



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS**

ACTUALIZACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO NACIONAL

**INFORME FINAL
RESUMEN EJECUTIVO**

REALIZADO POR:
UNIVERSIDAD DE CHILE
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

S.I.T. N° 417

SANTIAGO, OCTUBRE DE 2017

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Comercial, Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas
Abogado Sr. Carlos Estévez Valencia

Jefe División de Estudios y Planificación
Ingeniero Civil, Sr. Adrián Lillo Zenteno

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil, PhD. Gustavo Calle Vásquez

Inspector Fiscal (s)
Ingeniero Civil en Geografía, Sr. Juan Carlos Salgado González

UNIVERSIDAD DE CHILE
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

JEFA DE PROYECTO
Ingeniera Civil, Sra. Ximena Vargas M. (UCH)

ESPECIALISTAS

Especialista en Hidrología
Ingeniero Civil, PhD. Sr. James McPhee T. (UCH)

Especialista en Meteorología
Ingeniero Civil Químico, PhD. Sr. Roberto Rondanelli (UCH)

Especialista en Hidrogeología
Geóloga, PhD. Sra. Dolorinda Daniele (UCH)

Especialista en Variabilidad Climática
Ingeniero Civil Ambiental, PhD. Sr. Sebastián Vicuña (PUC)

Especialista en Evapotranspiración en Cubierta Vegetal
Agrónomo, PhD. Sr. Francisco Meza (PUC)

Especialista en Evaporación - Altiplano y cuencas endorreicas
Ingeniero Civil Hidráulico, PhD. Sr. Francisco Suárez P. (PUC)

Especialista en SIG y Coordinador Técnico del Proyecto
Ingeniero Civil, MSc. Sr. Miguel Lagos Z. (UCH)

Especialista en Hidrología y Asimilación de Datos
Ingeniero Civil, PhD. Sr. Pablo Mendoza (UCH)

UNIVERSIDAD DE CHILE
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

EQUIPO DE PROFESIONALES POR ESPECIALIDAD

HIDROLOGÍA

Ingeniero Civil, MSc. Javier Cepeda A. (UCH)
Ingeniero Civil, MSc. Nicolás Vásquez P. (UCH)

HIDROGEOLOGÍA

Geólogo, MSc. Sr. Angello Negri (UCH)

METEOROLOGÍA

PhD. en Ciencias Atmosféricas. Sr. Juan Pablo Boisier (UCH)

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA - GLACIOLOGÍA

Geógrafo, MSc., Sr. Alexis Caro (UCH)
Geógrafo, Sr. Rodrigo Kappes (UCH)

VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Ingeniero Agrónomo, PhD. Sr. Nicolás Bambach (PUC)

EVAPOTRANSPIRACIÓN

Ingeniero Agrónomo, MSc. Sr. David Morales (PUC)
Ingeniero Civil, MSc. Sr. Jorge Sandoval (PUC)

Para citar bibliográficamente este estudio, se recomienda hacerlo de esta forma:

DGA (2017), Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción	1
2.	Balance hídrico de una cuenca.....	2
3.	Recopilación de antecedentes	2
	Balance Hídrico de Chile.....	2
4.	Análisis crítico de la información	5
5.	Caracterización de las cuencas de acuerdo a su nivel de información	8
6.	Metodología para la estimación del balance hídrico	12
6.1.	Caracterización de la cuenca:.....	12
6.2.	Estimación de forzantes meteorológicas	12
6.3.	Modelación hidrológica.....	12
6.4.	Estimaciones de validación	13
6.5.	Variabilidad climática	13
7.	Balance hídrico en las cuencas piloto	15
7.1.	Cuenca del Río Loa	16
7.1.1.	Resultados modelación hidrológica	16
7.1.2.	Resultados balance hídrico	18
7.1.3.	Resultados Variabilidad Climática	18
7.2.	Cuenca del río Choapa.....	20
7.2.1.	Resultados modelación hidrológica	20
7.2.2.	Resultados balance hídrico	22
7.2.3.	Resultados Variabilidad Climática	22
7.3.	Cuenca del Río Maipo.....	24
7.3.1.	Resultados modelación hidrológica	24
7.3.2.	Resultados balance hídrico	26
7.3.3.	Resultados Variabilidad Climática	26
7.4.	Cuenca del Río Imperial.....	28
7.4.1.	Resultados modelación hidrológica	28
7.4.2.	Resultados balance hídrico	30
7.4.3.	Resultados Variabilidad Climática	30

