominio de la producción en la temporada de deshielo, siendo más marcada en ID22, donde su área nival es mucho más relevante que en ID21. Además de constatar la severidad de las proyecciones bajo el RCP8.5, es posible observar que ID22 tendrá una disminución más relevante de la capacidad de generación. Una inspección visual de los máximos en ambos puntos, para la VF3, muestra una disminución aproximada de 120 a 95 GWh en ID21 y de 45 a 20 GWh en ID22, en el caso del escenario RCP8.5. Porcentualmente, estas diferencias en la VF3 son de 21% y 56% respectivamente, lo cual indica que el mayor impacto del cambio climático se observará más pronto y más severamente en aquellas cuencas que dependen principalmente de los deshielos para su producción hidroelétrica.

La **Figura 7.73** presenta el análisis de variabilidad en distintos puntos de captación con potencial hidroelétrico en Melado, empleando el mismo esquema anterior. Estos resultados permiten confirmar la mayor disponibilidad de agua para generación que poseen ID58 e ID327, así como la disminución de esta disponibilidad en el futuro, principalmente en la VF3 bajo el RCP8.5. En ambos casos el caudal de diseño permite alcanzar la máxima capacidad de generación para probabilidades máximas de entre un 65% (ID58) y un 80% (ID327). Es decir, aquellos caudales con probabilidades de excedencia iguales o menores a dichos porcentajes permitirán el uso completo de la capacidad instalada proyectada en base al caudal de diseño (Qdis).

En el caso de ID22 la curva de duración en línea base indica que no hay probabilidades de alcanzar su máxima capacidad de generación. Por lo tanto, para cualquier probabilidad de excedencia se tendrá una disminución futura de la capacidad de generación en ID22, mientras que ID21 aún podrá alcanzar su máxima capacidad de generación inclusive en la VF3 y para el escenario RCP8.5. En general, salvo por ID58 e ID327, los demás puntos de captación analizados muestran caudales de diseño elevados en línea base, con probabilidades máximas entre un 40% (ID21) y un 20% (ID43) de ocupar su máxima capacidad de generación.

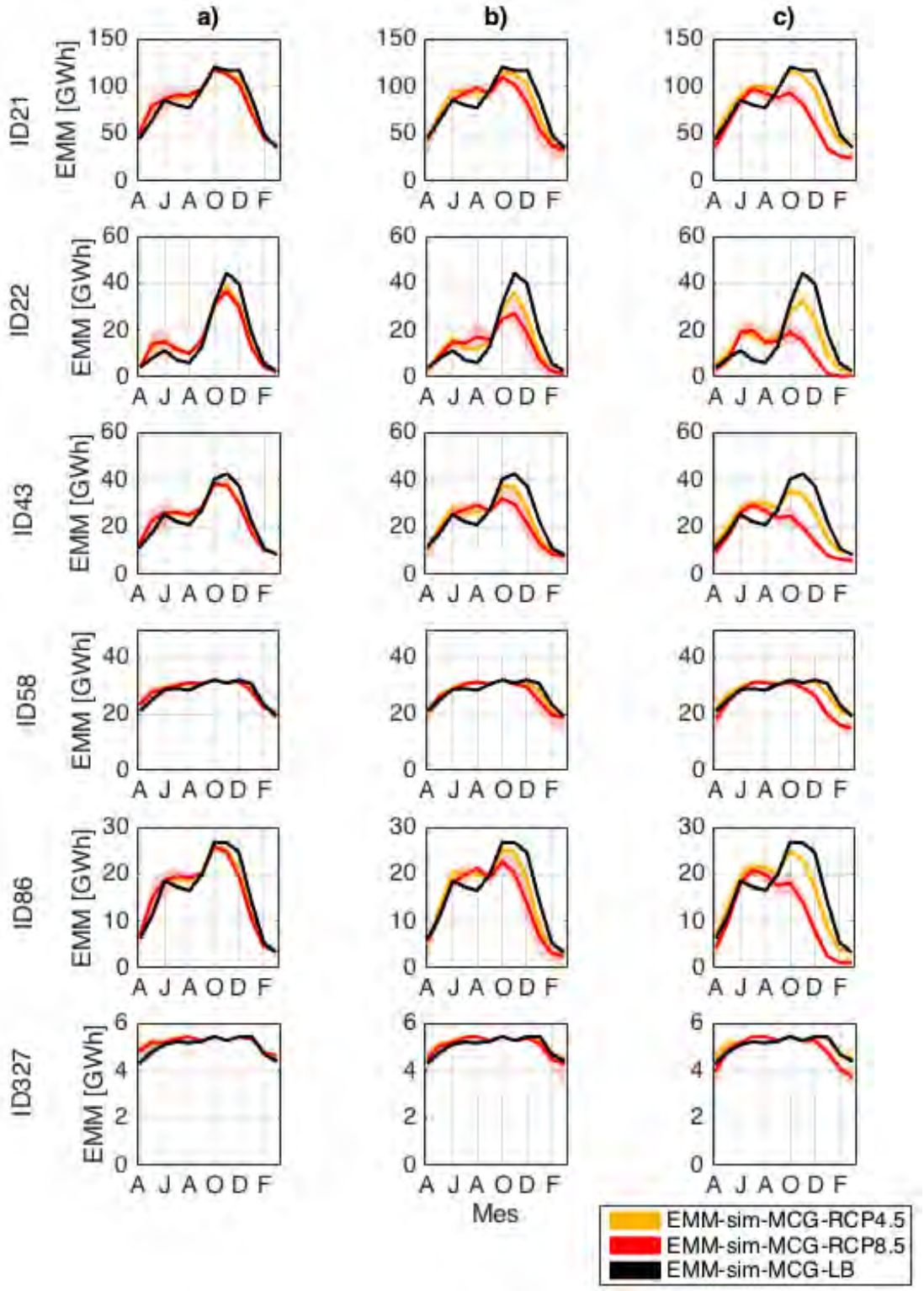


Figura 7.72. Comparación de los ensambles de energía bruta media mensual de distintas centrales potenciales en Melado, simulada en línea base (EMM-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (EMM-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (EMM-sim-MCG-RCP8.5), en las distintas ventanas futuras. La información se divide en a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3: 2069-2099. La sombra denota el rango de variación entre los máximos y mínimos del ensamble de MCG. Fuente: Elaboración propia.

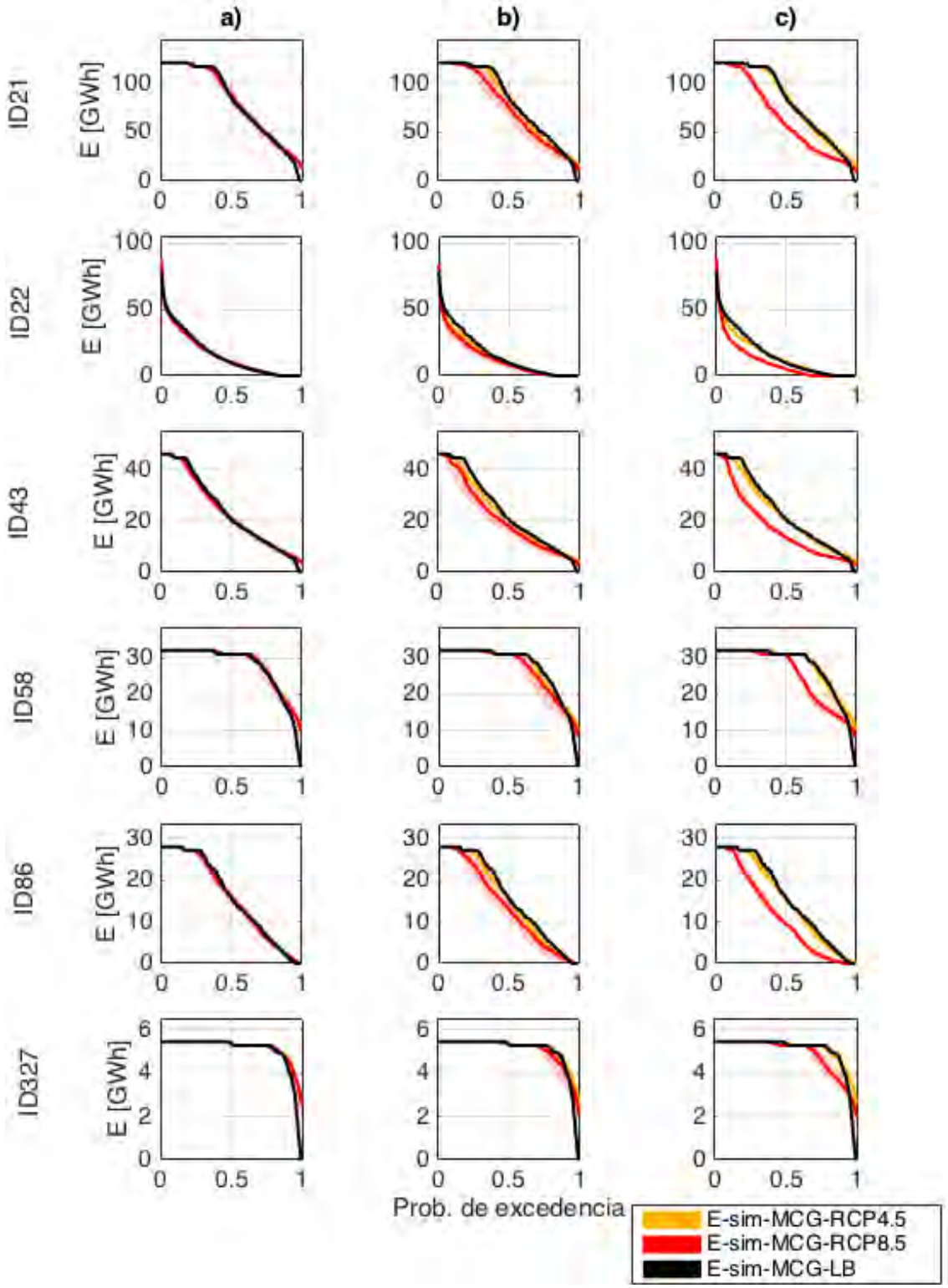


Figura 7.73. Comparación del ensamble de curvas de duración de energía bruta mensual de distintas centrales potenciales en Melado, simulada en línea base (E-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (E-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (E-sim-MCG- RCP8.5), en las distintas ventanas futuras. La información se divide en a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3: 2069-2099. La sombra denota el rango de variación entre los máximos y mínimos del ensamble de MCG. Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 7.74** presenta el ensamble de las curvas de variación estacional en el RCP4.5, mientras que la **Figura 7.75** presenta los resultados asociados al RCP8.5. Como se aprecia en los ID con estacionalidad dominante de deshielos, es posible observar un desplazamiento de la mayor generación hacia la temporada invernal en el largo plazo (VF3) y en ambos RCP. La separación de resultados por RCP y por probabilidad de excedencia permite apreciar con mayor detalle los cambios a futuros obtenidos en la **Figura 7.72**. Por ejemplo, se aprecia que la generación con probabilidades de excedencia menores a un 50% son las más afectadas, siendo el RCP8.5 el escenario más severo, especialmente para los ID que presentan un caudal de diseño más sobredimensionado.