7.5.	Cuenca del Río Aysén	32
7.5.1.	Resultados modelación hidrológica	32
7.5.2.	Resultados balance hídrico	34
7.5.3.	Resultados Variabilidad Climática	34
8.	Comparación con balance hídrico 1987	36
8.1.	Comparación forzantes meteorológicas en Chile continental	36
8.2.	Comparación del balance hídrico a nivel de cuencas piloto	36
9.	Conclusiones y recomendaciones	44
9.1.	Conclusiones.....	44
9.1.1.	Caracterización hidrológica actual	44
9.1.2.	Variabilidad y cambio climático	45
9.1.3.	Comparación con el balance hídrico de 1987	46
9.2.	Recomendaciones	48
9.2.1.	Forzantes meteorológicas	48
9.2.2.	Modelación hidrológica.....	49
9.2.3.	Evapotranspiración.....	50
9.2.4.	Recarga de agua subterránea.....	51
9.2.5.	Variabilidad y cambio climático	52
9.2.6.	Sobre la actualización del balance hídrico	52
10.	Referencias.....	53

RESUMEN EJECUTIVO

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio tiene como objetivo general el definir una metodología para la actualización del balance hídrico a nivel nacional, y luego de una primera etapa de discusión entre profesionales y especialistas que concluyó con el desarrollo de un taller de expertos, se llegó a la conclusión de desarrollar una metodología que contemple una modelación hidrológica en base física, que considere el tipo, calidad y extensión de los datos existentes en la actualidad. Se incluyen los potenciales efectos del cambio climático, a través de un análisis de sensibilidad aplicado a las forzantes meteorológicas de precipitación y temperatura. La metodología se aplica a cinco cuencas seleccionadas en las distintas macro-zonas definidas por el Atlas del Agua (DGA, 2016).

Con el fin de cuantificar adecuadamente el balance hídrico, según criterios definidos por el taller de expertos, se propone la utilización del modelo VIC (Variable Infiltration Capacity), el cual corresponde a un modelo grillado que utiliza inputs meteorológicos distribuidos en cada cuenca donde se estima el balance, con el objetivo de obtener de manera distribuida en el espacio las principales variables asociadas al balance hídrico.

En este resumen ejecutivo se muestran los principales resultados y antecedentes utilizados para generar la caracterización y revisión de la información recopilada para actualizar el balance hídrico nacional aplicado a cinco cuencas piloto: Loa, Choapa, Maipo, Imperial y Aysén. Estas cuencas fueron seleccionadas según la completitud y representatividad espacial de información hidrometeorológica, así como criterios de priorización según políticas de la DGA – DEP.

En este resumen se presentan junto con los resultados del balance para el periodo histórico (1985-2015), los potenciales impactos del cambio climático evaluados en el escenario RCP8.5 en el periodo (2030-2060) para cuatro modelos de circulación general de la atmósfera (MCG), seleccionados según índice de severidad y representatividad de precipitación en Chile Central. Finalmente se muestran las principales conclusiones y recomendaciones originadas en este estudio.

2. BALANCE HÍDRICO DE UNA CUENCA

La ecuación general del balance hídrico de una cuenca, está determinada por la Ecuación (2-1), donde la variación del contenido de agua almacenada en los distintos compartimentos de la hoya hidrográfica (ΔS) en un intervalo de tiempo dado (Δt) está dada por la diferencia entre precipitación y las pérdidas evapotranspirativas (ET) y el caudal de salida de la cuenca (Q') que incorpora los registros observados a la salida de cada sistema que pueden estar determinados por un sistema en régimen natural o que incorporen todos los niveles de intervención (trasvases, usos, etc.) dentro del sistema.

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = P - ET - Q' \quad (2-1)$$

La variación de almacenamiento (ΔS), comprende las variaciones de almacenamiento en los distintos compartimentos de cada cuenca, principalmente: Acuíferos, glaciares, nieve y cuerpos de agua. Por otra parte, las pérdidas (ET), dependiendo del volumen de control, incluyen la evaporación desde el suelo y cuerpos de agua, evapotranspiración desde la cubierta vegetal y pérdidas por sublimación en nieve y glaciares.

3. RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES

Con el fin de establecer una propuesta robusta para desarrollar la actualización del balance hídrico nacional, se revisó un total de 22 estudios sugeridos por la Dirección General de Aguas y 13 estudios correspondientes a artículos científicos relevantes al presente estudio desarrollados por científicos nacionales e internacionales.

A modo de ejemplo y considerando su importancia, se muestra en la Figura 3-1 el resumen de las consideraciones fundamentales de la ficha resumen del Balance Hídrico Nacional (DGA, 1987).