En la **Tabla 7.35** se resumen los promedios por periodo y porcentajes de variación del ensamble de la energía total anual promedio generada en cada ID, para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5. Se incluye además la variación del caudal medio anual promedio y de la precipitación total anual promedio en la cuenca, en el mismo periodo. En la **Tabla 7.36** se presentan los mismos resultados para el escenario RCP8.5.

Como se aprecia, los caudales medio anuales promedio en ID58 e ID327 disminuyen en el escenario RCP4.5, sin embargo, la energía potencial producida inclusive podría aumentar. Cabe señalar que para el cálculo de la energía producida se emplea el caudal medio mensual, el cual se asume constante durante todos los días del mes. Debido a que algunos meses tienen 30 días y otros 31, el desplazamiento del caudal máximo debido al cambio climático produce como resultado el aumento de la capacidad de generación. En términos generales, estos puntos de generación no serían afectados por el cambio climático proyectado en el escenario RCP4.5, mientras que en el escenario RCP8.5 la disminución en la generación es porcentualmente mucho menor que la reducción proyectada en los caudales. En los demás puntos, la reducción en la generación hidroeléctrica es proporcionalmente mayor que la disminución de los caudales, salvo en ID21.

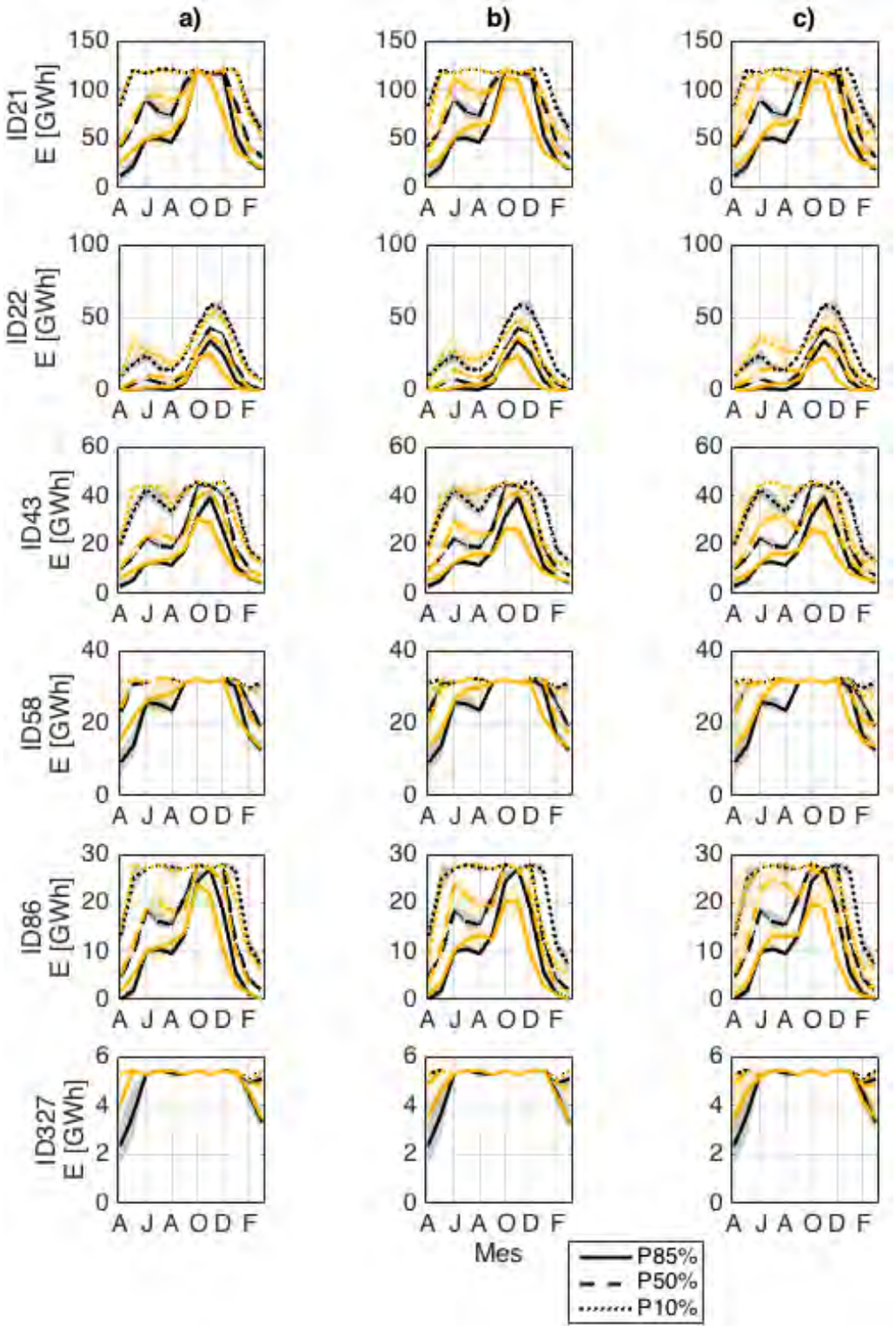


Figura 7.74. Curvas de variación estacional del ensamble de la energía bruta mensual de distintas centrales potenciales en Melado. Se presentan las probabilidades de excedencia de 10, 50 y 85%. En negro se muestran los caudales simulados en línea base y en naranjo se presenta el RCP4.5. La información se divide en: a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3:2069-2099. Cada fila representa un punto (ID) diferente. Fuente: Elaboración propia.