Tipo de Información			
Título	BALANCE HÍDRICO DE CHILE		
Año	1987	Código ID	DGA_0
Autor	Dirección General de Aguas		
Elaborado por	Departamento de Hidrología, Estudios Hidrológicos. DGA.		
Ámbito Geográfico	Región	Provincia	Cuenca(s)
	Territorio nacional	Todas	Todas
Tipo de Antecedentes	Demanda y Usos de Agua	Calidad de Aguas	Otros
	X		X
Objetivo(s) de la información			

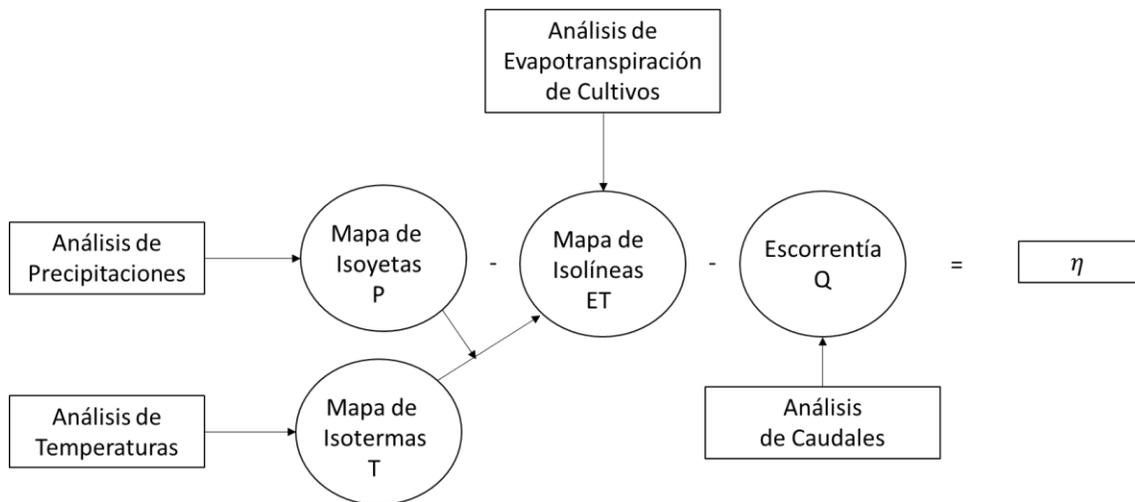
Mostrar el balance hídrico de Chile para dentro de un periodo de 30 años, a nivel de cuencas y subcuencas estableciendo mapas temáticos correspondientes, determinando la partición de precipitación en evapotranspiración y escorrentía.

Temática y resultados de interés

1. Metodología

Se plantea la ecuación del balance hídrico, donde se incorpora un término residual de discrepancia (η). Se establece que para periodos de tiempo largo y en áreas extensas el balance se reduce a: $P - E = Q + \eta$, donde P: Precipitación, E: Pérdidas y Q: Caudal efluente, todos promediados en el tiempo y el espacio. Se establece que el término de Q se refiere al flujo superficial como subterráneo, aunque este se desprecia en gran parte del análisis. Del mismo modo en el término E se incorpora la evaporación, evapotranspiración y pérdidas por consumos, se establece que en gran parte de las cuencas se utiliza la evapotranspiración de superficies naturales.

En cuencas endorreicas se establece que: $P - E = \eta$. Es decir, el escurrimiento es prácticamente nulo.



En cuencas **sin control fluviométrico**, se supone que el término de discrepancia es nulo, determinando directamente la componente de la escorrentía.

2. Determinación del balance hídrico de Chile

Se utilizan criterios fundamentales

- **Extensión espacial y división de área:** Chile continental sin la Antártica. En zona de las islas al sur del Canal de Chacao es solo referencial. Se distingue las cuencas en cordilleranas, depresión y costeras.
- **Periodo de análisis:** 1951-1980. En las regiones I y II 1961-1980. En la III región el caudal resultó un 25% más bajo al comparar con fluvimetría de 60 años, similar en la IV región. En el resto del país las diferencias no son significativas.
- **Año hidrológico:** Regiones II y II noviembre a octubre, resto del país se inició en mayo o abril.

- **Variaciones de almacenamiento:** El considerar que la variación de almacenamiento es nulo es aceptable salvo en caso de zonas áridas con extensa explotación de aguas subterráneas donde los descensos del nivel freático son comparables con el caudal de un periodo de tiempo largo. Para el caso de hielo se establece que su efecto es del mismo orden de magnitud que el error de evaluación del caudal.
- **Escorrentía subterránea:** Se incorpora sólo en cuencas donde existen antecedentes que prueban que el escurrimiento subterráneo en el punto de cierre del balance es importante en relación al escurrimiento superficial.
- **Término de discrepancia:** Considerada del orden del 10% del valor de la escorrentía. Se aceptaron valores mayores cuando no era posible identificar el origen de las diferencias.

Los antecedentes básicos (procesados) usados son:

- **Caudales:** Consistencia, relleno y/o ampliación de estadísticas en régimen observado y no en régimen natural, llevando a nivel mensual la información. Se presentan coordenadas, elevación, área aportante, caudal medio y caudal específico.
- **Precipitaciones:** Consistencia, correcciones rellenos y extensiones. Se presentan coordenadas, elevación, periodo considerado y precipitación media del periodo.
- **Temperaturas:** Se considera que esta variable varía poco por lo que no se extendió, considerando una longitud mínima de 3 años. Se establecen coordenadas, elevación, periodo estadístico y temperatura media anual.
- **Evaporación:** Estadísticas de tanques evaporimétricos Clase A. Se consideró que no varía significativamente en el tiempo, entregan variaciones anual y mensual.

La escorrentía establece el caudal que realmente se observa y no su régimen natural, deduciendo la naturalidad al sumar los distintos usos.

3. Conclusiones generales

Se muestra distribución espacial de precipitación por latitud, y de costa a la cordillera. Se muestra además el porcentaje de precipitación de abril a septiembre respecto al valor anual definiendo zonas de precipitaciones estivales, invernales y no diferenciables por latitud. Del mismo modo se traza perfil de temperatura y evaporación de tanque por latitud. En término de caudales se presentan variaciones por latitud y variaciones del coeficiente de escorrentía por latitud.

Se presentan balances regionales, descomponiendo precipitación, escorrentía y diferenciando la evaporación desde lagos y salares, así como de evapotranspiración sobre superficie natural y exceso de ETP sobre superficie regada.

Se afirma que solo en las regiones II y III los usos forman parte sustancial de la escorrentía natural. Establece además que una fracción muy elevada de los recursos hidrológicos existentes, son compartidos con países limítrofes.

Figura 3-1: Ficha resumen del estudio del Balance Hídrico Nacional (DGA, 1987)

4. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA INFORMACIÓN

El balance hídrico de una cuenca, como se mostró en la Ecuación (2-1), depende de componentes atmosféricas como lo son la precipitación y la evapotranspiración, las cuales pueden ser obtenidas en base a distintas fuentes de información; las que se analizan en este estudio son: 1) Observaciones in situ, 2) Percepción Remota y 3) Reanálisis climáticos.

En base a la información existente, es posible establecer brechas de información existentes y cuencas donde existe un monitoreo adecuado o deficitario para comprender los diversos procesos hidrológicos que ocurren a distintas escalas temporales y espaciales.

En la Tabla 4-1, se establece la comparación entre el número de estaciones pluviométricas y meteorológicas existentes a la fecha y aquellas consideradas en el estudio DGA (1987).

Tabla 4-1: Comparación entre número de estaciones hidrométricas y pluviométricas a nivel nacional

Tipo de estación	DGA (1987)	DGA (2016)	Incremento red
Fluviométrica	297	507	210
Pluviométrica	718	683	-35 ¹

Dentro de las observaciones realizadas por distintas instituciones, la Tabla 4-2, resume la cantidad de instrumentación en el territorio nacional. Es posible inferir de esta tabla, que precipitación, caudal y temperatura son las variables más monitoreadas, sin embargo, aún existe una brecha importante de mediciones de humedad relativa, radiación solar, evaporación de bandeja y velocidad de viento, que son mediciones extremadamente importantes para estimar cambios de fase del agua: evaporación, derretimiento y sublimación. Se señala además que gran cantidad de estas observaciones se concentran en los valles y en la zona centro del país, quedando zonas más remotas con una densidad inferior de registros.

En términos de observaciones de aguas subterráneas, estas se concentran principalmente en las zonas norte y centro del país, donde el recurso superficial es más escaso e insuficiente para cubrir las distintas demandas. El análisis de esta información pone de manifiesto que varias de las estaciones de niveles estáticos y pozos históricamente instalados, se han suspendido y han disminuido su frecuencia de observación, lo que tiene una implicancia en no poder conocer con mayor certidumbre los procesos subterráneos, generándose una importante brecha a ser abordada.

¹ En el estudio DGA (1987), se reportan 377 estaciones administradas por la DMC, gran parte de las cuales estarían suspendidas el día de hoy. Si se considera sólo la red DGA, en la época existían 243 pluviómetros, con lo que en la actualidad se tendría una ganancia de 440 pluviómetros.

Tabla 4-2: Cantidad de estaciones que realizan mediciones según fuente y tipo de variable que registra en el período 1980-2015.

Fuente	Precipitación	Temperatura	Caudal	Humedad Relativa	Velocidad del viento	Evaporación	Radiación solar
INIA	66	65	0	65	65	0	86
AGRO	152	152	0	135	135	0	0
CEAZA	37	35	0	27	25	40	58
MTV	36	36	0	33	33	0	0
SINCA	21	59	0	71	69	0	0
DGA	592	187	667	94	52	88	0
DMC	21	21	0	0	0	0	0
Total	925	555	667	425	379	128	144

Desde las fuentes de información satelitales, se cuenta con una importante cantidad de características propias de cada cuenca a estudiar, que permiten determinar propiedades físicas de cada cuenca, entre las que se destacan cobertura vegetal, cobertura nival fraccional, temperatura de suelo etc., y que a su vez permiten tener nociones de procesos hidrológicos en cuencas con observaciones insuficientes e incluso como insumos para distribuir observaciones terrestres hacia estos sectores.