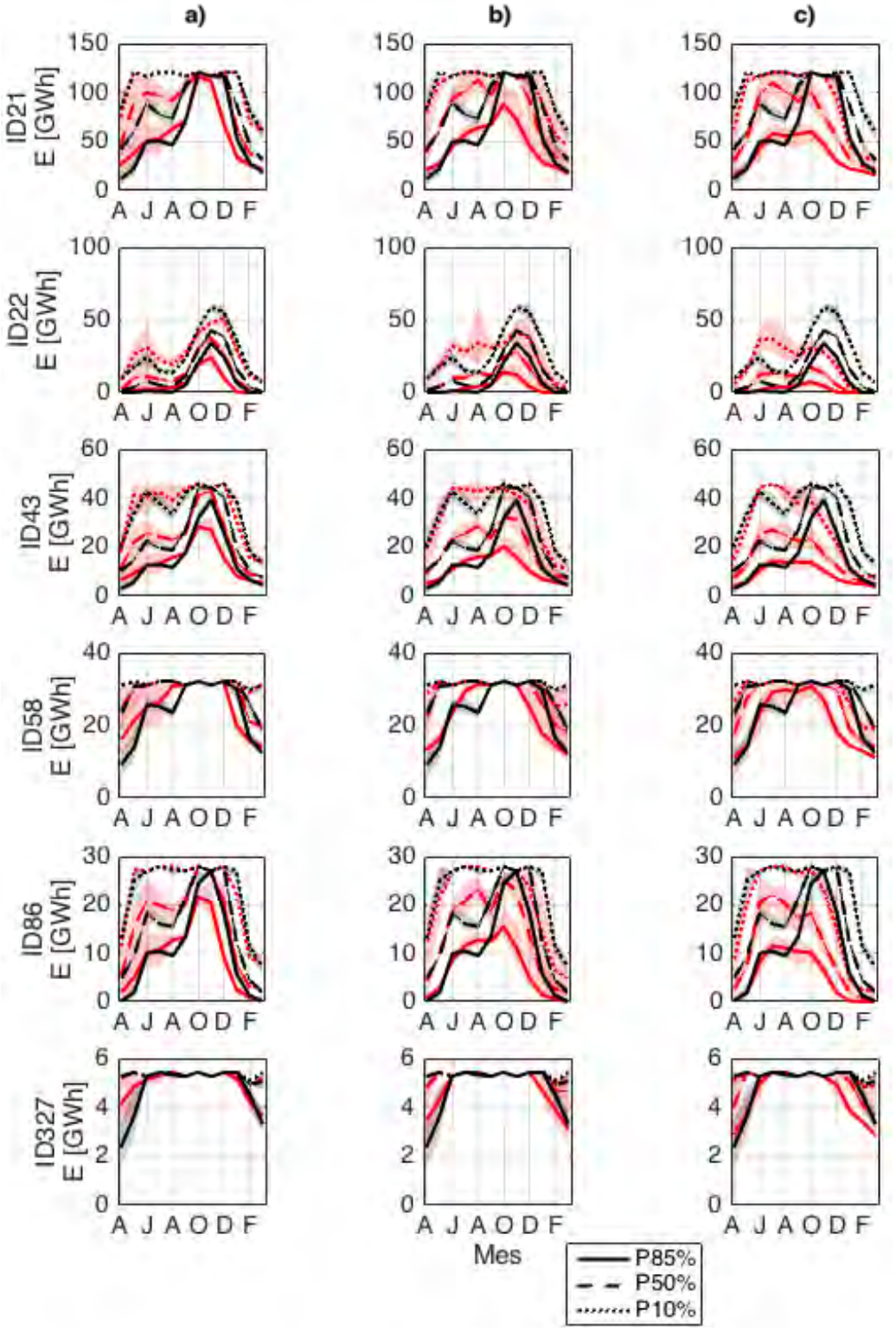


Figura 7.75. Curvas de variación estacional del ensamble de la energía bruta mensual de distintas centrales potenciales en Melado. Se presentan las probabilidades de excedencia de 10, 50 y 85%. En negro se muestran los caudales simulados en línea base y en rojo se presenta el RCP8.5. La información se divide en: a) VF1: Periodo 2009-2039, b) VF2: 2039-2069 y c) VF3:2069-2099. Cada fila representa un punto (ID) diferente. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.35. Resumen del ensamble de energía potencial en Melado. Energía anual promedio, caudal medio anual promedio y precipitación anual promedio. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP4.5. Fuente: Elaboración propia.

ID	Ventana	Periodo	Escenario RCP4.5					
			Energía Anual Promedio		Q		PP	
			[GWh]	[%]	[m^3/s]	[%]	[mm]	[%]
21	LB	1976-2005	972	0,0	105,0	0,0	2587	0,0
	VF1	2009-2039	984	1,2	105,8	0,7	2491	-3,7
	VF2	2039-2069	957	-1,5	100,5	-4,3	2368	-8,5
	VF3	2069-2099	973	0,1	103,3	-1,7	2453	-5,2
22	LB	1976-2005	193	0,0	24,0	0,0	2587	0,0
	VF1	2009-2039	191	-1,1	24,2	0,7	2491	-3,7
	VF2	2039-2069	174	-9,5	23,0	-4,4	2368	-8,5
	VF3	2069-2099	184	-4,5	23,6	-1,8	2453	-5,2
43	LB	1976-2005	286	0,0	76,7	0,0	2587	0,0
	VF1	2009-2039	284	-0,4	77,2	0,7	2491	-3,7
	VF2	2039-2069	273	-4,3	73,4	-4,3	2368	-8,5
	VF3	2069-2099	277	-3,0	75,4	-1,6	2453	-5,2
58	LB	1976-2005	332	0,0	35,6	0,0	2587	0,0
	VF1	2009-2039	341	2,5	35,8	0,6	2491	-3,7
	VF2	2039-2069	333	0,2	34,0	-4,4	2368	-8,5
	VF3	2069-2099	336	1,1	35,0	-1,7	2453	-5,2
86	LB	1976-2005	191	0,0	111,4	0,0	2587	0,0
	VF1	2009-2039	189	-0,8	112,3	0,8	2491	-3,7
	VF2	2039-2069	182	-4,6	106,2	-4,7	2368	-8,5
	VF3	2069-2099	184	-3,7	109,4	-1,8	2453	-5,2
327	LB	1976-2005	60,4	0,0	24,6	0,0	2587	0,0
	VF1	2009-2039	62,2	3,0	24,7	0,6	2491	-3,7
	VF2	2039-2069	61,6	2,0	23,5	-4,4	2368	-8,5
	VF3	2069-2099	61,6	2,0	24,1	-1,8	2453	-5,2

Tabla 7.36. Resumen del ensamble de energía potencial en Melado. Energía anual promedio, caudal medio anual promedio y precipitación anual promedio. Porcentajes de variación para las distintas ventanas en el escenario RCP8.5. Fuente: Elaboración propia.

ID	Ventana	Periodo	Escenario RCP8.5					
			Energía Anual Promedio		Q		PP	
			[GWh]	[%]	[m^3/s]	[%]	[mm]	[%]
21	LB	1976-2005	972	0,0	105,0	0,0	2587	0,0
	VF1	2009-2039	979	0,7	104,1	-0,8	2446	-5,4
	VF2	2039-2069	895	-7,9	94,2	-10,3	2250	-13,0
	VF3	2069-2099	776	-20,2	83,0	-20,9	1995	-22,9
22	LB	1976-2005	193	0,0	24,0	0,0	2587	0,0
	VF1	2009-2039	187	-3,0	23,8	-0,9	2446	-5,4
	VF2	2039-2069	157	-18,3	21,5	-10,4	2250	-13,0
	VF3	2069-2099	126	-34,9	19,0	-20,8	1995	-22,9
43	LB	1976-2005	286	0,0	76,7	0,0	2587	0,0
	VF1	2009-2039	283	-1,1	76,0	-0,8	2446	-5,4
	VF2	2039-2069	251	-12,2	68,8	-10,3	2250	-13,0
	VF3	2069-2099	210	-26,5	60,6	-20,9	1995	-22,9
58	LB	1976-2005	332	0,0	35,6	0,0	2587	0,0
	VF1	2009-2039	338	1,8	35,3	-0,9	2446	-5,4
	VF2	2039-2069	324	-2,3	31,9	-10,3	2250	-13,0
	VF3	2069-2099	303	-8,8	28,2	-20,9	1995	-22,9
86	LB	1976-2005	191	0,0	111,4	0,0	2587	0,0
	VF1	2009-2039	188	-1,4	110,4	-0,9	2446	-5,4
	VF2	2039-2069	165	-13,5	98,9	-11,3	2250	-13,0
	VF3	2069-2099	136	-28,9	85,9	-22,9	1995	-22,9
327	LB	1976-2005	60,4	0,0	24,6	0,0	2587	0,0
	VF1	2009-2039	61,9	2,6	24,4	-0,9	2446	-5,4
	VF2	2039-2069	60,6	0,5	22,0	-10,4	2250	-13,0
	VF3	2069-2099	58,6	-3,0	19,5	-20,8	1995	-22,9

8 ANÁLISIS DE IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

8.1 Disponibilidad Hídrica

La disponibilidad de recursos hídricos es analizada empleando tres criterios principales, los cuales se detallan a continuación:

i. **Estacionalidad**: Se analiza el régimen hidrológico de caudales en línea base y su evolución en el futuro. Esto permite indicar como cambiarán en el futuro los meses del año en que se contará con recursos hídricos para las distintas actividades productivas.

ii. **Variabilidad**: Se analiza como varían los montos del caudal medio mensual, para distintas probabilidades de excedencia, entre los periodos de línea base y ventanas futuras. Debido a que los derechos de aprovechamiento de agua se entregan empleando un criterio de probabilidad de excedencia, esto permite estudiar como cambiará en el futuro la disponibilidad hídrica para los titulares de derechos.

iii. **Acumulación nival y escorrentía**: Se analiza la variación del SWE total mensual y máximo, junto con los cambios proyectados en los caudales, como indicadores de la capacidad de acumulación de nieve de las subcuencas y de generación de escorrentía, entre los periodos de línea base y ventanas futuras. Considerando que la acumulación de nieve funciona como un embalse natural de agua para las temporadas de primavera y verano, esto permite evaluar la evolución futura de la capacidad de almacenamiento natural de las subcuencas y su efecto sobre la escorrentía superficial.

8.1.1 Estacionalidad

En todas las subcuencas modeladas se proyectan disminuciones de los caudales medios mensuales promedio en las 3 ventanas futuras de análisis, respecto a línea base. Como es esperable, el escenario RCP8.5 es el más severo en el mediano (VF2) y largo plazo (VF3), sin embargo, en el corto plazo (VF1) no se observan diferencias significativas entre ambos escenarios evaluados.

En cuanto a las subcuencas, se observan dos tipos de respuesta bajo el RCP8.5, los cuales se indican a continuación:

1. Melado, Invernada y Claro+Garzas muestran disminuciones de los caudales de deshielo y aumentos de los caudales de invierno en el corto plazo (VF1). En el mediano (VF2) y largo plazo (VF3) esta tendencia se fortalece, es decir, en el futuro la componente pluvial del caudal aumentará su relevancia respecto a la componente de deshielos, con una caída generalizada de los flujos base y un retraso de los máximos invernales a partir de la VF2. En Melado el régimen hidrológico cambia de un régimen nivo-pluvial a uno pluvio-nival; en Claro+Garzas el régimen hidrológico cambia de pluvio-nival a pluvial; en Invernada el régimen hidrológico cambia de nival a nivo-pluvial.

2. Maule muestra un comportamiento diferente, con una disminución importante de caudales invernales en el corto plazo, tendencia que se fortalece en el mediano y largo plazo. La disminución de los deshielos es menos pronunciada en el corto plazo, aumentando paulatinamente en el futuro. El régimen hidrológico de Maule cambia de un régimen nivo-pluvial a uno nival, proyectándose además el adelantamiento de la escorrentía máxima de deshielo en la VF3.

En todos los casos analizados, el escenario RCP8.5 proyecta una disminución importante o la desaparición casi completa de la escorrentía de deshielo en la VF3, lo que indica que a futuro se espera un área nival mucho menor a la actual.

8.1.2 Variabilidad

Ambos escenarios indican la disminución de los caudales medios mensuales en todas las subcuencas, aunque el RCP 4.5 proyecta una estabilización de esta disminución entre el mediano (VF2) y largo plazo (VF3). El escenario RCP8.5 proyecta el fortalecimiento de esta tendencia a la disminución futura de los caudales.

La excepción se observa en las subcuencas de Melado y Claro+Garzas, cuyas componentes pluviales son relevantes en la línea base. En estos sistemas se proyecta un aumento de la magnitud de los caudales máximos, es decir, para probabilidades de excedencia menores a un 5% en Melado y un 20% en Claro+Garzas.

En términos generales, para una misma probabilidad de excedencia se tendrán caudales menores en el futuro, especialmente en aquellas cuencas donde la componente nival de los caudales es más relevante. En aquellas cuencas donde la componente pluvial sea relevante, también se tendrá una disminución de los caudales, salvo en meses con magnitudes importantes de precipitación, en las cuales se proyectan aumentos de magnitud que podrían estar asociados al aumento de la elevación de la línea de nieves.

Una consecuencia de los cambios proyectados se puede apreciar en los derechos de aprovechamiento de aguas. Aquellos derechos asociados actualmente a caudales de probabilidades de excedencia de un 85% serán equivalentes a caudales de probabilidad menor en el futuro, siendo las cuencas nivales las más afectadas. Por ejemplo, en términos aproximados se estima en Melado que el mismo caudal asociado a Q85% en la actualidad será equivalente a Q65% en VF3, mientras que en Invernada el Q85% será equivalente a Q55%. Esto significa que cualquier proyecto diseñado en la actualidad para Q85%, en el futuro verá una reducción de su producción debido a la menor recurrencia de dichos caudales. Además, el grado de afectación dependerá del régimen hidrológico existente en su punto de captación.

8.1.3 Acumulación Nival y Escorrentía

Aunque los impactos en la capacidad de acumulación de nieve varían entre las subcuencas, debido a las diferencias en el porcentaje de área nival y sus distintas elevaciones medias, en todos los escenarios y subcuencas se aprecia una estrecha relación entre el aumento de temperaturas y el porcentaje de disminución del SWE máximo. Mientras mayor es el aumento de temperaturas, se observa una menor capacidad de acumulación de nieve, lo

cual se relacionaría con el desplazamiento altitudinal de la línea de nieves hacia cotas mayores.

Otro aspecto transversal a todas las subcuencas es la importante disminución en la capacidad de acumulación nival que se observa en el corto plazo (VF1) y una elevada variabilidad de esta acumulación en la VF2 (RCP8.5), al igual que en el caso de los caudales. A excepción de Maule, SWE demuestra ser una variable más sensible que el caudal para evaluar los impactos del cambio climático en el corto plazo.

En términos del indicador SWE máximo, por subcuenca y en el escenario RCP8.5 se proyectan las siguientes reducciones porcentuales respecto a línea base:

- **Melado**: de -25% en VF1 a -70% en VF3.
- **Invernada**: de -17% en VF1 a -56% en VF3.
- **Maule**: de -15% en VF1 a -51% en VF3.
- **Claro**: de -25% en VF1 a -70% en VF3.
- **Garzas**: de -40% en VF1 a -86% en VF3.

Se debe notar que Invernada y Maule poseen una elevación media similar entre sí, al igual que ocurre entre Melado y Claro, lo cual es consecuente con los porcentajes de disminución proyectados en cada caso. Garzas es la cuenca de menor elevación media, lo cual es consistente con el mayor impacto proyectado en su capacidad de acumulación de nieve.

Para apreciar el impacto de esta menor acumulación nival en la escorrentía superficial, se realiza el mismo ejercicio para el caudal. Se tienen las siguientes reducciones porcentuales del caudal medio anual respecto a línea base, por subcuenca y en el escenario RCP8.5:

- **Melado**: de -1% en VF1 a -23% en VF3.
- **Invernada**: de -6% en VF1 a -32% en VF3.
- **Maule**: de -26% en VF1 a -51% en VF3.
- **Claro+Garzas**: de -5% en VF1 a -32% en VF3.

De este resumen se puede destacar que Melado es el sistema menos afectado y enfatizar la similitud entre las disminuciones de caudal proyectadas en Invernada y Claro+Garzas, pese a la proporción 2:1 de sus respectivas áreas totales. También se aprecia el importante descenso del caudal en Maule, en el corto (VF1) y largo plazo (VF3), respecto a las demás subcuencas.

La similitud de las proyecciones en Invernada y Claro+Garzas podría deberse a que comparten el mismo gradiente de precipitaciones (-0,003 mm/m). Por otra parte, Melado muestra una disminución menor de caudales, en consecuencia con su mayor gradiente (0,14

mm/m). Pese a que el gradiente de Maule (0,098 mm/m) es mayor que el de Invernada, las disminuciones proyectadas de sus caudales difiere en forma importante, lo cual indica que el gradiente no sería el factor determinante en el comportamiento de Maule.

Desde la perspectiva de los gradientes de precipitación se esperaría que la disminución de los caudales en Maule fuera menos pronunciada que en Invernada, considerando además la similitud entre sus elevaciones. Esta discrepancia con lo esperado podría deberse a que Invernada posee un 17% de su área (142 km^2) bajo su línea de nieves promedio, mientras que el 100% del área de Maule (249 km^2) se encuentra sobre su línea de nieves promedio.

Tendiendo en cuenta que las cotas inferiores de Invernada y Maule son de 1.285 [msnm] y 2.121 [msnm], respectivamente, así como los resultados del análisis estacional, es posible que el aporte pluvial observado en Invernada sea el responsable principal de atenuar la disminución futura de sus caudales. Al contrario, la escasa relevancia de la componente pluvial en Maule implica que gran parte del impacto futuro observado en el SWE máximo se relacione directamente con la disminución de los caudales.

De ser así, estos resultados confirmarían que el mayor impacto del cambio climático se espera en la escorrentía de deshielos, producto del alza en las temperaturas. La disminución en las precipitaciones también tendrán un efecto importante en los caudales, pero este será porcentualmente más atenuado que el impacto proyectado debido a la reducción de la acumulación nival.

8.2 Generación Hidroeléctrica

Los impactos del cambio climático en la generación hidroeléctrica son analizados desde dos perspectivas: la capacidad instalada de generación y la capacidad potencial de generación.

8.2.1 Capacidad Instalada

Debido al uso de relaciones mensuales no lineales entre el caudal total de Maule Alto y la generación de las centrales convencionales de pasada y embalse existentes, los impactos proyectados en la generación hidroeléctrica por ventana futura son del mismo orden de magnitud de los impactos proyectados en los caudales. Por ejemplo, en el escenario RCP8.5 se proyectan las siguientes reducciones de la energía anual promedio en Maule Alto (entre paréntesis se indica la disminución del caudal medio anual total):

- VF1: -4% (-4%)
- VF2: -12% (-12%)
- VF3: -21% (-27%)

La ventaja de un análisis agregado de las subcuencas es que permite tener un diagnóstico general del sistema Maule Alto, lo cual permite a su vez realizar estimaciones a nivel nacional. Las reducciones porcentuales de la energía anual promedio en Maule Alto pueden ser utilizadas sobre la producción hidroelétrica completa del SIC, con el fin de obtener

estimaciones gruesas y rápidas del impacto del cambio climático en la capacidad instalada hidroeléctrica del país. En la **Figura 8.1** se presentan gráficamente los impactos proyectados bajo los dos escenarios RCP evaluados.

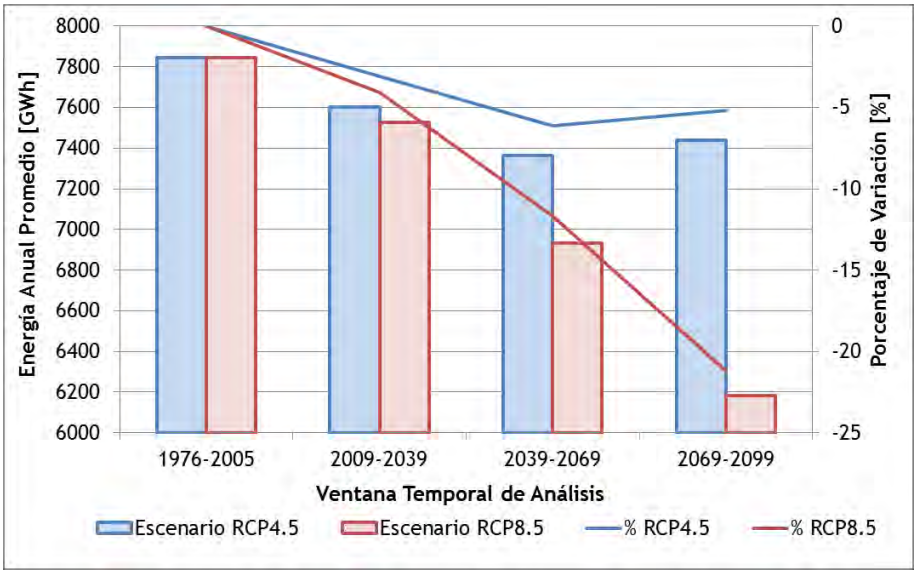


Figura 8.1. Impactos proyectados en la generación de energía de Maule Alto, para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, en las distintas ventanas futuras. La información presenta en términos de energía anual promedio [GWh] y variación porcentual respecto a la línea base (1976-2005). Fuente: Elaboración propia.

Desde el punto de vista de la estacionalidad de la generación hidroelétrica, Maule Alto presenta en línea base su máxima producción entre octubre y diciembre, con un segundo máximo en julio. Esta estacionalidad se asemeja al régimen hidrológico de Melado (nivo-pluvial), lo cual podría deberse a que el caudal de Melado representa más del 50% del caudal total del sistema.

En forma similar a la disminución futura de los caudales de deshielo y al cambio del régimen hidrológico de Melado, la producción hidroelétrica futura no solo disminuirá, sino que su máxima producción del año pasará de octubre a julio en el escenario RCP8.5, dando cuenta de la menor capacidad natural de las cuencas de acumular nieve para su derretimiento en primavera. En el escenario RCP4.5 se tendrá un régimen mixto de producción hidroelétrica, con dos máximos en el año (julio y octubre), siendo la reducción en primavera la principal responsable de la menor generación de energía del sistema completo.