Los reanálisis climáticos, por su parte, producen campos de precipitación y temperaturas para todo el globo terrestre, y constan de simulaciones de las ecuaciones de movimiento y energía de la atmósfera alta resolución espacial y temporal. El uso de estas herramientas globales y su representación de las observaciones locales también permite establecer correlaciones con el fin de tener predictores distribuidos en todo el territorio nacional para estimar variables meteorológicas en zonas remotas y/o no monitoreadas.

De los productos satelitales y reanálisis climáticos analizados, fue posible calcular diversos indicadores (E_M : error medio, E_A : error absoluto medio y coeficiente R^2), con el fin de tener nociones de las principales diferencias respecto a observaciones en términos de diferencias en las magnitudes, así como en la representatividad temporal de la meteorología estimada por estos productos. En la Figura 4-1 se muestran, a modo de ejemplo, los errores y correlaciones de la precipitación desde distintos productos satelitales y reanálisis, para las cuatro macrozonas descritas por el Atlas del Agua (DGA, 2016).

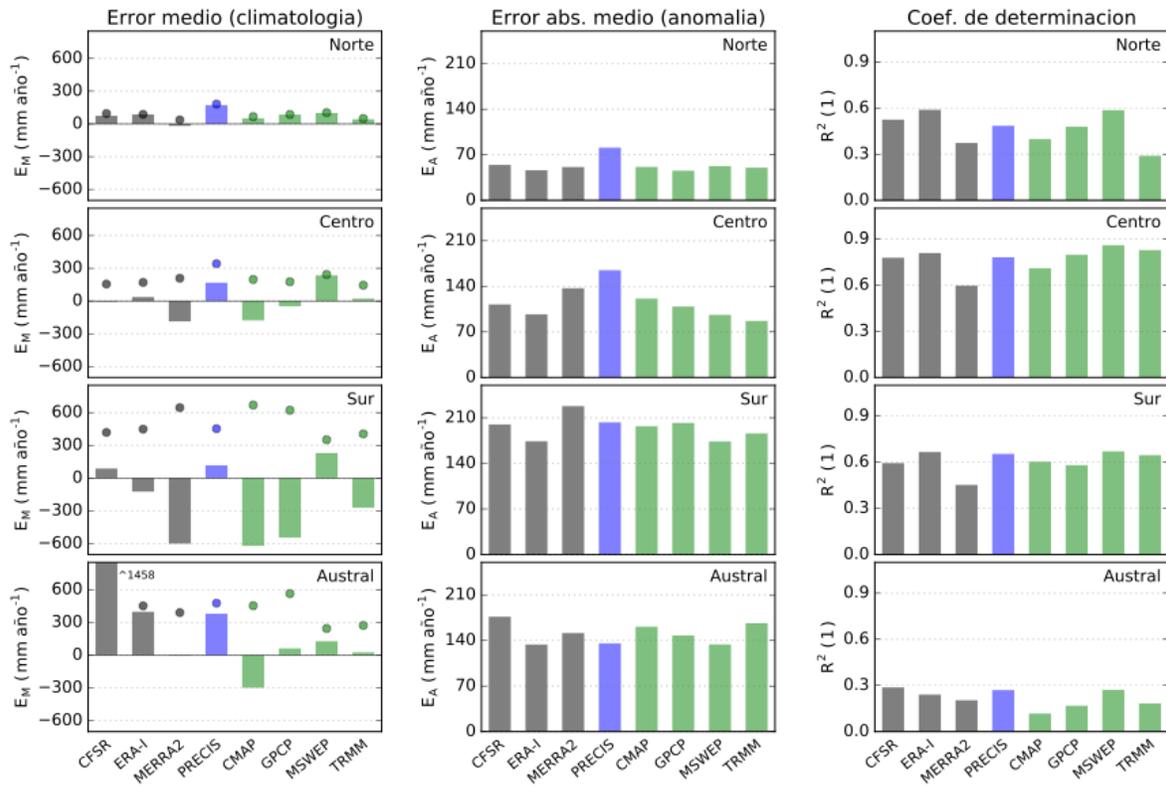


Figura 4-1: Promedios regionales de los errores medios climatológicos (E_M , izquierda), de anomalías (E_A , centro), y los coeficientes de determinación (R^2 , derecha) obtenidos entre la precipitación anual observada y derivada de los ocho productos evaluados en las cuatro macrozonas estudiadas. Barras grises, azules y verdes indican las métricas obtenidas, respectivamente, de los reanálisis, del modelo regional PRECIS-ERA40 y de los productos derivados de observaciones. Círculos en paneles de la izquierda indican el promedio regional de los valores absolutos de E_M .

5. CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS DE ACUERDO A SU NIVEL DE INFORMACIÓN

Con el fin de conocer el nivel de monitoreo de distintos procesos hidrológicos a nivel de cuenca, se analizan 9 cuencas en la macrozona Norte, 7 en la macrozona centro, 7 en la macrozona sur y 8 en la macrozona Austral obtenidas del Atlas del Agua (DGA, 2016). Para cada una de estas 31 cuencas se hacen fichas caracterizando el nivel de observaciones hidrometeorológicas y de niveles estáticos. A modo de ejemplo en la Figura 5-1 y Figura 5-2, se muestra el nivel de información de la cuenca del río Loa para observaciones hidrometeorológicas y subterráneas respectivamente.

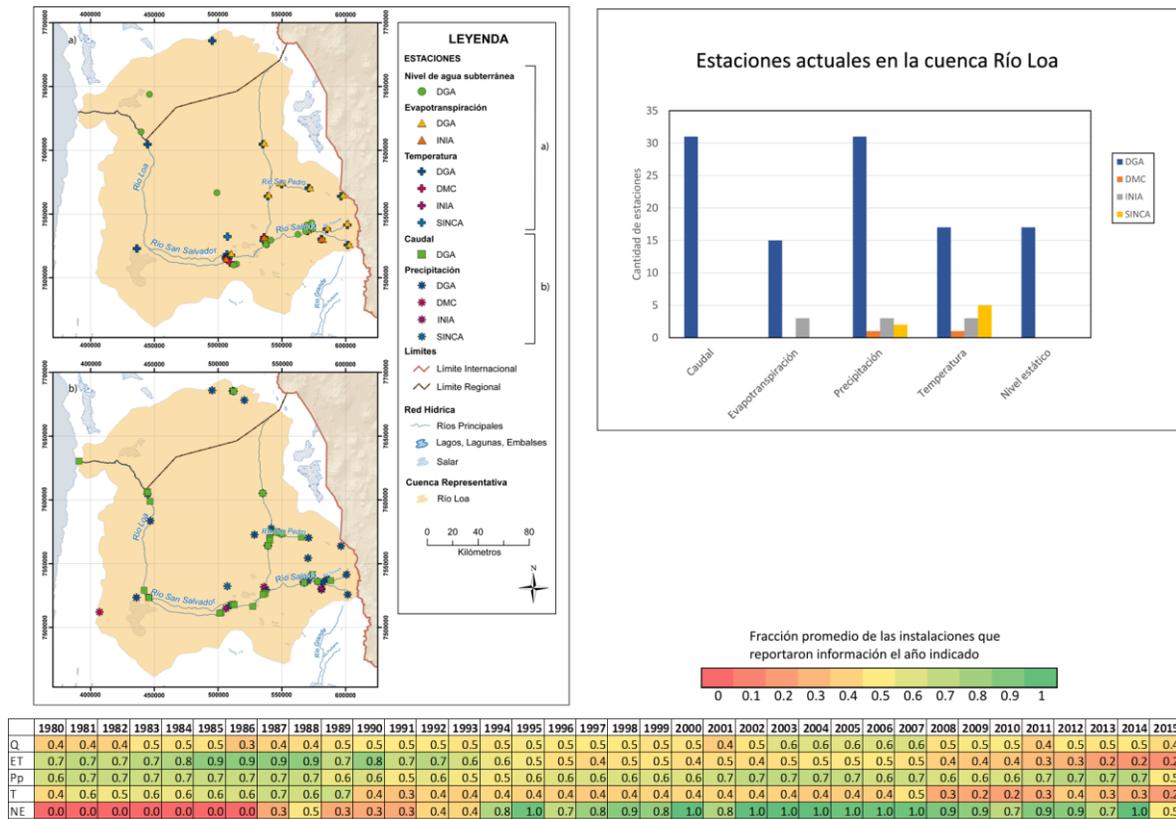


Figura 5-1: Red de monitoreo hidrometeorológico en la cuenca del río Loa. Arriba a la izquierda, se muestra la distribución espacial de las estaciones de monitoreo divididas por variable (forma del punto) y fuente de información (color de este). Arriba a la derecha, se muestra el total de estaciones por variable según fuente de información. Abajo, se muestra una medida de la cantidad y calidad de información por año, mediante una estandarización entre 0 y 1, donde 1 significa que en el año correspondiente existen 25 o más días con datos en cada uno de los meses de este año.