En términos probabilísticos, los impactos del cambio cambio climático en la generación hidroeléctrica (capacidad instalada) serán similares a los impactos en el caudal. Si denominamos E85% a la producción de energía mensual con un 85% de probabilidad de excedencia, es posible analizar gráficamente en la **Figura 8.2** la variación futura de la probabilidad de una misma producción de energía.

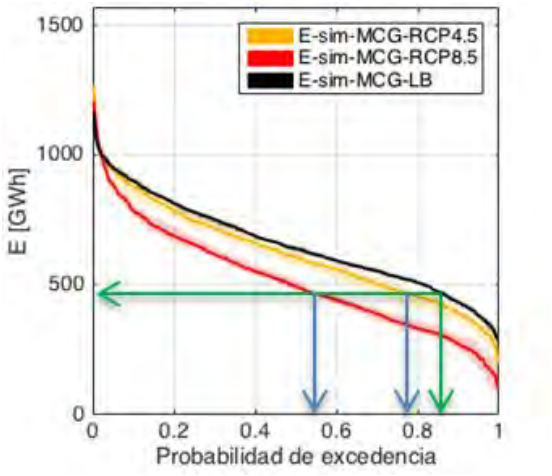


Figura 8.2. Comparación de las curvas de duración de energía bruta mensual de Maule Alto en VF3: 2069-2099, simulada en línea base (E-sim-MCG-LB) y para los escenarios RCP4.5 (E-sim-MCG-RCP4.5) y RCP8.5 (E-sim-MCG-RCP8.5). Fuente: Elaboración propia.

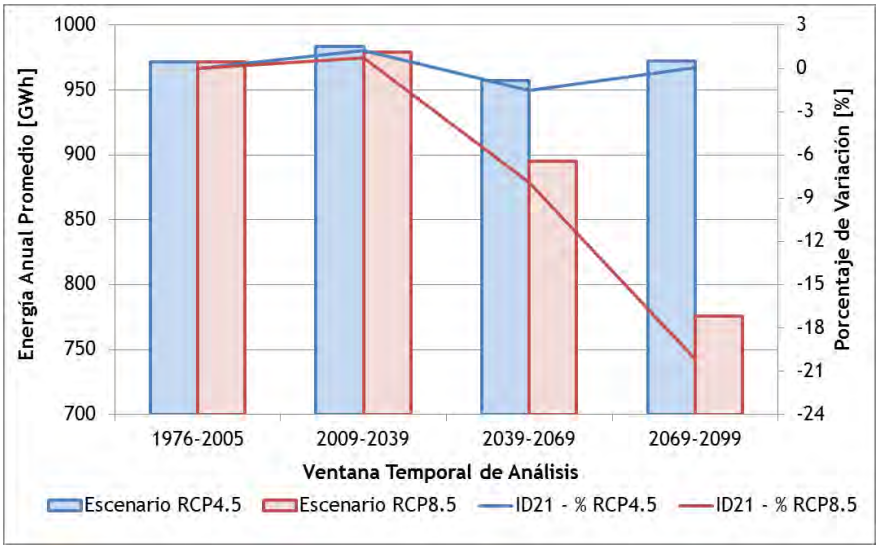
- En el escenario RCP4.5 se espera una reducción aproximada de la probabilidad de excedencia de un 7% entre línea base y VF3, es decir, se tendrá que E85% en línea base será equivalente a E78% en el futuro.
- En el escenario RCP8.5 se espera una reducción aproximada de la probabilidad de excedencia de un 30% entre línea base y VF3, es decir, se tendrá que E85% en línea base será equivalente a E55% en el futuro.

8.2.2 Capacidad Potencial

La posibilidad de obtener la energía producida por una central hidroeléctrica potencial, considerando aspectos como el caudal de diseño y restricciones asociadas a un caudal ecológico ha significado un ejercicio fundamental para comprender y/o reforzar otros aspectos del impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica y disponibilidad hídrica. Además, estas lecciones son extrapolables a otras zonas de Chile, donde la escorrentía de deshielos sea relevante para la producción de energía.

Mediante el análisis de los puntos ID21 e ID22 es posible concluir que el mayor impacto del cambio climático se observará más pronto y más severamente en aquellas cuencas que dependen principalmente de los deshielos para su producción hidroelétrica. Estos puntos de captación potencial se caracterizan por tener caudales y alturas de caída similares, pero con áreas de captación en una proporción de 4,5:1, respectivamente. Debido a la mayor elevación de la captación de ID22, su área total es menor que en ID21 y su área nival es proporcionalmente más relevante también. Una inspección visual de la energía media mensual máxima en ambos puntos, para la VF3, muestra una disminución aproximada de 120 a 95 GWh en ID21 y de 45 a 20 GWh en ID22, en el caso del escenario RCP8.5. Porcentualmente, estas diferencias en la VF3 son de 21% y 56% respectivamente. En la **Figura 8.3** se presentan gráficamente los impactos proyectados en estos puntos en términos de energía anual promedio, en ambos escenarios RCP. Como se aprecia, la disminución en la capacidad de generación es más pronunciada en ID22 (**Figura 8.3b**), en ambos escenarios.

a)



b)

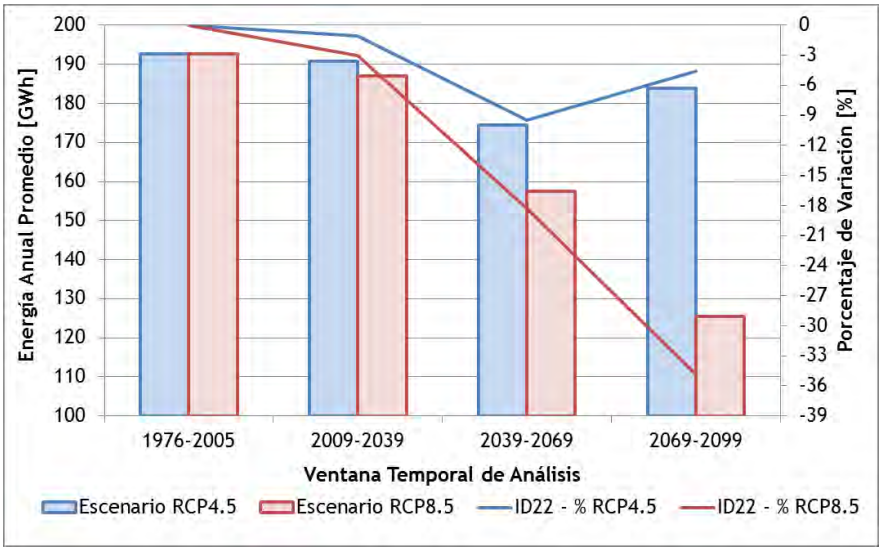


Figura 8.3. Impactos proyectados en la generación de energía de los puntos ID21 (a) e ID22 (b), para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, en las distintas ventanas futuras. La información presenta en términos de energía anual promedio [GWh] y variación porcentual respecto a la línea base (1976-2005). Fuente: Elaboración propia.

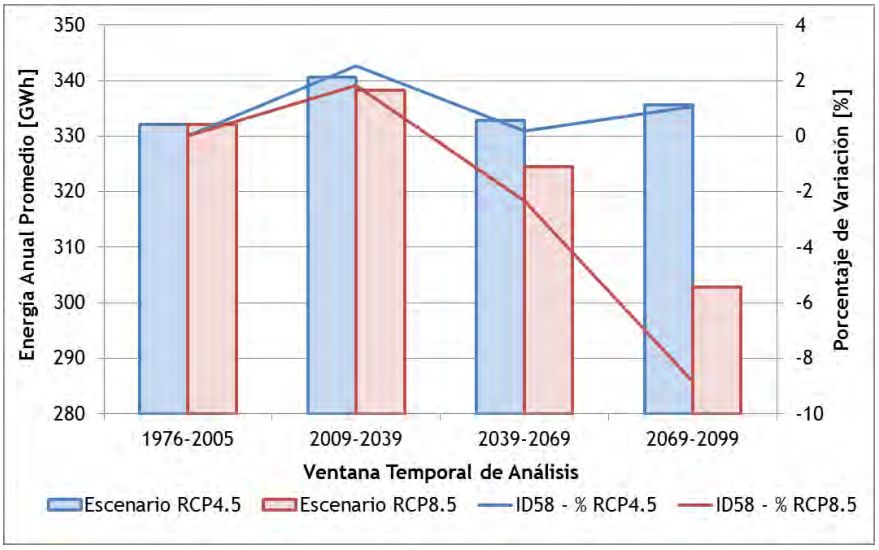
Estos resultados ayudan a explicar además la importante disminución de caudales observada en Maule, respecto a la reducción en Invernada. Tal como se especuló en el análisis de acumulación nival y escorrentía, el análisis de los puntos ID21 e ID22 también señala que el mayor impacto del cambio climático se espera en escorrentía de deshielos, lo cual sería producto del alza en las temperaturas. La disminución en las precipitaciones también tendrán un efecto importante en los caudales, pero este será porcentualmente más atenuado que el impacto proyectado debido a la reducción de la acumulación nival.

Un impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica que no es posible detectar mediante el estudio de la capacidad instalada se relaciona con la resiliencia de las

centrales hidroelétricas ante cambios futuros en la disponibilidad de agua. Mediante el análisis de las curvas de duración de los puntos ID58 e ID327, es posible concluir que a mayor probabilidad (en línea base) de alcanzar la generación máxima diseñada, mayor será la probabilidad futura de no quedar sobredimensionada.

En la **Figura 8.4** se presentan gráficamente los impactos proyectados en ID58 e ID327, en términos de energía anual promedio, en ambos escenarios RCP. Como se aprecia, el porcentaje de variación en ambos escenarios es mucho menor que en el caso de ID21 e ID22. Pese a que ambas cuencas (ID58 e ID327) se encuentran a una elevación similar a ID22, su menor porcentaje de afectación está dado por el menor caudal de diseño, respecto a la disponibilidad actual de la cuenca. En este sentido, es posible observar que ID22 posee una sobreestimación importante del caudal de diseño en línea base, pues su curva de duración de energía mensual indica que no hay probabilidades de alcanzar su máxima capacidad de generación. Por lo tanto, para cualquier probabilidad de excedencia se tendrá una disminución futura de la capacidad de generación, con lo cual la central se verá aún más sobredimensionada que en la actualidad.

a)



b)

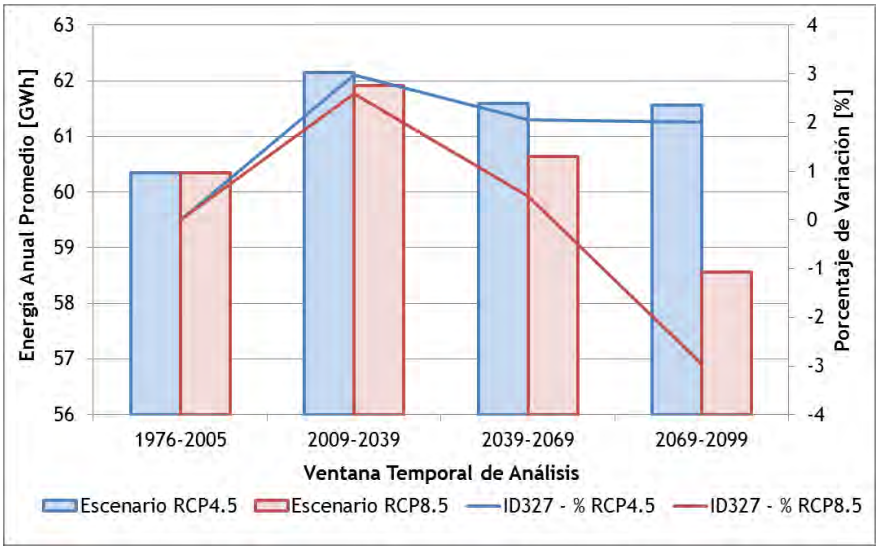


Figura 8.4. Impactos proyectados en la generación de energía de los puntos ID58 (a) e ID327 (b), para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, en las distintas ventanas futuras. La información presenta en términos de energía anual promedio [GWh] y variación porcentual respecto a la línea base (1976-2005). Fuente: Elaboración propia.

8.3 Otros Impactos

8.3.1 Impactos en la Productividad

El análisis de la disponibilidad hídrica, del uso de suelos y de la caracterización productiva de la región del Maule permite proyectar importantes impactos futuros en la producción silvoagropecuaria. Por una parte, existirá cada vez menos agua durante la primavera para el riego de los cultivos que se realizan en el valle central de la cuenca del río Maule. Si las temperaturas continúan aumentando al ritmo proyectado por el escenario RCP8.5, la

acumulación nival será insuficiente para proveer agua para el riego durante la temporada más relevante del sector agrícola.

Del mismo modo, la productividad del sector forestal también se verá afectado por la disminución proyectada en las precipitaciones.

Producto de la menor escorrentía superficial y el aumento de las temperaturas, la actividad turística podría verse afectada en forma importante, con el consecuente efecto en el desempleo que esto generaría.

Desde el punto de vistas de las competencias entre los sectores productivos más relevantes, se pueden esperar aumentos de los conflictos, especialmente entre los sectores:

- **Hidroelétrico y Agrícola**: los conflictos actuales por los recursos de la laguna del Maule se podrían ver incrementados en el futuro, debido a su menor capacidad de almacenamiento por la menor acumulación nival. También se deberá tener atención al uso de los recursos hídricos asociados al trasvase Melado-Ancoa, debido al aumento del interés por generar hidroelectricidad y su uso para riego.
- **Forestal y Agrícola-Hidroeléctrico**: el crecimiento de los monocultivos forestales en la precordillera del Maule podrían incrementar los impactos en la disponibilidad de agua hacia aguas abajo, donde se ubican la mayoría de los terrenos agrícolas de la región y donde recientemente se han ubicado minicentrales hidroeléctricas (San Clemente y Lircay). Como lo demuestran algunos estudios, el incremento de la superficie ocupada por *Eucalyptus spp*. y *Pinus radiata* puede significar descensos importantes de la escorrentía superfical, respecto a igual superficie ocupada por bosque nativo [Lara *et al*., 2009; Little *et al*., 2009].

8.3.2 Impactos debido a un mayor riesgo hidrometeorológico

Los resultados obtenidos proyectan cambios en estacionalidad de la disponibilidad de recursos hídricos de alta montaña. Por ejemplo, debido al alza de temperaturas se espera en algunos casos un adelanto de los caudales máximos de verano, debido al derretimiento adelantado de la masa de nieve acumulada.

Es posible que la reducción de precipitaciones observada en los MCG también contribuya al adelantamiento de los caudales de deshielo, debido al menor contenido de frío del manto nival (definido como la cantidad de energía necesaria para llevar la nieve a su punto de derretimiento).

Por otra parte, los caudales de invierno también muestran un aumento, posiblemente debido a eventos de derretimiento de nieve ocurridos durante el invierno y/o a la elevación de la línea de nieves promedio. Estos eventos aumentarán en el futuro debido al alza de temperaturas pronosticada por los MCG.

El alza de temperaturas invernales resulta en una partición líquida/sólida de la precipitación distinta a la del clima presente, con un aumento de la magnitud de los eventos de precipitación líquida. Estos eventos, además de incidir negativamente en la

acumulación de nieve, tienen el riesgo asociado a crecidas y aluviones, debido a la ocurrencia de lluvia sobre la nieve, y a que se producirán en zonas de alta pendiente.

Estos riesgos hidrometeorológicos deberán tenerse en cuenta especialmente en el diseño de evacuadores de crecidas en futuras centrales de embalse y en el riesgo a la vida de las personas que habitan y/o trabajan cerca de las actuales zonas de inundación de los ríos.

8.3.3 Impactos en la Sociedad

Además de los impactos económicos que se esperarían debido al cambio climático proyectado por los MCG, se deben considerar los impactos sociales que se pueden producir a futuro, especialmente en el escenario RCP8.5.

En un contexto de menores precipitaciones y menores recargas de los acuíferos, se espera el aumento de enfermedades ligadas al menor acceso al agua potable en zonas rurales, impactos en la salud mental de las personas, entre otras consecuencias analizadas en estudios previos realizados en Chile [CUCCG, 2011].

9 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Los resultados de este informe están basados en una serie de supuestos relacionados a la información meteorológica, modelos hidrológicos, MCGs y proyección de climas futuros, los cuales han sido señalados en el desarrollo del estudio.

Estos supuestos son comunes a cualquier ejercicio de modelación hidrológica y proyección de climas futuros donde existen limitaciones de información. Por ejemplo, la información meteorológica más completa que se encuentra disponible en la zona de estudio está limitada a dos estaciones, ubicadas en cotas inferiores a las subcuencas analizadas. Para suplir la falta de estaciones en las cabeceras del río Maule se debieron estimar gradientes de variación de la precipitación y la temperatura. Idealmente se deben emplear campos distribuidos de datos meteorológicos observados, lo que en la práctica resulta imposible de obtener para zonas que no tienen densidad de estaciones suficientes, en cuyo caso la generación de gradientes de variación es una práctica habitual.

Paradójicamente, las mismas características montañosas que favorecen la generación hidroeléctrica en el Maule Alto y en otras cuencas relevantes del país son las que dificultan su monitoreo hidrometeorológico. Sumado a las limitaciones que la topografía impone al monitoreo, es común que en estas zonas de montaña exista variabilidad espacial significativa de la precipitación y la temperatura, la cual es difícil de capturar a menos que se utilicen métodos más avanzados de monitoreo.

Esta primera limitación de información meteorológica resulta en que muchas veces se obtengan simulaciones de caudal que no son representativas de las condiciones observadas, limitando la capacidad de los modelos hidrológicos utilizados.

Los modelos hidrológicos calibrados y validados en este estudio muestran una adecuada representación de las condiciones observadas. Esta conclusión se basa en los indicadores de ajuste obtenidos, los cuales validan la información meteorológica de entrada y los supuestos adoptados. Es importante aclarar que un análisis más detallado de la incerteza inherente en la extrapolación meteorológica es deseable en este tipo de aplicaciones, sin embargo dicho análisis presenta complejidades que escapan a los alcances de este estudio.

Otro supuesto importante está relacionado a la representatividad de los MCG respecto a las variaciones climáticas futuras y el proceso de escalamiento temporal. La base del escalamiento temporal la constituyen las relaciones lineales encontradas entre los valores observados en las estaciones meteorológicas y los valores interpolados de la grilla de MCG. En esta aplicación se asume que dichas relaciones se mantienen en el futuro, lo que no necesariamente es así. Por ejemplo, los patrones meteorológicos podrían cambiar en las escalas espaciales del análisis realizado, alterando las relaciones entre el clima de la grilla de MCG y el clima en las estaciones de monitoreo. El método de selección de los MCG y su posterior ensamble buscan compensar esta incerteza, por lo cual se recomienda el uso esta metodología en estudios futuros.