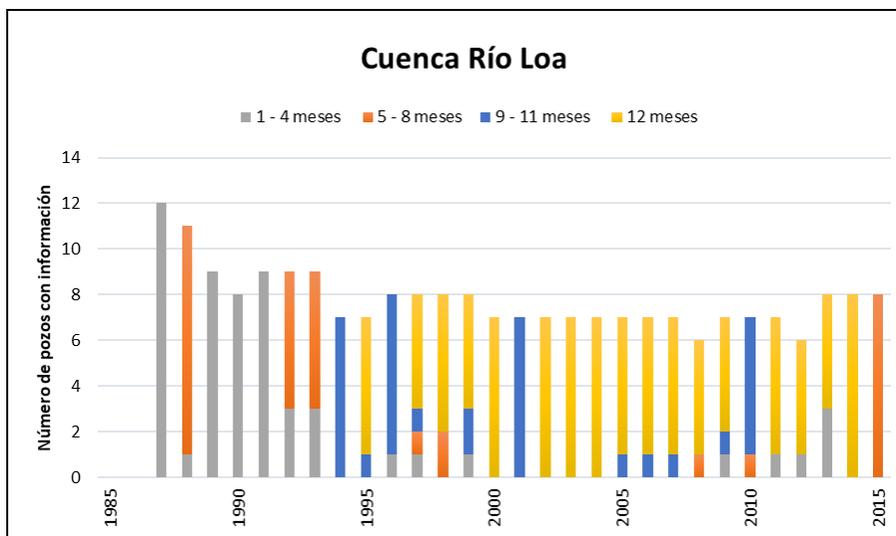


Figura 5-2: Disponibilidad de niveles de agua subterránea en la cuenca Río Loa. En plomo pozos con 1 a 4 meses con información de N.E. al año, en naranja de 5 a 8 meses, en azul de 9 a 11 meses y en amarillo los 12 meses del año.

El diagnóstico del nivel de observaciones por macro zona es bastante similar y se resume en los siguientes puntos:

- **Macro zona norte:** Las estaciones de monitoreo de niveles estáticos están principalmente localizadas y focalizadas en las áreas próximas a los cursos de los ríos principales, a excepción de la cuenca Pampa del Tamarugal, donde la distribución espacial de los pozos monitoreados presenta una mayor homogeneidad. Para observaciones hidrometeorológicas existe mayor cantidad de observaciones de precipitación que de caudales, en estas últimas existen algunos ríos sin control fluviométrico. Se destaca que en general las observaciones meteorológicas se sitúan en torno a los ríos. En términos de observaciones de nieve, estas existen solo en los ríos Huasco, Elqui y Limarí.
- **Macro zona centro:** Las estaciones de monitoreo de niveles estáticos están principalmente localizadas y focalizadas en las áreas próximas a los cursos de los ríos principales, a excepción de las cuencas río Maipo y río Rapel, donde la distribución espacial de los pozos monitoreados presenta una mayor homogeneidad, cubriendo casi por completo las áreas topográficamente bajas de las cuencas mencionadas. El patrón de registros hidrometeorológicos nuevamente se concentra en torno a los cauces de los ríos y en la parte baja de la cuenca. La densidad de estaciones de esta macro zona es superior respecto a otras zonas del país. En términos de observaciones de nieve, los principales ríos están monitoreados al menos con una estación.
- **Macro zona sur:** Las estaciones de monitoreo de niveles de agua subterránea son escasas en la mayoría de las cuencas representativas, a excepción de la cuenca Río Itata, con 13 pozos de monitoreo. No obstante, a diferencia de las macrozonas Norte y Centro, los pozos de monitoreo presentan una distribución más homogénea, siendo fundamental para tener un buen control espacial del sistema hídrico subterráneo. La densidad de estaciones hidrometeorológicas desciende considerablemente conforme aumenta la latitud, siendo el

río Puelo la más pobremente monitoreada. En términos de registros de nieve, existe solo un punto de monitoreo continuo en el río Laja.

- **Macro zona austral:** La macrozona Austral, integrada por las regiones de Aysén y Magallanes, presenta las mayores tasas de precipitación y escorrentía superficial de todo el territorio nacional (DGA, 2016). Tales características, probablemente no han hecho necesario la instalación de estaciones de monitoreo de niveles de agua subterránea pertenecientes a la DGA, debido posiblemente al escaso uso del recurso hídrico subterráneo. La densidad de estaciones es la menor del país contando en algunas cuencas solo con dos estaciones de precipitación y caudal para toda la cuenca y localizadas generalmente en torno a los cauces.

En la Tabla 5-1 se muestra el ranking de instrumentación establecido para 34 cuencas en el territorio de Chile continental, obtenido del estudio (DGA, 2016b), donde la escala de 1 indica mayor cantidad y calidad de observaciones y 3 indica una cantidad y calidad menor de registros de caudales.

Dados los criterios de información a nivel de cuenca, sumados a los intereses de incrementar el grado de conocimiento en las cuencas por parte de la Dirección General de Aguas y la metodología propuesta en este estudio, se seleccionan las cuencas de la Tabla 5-2. Se destaca que se estudian dos cuencas en la macrozona Norte, debido a que el equipo consultor considera relevante incluir cuencas altiplánicas con el fin de tener un mejor diagnóstico de la aplicabilidad de esta metodología en diversos tipos de climas.