Es importante destacar la mejora en la calidad de las estimaciones que involucró el uso de imágenes satelitales. La calibración de la acumulación nival en los modelos hidrológicos

permitió analizar cómo su evolución futura se relaciona con la menor producción hidroelétrica proyectada. Adicionalmente, el contar con dos variables a calibrar en cada subcuenca permitió observar que la información meteorológica empleada podría ser mejorada. Muchas de las incertezas identificadas en este estudio podrían ser reducidas ostensiblemente, de contar con estaciones pluviométricas, termométricas y nivométricas en altura, para las zonas de interés. Dicha información permitiría mejorar las estimaciones de los gradientes de precipitación y temperatura utilizados, así como la información de SWE. Al tener mejor estimaciones de estas variables, los parámetros de los modelos podrían ser aún más consistentes con la realidad y por ende existiría más confianza respecto al impacto de climas futuros en los caudales.

Cabe señalar que los valores de SWE utilizados son el resultado de una simulación validada en la zona centro-norte del país [Cortés *et al.*, 2013; Cortés *et al.*, 2014b; Cortés, 2016]. Debido a su amplio espectro de validación, estos valores pueden no ser 100% representativos de las condiciones que se dan en la zona del Maule Alto. Sin embargo, estas estimaciones de SWE son las únicas disponibles para la región y permiten mejorar en forma importante la calidad de los modelos hidrológicos. Como se puede observar en los indicadores de ajuste, los resultados de la modelación muestran consistencia entre los valores de SWE modelados y estimados, inclusive en Maule, donde se presentaron las mayores dificultades. Esto sugiere que las estimaciones de SWE, obtenidas del análisis de imágenes satelitales, no están sesgadas con respecto a la realidad.

Finalmente, se deben destacar los resultados obtenidos en el análisis de la capacidad potencial de generación hidroeléctrica. La estimación de los puntos de captación y la disponibilidad de los parámetros básicos de generación hidroeléctrica permitieron obtener resultados más precisos que los obtenidos en la capacidad instalada. Pese a esto, ambos resultados son complementarios, pues mientras la capacidad instalada permite identificar impactos a una escala de producción de energía a nivel nacional, la capacidad potencial permite estudiar los impactos a distintas elevaciones en una cuenca, así como la influencia de sus parámetros básicos en la resilencia futura de una central, ante posibles cambios en el clima.

Las proyecciones de los MCG a nivel regional sugieren que este cambio no será aislado y, por ende, es importante evaluar el impacto del cambio climático en otras zonas del país para poder así evaluar la implementación de políticas de adaptación al cambio climático en el sector energético.

9.1 Recomendaciones

A continuación se resumen una serie de recomendaciones, destinadas a mejorar los resultados de esta clase de estudios:

i. Extensión hacia zonas altas de la red meteorológica y nivométrica: se recomienda contar con al menos una estación sobre los 2.000 msnm, en cada una de las principales cuencas generadoras de hidroelectricidad. Esta estación de altura podría reducir la incerteza respecto del comportamiento de las variables hidrometeorológicas en altura. Al contar con estimaciones más precisas de

precipitaciones y temperaturas se podrán estimar de mejor manera los gradientes de variación de estas variables, factor crítico al momento de extrapolar la información proveniente de las estaciones base utilizadas en la modelación.

ii. Disponer de una base de datos pública de caudales en las restituciones de las centrales hidroeléctricas de pasada y de embalse.

iii. Disponer de una base de datos pública de los puntos de captación de las centrales hidroeléctricas.

iv. Contar con los parámetros básicos de generación en las centrales existentes, con el fin de disminuir la incertidumbre en la estimación de la generación futura. Esta base de datos (junto con ii y iii) mejoraría la implementación de estudios de evaluación del impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica, pasando de una estimación estadística en la capacidad instalada (como la implementada en este trabajo) a una estimación más realista y detallada de cada central de interés. Esto también permitiría evaluar con mayor facilidad competencias entre sectores productivos.

v. Debido a la elevación de la línea de nieves proyectada en este estudio y su posible efecto en los meses de máximas precipitaciones, se recomienda la implementación a futuro de modelos hidrológicos con escalas temporales más finas, con el objetivo de evaluar la magnitud de las crecidas que se producirían en el futuro. Estas crecidas podrían ser especialmente relevantes para las centrales de embalse existentes y futuras, cuya seguridad depende del adecuado dimensionamieto de sus evacuadores de crecidas.

10 BIBLIOGRAFÍA

Código	Referencia Bibliográfica
[ARDP, 2009]	Agencia Regional de Desarrollo Productivo. 2009. Actualización de la Agenda Regional de Desarrollo Productivo e Innovación Región del Maule. Informe Final. Elaborado por la Universidad de Talca.
[ASICENT, 2013]	Asociación de Industriales del Centro. 2013. Informe Económico: La Industria Manufacturera de la Región del Maule.
[Ayala, 2011]	Ayala, A., 2011. Impactos del cambio climático sobre la operación del sistema hídrico de la laguna Laja. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile
[Besalco, 2013]	Besalco Energía Renovable. 2013. Presentación de Besalco Energía Renovable S.A., Proyectos de Generación y Costos Marginales de Energía.
[BCN, 2010]	Biblioteca del Congreso Nacional. 2010. Sistema Integral de Información Territorial. Disponible en línea: http://siit2.bcn.cl/
[CADE-IDEPE, 2004]	CADE- IDEPE. 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Maule. Elaborado para la Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Chile.
[Carrasco *et al.*, 2008]	Carrasco, J., R. Osorio and G. Casassa. 2008. Secular trend of the equilibrium line altitude in the western side of the southern Andes derived from radiosonde and surface observations. Journal of Glaciology, 54(186), 538-550.
[CDEC SIC, 2015a]	Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central. 2015. Reporte Anual 2014. Disponible en Línea: http://www.cdecsic.cl/wp-content/uploads/2015/07/reporte-anual-CDECSIC-correcciones.pdf
[CDEC SIC, 2015b]	Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central. 2015. Capacidad Instalada. Disponible en Línea: http://www.cdecsic.cl/informes-y-documentos/graficos-y-estadisticas/capacidad-instalada/
[CDEC SIC, 2015c]	Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central. 2015. Estadística actualizada de afluentes semanales a centrales hidroeléctricas del SIC. Información autorizada por Ernesto Huber (ehuber@cdecsic.cl) y enviada vía correo electrónico por Juan Donoso (jmdonoso@cdecsic.cl).
[CDEC SIC, 2015d]	Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central. 2015. Estadística de operación real del Sistema Interconectado Central. Disponible en línea: http://www.cdecsic.cl/informes-y-documentos/fichas/operacion-real/
[CDEC SIC, 2014]	Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central. 2014. Catastro de Energías Renovables no Convencionales (ERNC). Disponible en Línea: www.cdecsic.cl/wp-content/uploads/2014/07/Catastro-ERNC4.xls
[CEPAL, 2009a]	CEPAL. 2009. Análisis de vulnerabilidad del sector hidroeléctrico: disponibilidad futura de los recursos hídricos en Chile frente a escenarios de cambio climático. Estudio elaborado por James McPhee. Disponible en Línea: http://www.cepal.org/es/publicaciones/5687-analisis-de-la-vulnerabilidad-del-sector-hidroelectrico-frente-escenarios-futuros
[CEPAL, 2009b]	CEPAL. 2009. Disponibilidad futura de los recursos hídricos frente a escenarios de cambio climático en Chile. Estudio elaborado por Ximena Vargas. Disponible en Línea: http://www.cepal.org/es/publicaciones/5691-disponibilidad-futura-de-los-recursos-hidricos-frente-escenarios-de-cambio
[CNE, 2015]	Comisión Nacional de Energía. 2015. Capacidad Instalada por Sistema Eléctrico Nacional (archivos XLS y KMZ). Septiembre 2015. Disponible en Línea: http://dataset.cne.cl/Energia_Abierta/S_Electrico/
[CNE, 2014]	Comisión Nacional de Energía. 2015. Centrales de Generación en Construcción por Sistema Interconectado. Diciembre 2014. Disponible en Línea: http://dataset.cne.cl/Energia_Abierta/S_Electrico/
[CNR, 2000]	Comisión Nacional de Riego. 2000. Atlas Agroclimático de Chile SIG. Disponible en Línea: http://esiir.cnr.gob.cl [última consulta: 14 de Mayo, 2009].
[CONAF, 2015]	Corporación Nacional Forestal. 2015. Sistema de Información Territorial. Disponible en línea: http://sit.conaf.cl/
[CONAMA, 2011]	Comisión Nacional del Medio Ambiente. 2011. Uso de suelos en formato SIG.
[CONICYT, 2010]	Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica. 2010. Región del Maule: Diagnóstico de las Capacidades y Oportunidades de Desarrollo de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación.
[Cortés *et al.*, 2013]	Cortés, G., Girotto, M., & Margulis, S. A. 2013. A snow water equivalent reanalysis case study over an Andean watershed. In AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 1, p. 0628).

[Cortés *et al.*, 2014a]	Cortés G., Girotto M., & Margulis S. A., 2014. Analysis of sub-pixel snow and ice extent over the extratropical Andes using spectral unmixing of historical Landsat imagery. Remote Sensing of Environment, 141, 64-78.
[Cortés *et al.*, 2014b]	Cortés, G., Girotto, M., & Margulis, S. A. 2014b. Snow Water Equivalent Reanalysis Over a Scarce Data Region Via Assimilation of Snow Covered Area from Landsat 5, 7 and 8. In AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 1, p. 0411).
[Cortés, 2016]	Cortés, G. 2016. Gaining insight into Andean snowpack climatology and change using a snow reanalysis approach applied over the Landsat satellite record. PhD thesis (in preparation), UCLA.
[CR2, 2013]	Centro del Clima y la Resiliencia. 2013. Base de Datos de Caudales, Precipitaciones y Temperaturas, de enero 1940 a diciembre 2013. Disponible en Línea: http://www.cr2.cl/recursos-y-publicaciones/bases-de-datos/
[CUCCG, 2011]	Centro UC de Cambio Global. 2011. Informe Final Fortalecimiento de Capacidades de los Encargados de la Formulación de Políticas para hacer frente al Cambio Climático en Iberoamérica Evaluación del Impacto Social del Cambio Climático en Chile. Elaborado para Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Chile.
[DCA&RNR, 2009]	Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables. 2009. "Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en Chile". Informe Final. Preparado para Biblioteca del Congreso Nacional – BID.
[DGA, 2015]	Dirección General de Aguas. 2015. Mapoteca: Base de datos geográfica oficial. Disponible en Línea: http://documentos.dga.cl/KML/
[DGA, 2014]	Dirección General de Aguas. 2014. Estimación preliminar de las recargas de aguas subterráneas y determinación de los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común en las cuencas de las regiones del Maule, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos. DARH, SDT N°359.
[DGA, 2011]	Dirección General de Aguas. 2011. MINUTA DCPRH Nº 267: Establece Criterios y Metodología para la Determinación de Caudal Ecológico en el Marco del SEIA. Elaborado por el Depto. de Conservación y Protección de los Recursos Hídricos.
[DGA, 2010]	Dirección General de Aguas. 2010. Levantamiento de información hidrogeológica para modelación cuenca del río Maule. Informe Final. Realizado por GCF Ingenieros Ltda. S.I.T. N°222.
[DGA, 2008]	Dirección General de Aguas. 2008. Plan director para la gestión de los recursos hídricos cuenca del río Maule: actualización del modelo de operación del sistema y formulación del plan. Elaborado por Luis Arrau del Canto Consultores en Ingeniería Hidráulica y de Riego.
[DGA, 2005a]	Dirección General de Aguas. 2005. Modelación hidrológica de cuencas pluviales, hoya hidrográfica del río Maule. Informe Final.
[DGA, 2005b]	Dirección General de Aguas. 2005. Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del río Maule. Informe Técnico elaborado por el Departamento de Administración de Recursos Hídricos (DARH). S.D.T. Nº 197.
[DGA, 1986]	Dirección General de Aguas. 1986. Mapa Hidrogeológico de Chile. Escala 1:2.500.000. Texto Explicativo.
[DGF-CONAMA, 2006]	DGF-CONAMA, 2006. Estudio de la Variabilidad Climática en Chile para el siglo XXI. Realizado para la Comisión del Medio Ambiente por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. DGF, FCFM, Universidad de Chile. Explorador de Energía Eólica. Disponible en línea: http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2.html
[DIC, 2010]	Departamento de Ingeniería Civil, FCFM, Universidad de Chile. 2010. Análisis de Vulnerabilidad de recursos hídricos frente a escenarios de cambio climático para las cuencas Cautín, Aconcagua, Teno e Illapel. Realizado para Comisión del Medio Ambiente por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.
[Edwards, 1980]	Edwards, Sergio. 1980. Central Hidroeléctrica Curillinque: Estudio Preliminar. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
[Falvey & Garreaud, 2009]	Falvey, M., & Garreaud, R. D. (2009). Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), 114(D4).
[Garreaud, 2011]	Garreaud, R., 2011: Cambio Climático: Bases físicas e impactos en Chile. Revista Tierra Adento (INIA-Chile), No. 93. (Mar-Abr 2011), 13-19.
[Girotto *et al.*, 2014a]	Girotto, M., Margulis, S. A., & Durand, M. 2014. Probabilistic SWE reanalysis as a generalization of deterministic SWE reconstruction techniques. Hydrological Processes, 28(12), 3875-3895.
[Girotto *et al.*, 2014b]	Girotto, M., Cortés, G., Margulis, S. A., & Durand, M. (2014b). Examining spatial and temporal variability in snow water equivalent using a 27 year reanalysis: Kern River watershed, Sierra Nevada. Water Resources Research, 50(8), 6713-6734.

[Gómez, 2013]	Gómez, Tomás. 2013. Análisis del Impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica de centrales de la cuenca del Alto Cachapoal. Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile.
[INE, 2007]	Instituto Nacional de Estadística. 2007. Censo Agropecuario y Forestal 2007. Disponible en línea: http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/censos_agropecuarios/censo_agropecuario_07_comunas.php
[INE, 2011]	Instituto Nacional de Estadística. 2011. Informe Económico Regional. Evolución Económica Región del Maule año 2010.
[INE, 2015]	Instituto Nacional de Estadística. 2015. Informe Económico Regional. Evolución Económica Región del Maule año 2014.
[INIA, 2010]	Instituto de Investigaciones Agropecuarias. 2010. Eficiencia en sistemas de riego por goteo en el secano. Publicado en Revista Tierra Adentro N° 88, Enero – Febrero 2010. Disponible en línea: http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/ta/NR36672.pdf
[IPCC, 2013]	IPCC Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013. The Physical Basis. Disponible en línea: http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5_WGI-12Doc2b_FinalDraft_All.pdf
[Lara *et al.*, 2009]	Lara, A., Little, C., Urrutia, R., McPhee, J., Alvarez-Garretón, C., Oyarzún, C., Soto, D., Donoso, P., Nahuelhual, L., Pino, M. & Arismendi, I. 2009. Assessment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forests in Chile. Forest Ecology and Management 258: 415–424.
[Little *et al.*, 2009]	Little, C., Lara, A., McPhee, J. & Urrutia, R. 2009. Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large scale watersheds in South-Central Chile. Journal of Hydrology, Volume 374, Issues 1–2, Pages 162–170.
[Llamas, 1993]	Llamas, J. 1993. "Hidrología general: Principios y aplicaciones". Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.
[Mardones *et al.*, 2007]	Mardones, M., Jara, J. y Vargas, J. 2007. El patrón hidrográfico de la cuenca del río Blanco: control tectónico y geomorfológico. Revista de Geografía Norte Grande, 38: 79-98. Disponible en línea: http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022007000200005
[Margulis *et al.*, 2015]	Margulis, S. A., Girotto, M., Cortés, G., & Durand, M. (2015). A Particle Batch Smoother Approach to Snow Water Equivalent Estimation. Journal of Hydrometeorology, (2015).
[McPhee *et al.*, 2009]	McPhee J., Rubio E., Meza R., Ayala A. y X. Vargas, 2009. Proyecciones de impacto del cambio climático sobre cuencas andinas de Chile Central: aplicación a cuencas de Maule Alto y Laja. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, XIX Congreso Chileno de Hidráulica.
[McPhee *et al.*, 2010]	McPhee J., Rubio-Alvarez E., Meza R., Ayala A., Vargas X. and Vicuña S., 2010. An Approach to Estimating Hydropower Impacts of Climate Change from a Regional Perspective. Watershed Management 2010: pp. 13-24.
[Miller *et al.*, 1994]	Miller, A. J., Cayan, D. R., Barnett, T. P., Graham, N. E., & Oberhuber, J. M. (1994). The 1976–77 climate shift of the Pacific Ocean. Oceanography, 7(1), 21-26.
[MINENERGIA, 2011]	Ministerio de Energía. 2011. Selección y aplicación de un modelo hidrológico para estimar los impactos del cambio climático en la generación de energía del sistema interconectado central. Revisión B. Encargado por la Subsecretaría de Energía al Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Disponible en línea: http://dataset.cne.cl/Energia_Abierta/Estudios/Minerg/40.Informe_Final_rev_B%281163%29.pdf
[MINENERGIA - DGA – DGF, 2014]	Ministerio de Energía, Dirección General de Aguas y Departamento de Geofísica de la U. de Chile. 2014. Explorador de Derechos de Aprovechamiento de Agua No Consuntivos. Base de datos del potencial hidroeléctrico de Chile hasta el 2014. Disponible en Línea: http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/DAANC/
[ODEPA, 2013]	Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. 2013. Región del Maule: Información Regional 2013. Ministerio de Energía.
[PLC, 2014]	Publicaciones Lo Castillo S.A. (Ed). 2014. Anuario del Campo 2014. Disponible en línea: http://www.portaldeagricultura.cl/wp-content/uploads/2015/07/AC_2014_.pdf
[Peters *et al.*, 2012]	Peters, G. P., Marland, G., Le Quéré, C., Boden, T., Canadell, J. G., & Raupach, M. R. 2012. Rapid growth in CO2 emissions after the 2008-2009 global financial crisis. Nature Climate Change, Vol. 2, 1, Pages 2-4.
[RHMA, 2011]	División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. 2011. Investigación de los aportes nivoglaciares en algunas cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo y Rapel; y estimación de los efectos del cambio climático. Elaborado para la Dirección General de Aguas (DGA).
[Rojas, 2012]	Rojas, M. 2012. Simulaciones de cambio climático regional para Chile obtenidos por el modelo PRECIS-ECHAM. Proyecto Anillos SOC-28: Impactos Sociales Ambientales del Cambio Climático Global en la Región del Bío-Bío. Disponible en línea: http://mirasol.dgf.uchile.cl/PRECIS-ECHAM.html

[TG&CUCCG, 2015]	Teco Group & Centro UC de Cambio Global. 2015. "BASE PARA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL EN EL DESARROLLO HIDROELÉCTRICO FUTURO". Tercer Informe. Preparado para Ministerio de Energía.
[UNTEC, 2012]	Fundación para la transferencia tecnológica. 2012. Presentación estudio: Metodología para el cálculo del potencial de generación con ERNC en cauces naturales.
[Vargas, 2008]	Vargas, X. 2008. Análisis de vulnerabilidad y adaptación del sector silvoagropecuario y de los recursos hídricos y edáficos de Chile frente al cambio climático. Realizado por AGRIMED para la Comisión del Medio Ambiente.
[Wood *et al.*, 2004]	Wood, A., Leung, L., Sridhar, V. & Lettenmaier, D. 2004. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. Climatic Change 62, 189–216.