Tabla 5-1: Ranking de información hidrometeorológica para cuencas estimadas en el estudio DGA (2016b)

N°	Código Cuenca	Macrozona	Nombre Cuenca	Ranking Información
1	102	Norte	Lauca	3
2	012		Río Lluta	3
3	013		Río San José	3
4	017		Pampa del Tamarugal	3
5	021		Río Loa	1
6	025		Salar de Atacama	3
7	034		Río Copiapó	2
8	038		Río Huasco	2
9	043		Río Elqui	2
10	045		Río Limarí	1
11	047	Centro	Río Choapa	2
12	051		Río Petorca	3
13	052		Río Ligua	3
14	054		Río Aconcagua	2
15	057		Río Maipo	1

Tabla 5-1: Ranking de información hidrometeorológica para cuencas estimadas en el estudio DGA (2016b).

(Continuación)

N°	Código Cuenca	Macrozona	Nombre Cuenca	Ranking Información
16	060	Centro	Río Rapel	2
17	071		Río Mataquito	2
18	073		Río Maule	1
19	081	Sur	Río Itata	1
20	083		Río Bio-Bío	2
21	091		Río Imperial	1
22	094		Río Toltén	1
23	101		Río Valdivia	3
24	103		Río Bueno	3
25	105		Río Puelo	3
26	107		Río Yelcho	3
27	109		Islas Chiloé y Circundantes	3
28	110		Río Palena y Costeras Límite X Región	3
29	113	Austral	Río Aysén	2
30	115		Río Baker	3
31	117		Río Pascua	3
32	121		Islas entre límite Región y Canal Ancho y Estrecho de la Concepción	3
33	122		Costeras entre Seno Andrew y Río Hollelberg e islas al oriente	1
34	125		Costeras entre Laguna Blanca, Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes	3

Tabla 5-2: Cuencas pre-seleccionadas para evaluar su caracterización.

Código cuenca	Nombre Cuenca	Macrozona
021	Río Loa	Norte
047	Río Choapa	Norte
057	Río Maipo	Centro
091	Río Imperial	Sur
113	Río Aysén	Austral

6. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO

La metodología propuesta, acoge gran parte de las sugerencias recopiladas en el Taller de Expertos realizado en el marco del desarrollo del proyecto. El detalle de la metodología para estimar el balance hídrico se sintetiza a continuación y se muestra conceptualmente en la Figura 6-1.

6.1. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

Las actividades realizadas para poder caracterizar las cuencas en donde se realiza el balance hídrico son:

- Caracterización geológica, morfológica e hidrológica de las cuencas identificando los procesos hidrológicos más relevantes.
- Identificar y definir las características geomorfológicas y cobertura vegetal, de cada unidad de respuesta hidrológica, URH, de las cuencas a modelar. En el caso de este estudio, las URH corresponden a pixeles de 0,05° (latitud – longitud, equivalente a aproximadamente 5 km) de resolución espacial, que a su vez son divididos en 3 capas de suelo y de ser necesario 10 bandas de elevación (criterio asociado a cota del píxel).

6.2. ESTIMACIÓN DE FORZANTES METEOROLÓGICAS

Mediante los productos de precipitación y temperaturas extremas obtenidos para todo el territorio nacional por el equipo consultor del proyecto, se estiman las series temporales, a escala sub-diaria (3 horas), de las forzantes meteorológicas que se utilizarán como entrada al modelo hidrológico.

6.3. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Con el fin de llevar a cabo la modelación hidrológica se consideran las siguientes actividades:

- Calibrar el modelo hidrológico VIC en las cuencas que se encuentren en régimen natural y que tengan control fluviométrico. Se debe considerar tanto la representación de caudales a nivel mensual en las curvas de variación estacional, así como las curvas de duración.
- En cuencas intervenidas que posean control fluviométrico, es necesario estimar las principales extracciones consuntivas superficiales. Para esto se considera una metodología de incorporación de riego, con lo que se satisface la demanda evapotranspirativa potencial de las plantas
- Modelar, en el período 1985-2015, cada una de las cuencas hidrográficas de una macrozona asignando los parámetros en cada URH, de acuerdo a las características de éstas y a los valores calibrados en URHs hidrológicamente similares. El orden de modelación es desde aguas arriba hacia aguas abajo.

- Del modelo hidrológico VIC se extraen las principales variables de flujo y almacenamiento en series temporales diarias. Para analizar la congruencia de los resultados, estos se contrastan a escala diaria (Equivalente en agua de nieve, cobertura nival fraccional, evapotranspiración) y mensual (Escorrentía total) con las estimaciones mencionadas en el punto 6.4 y con registros fluviométricos respectivamente.

6.4. ESTIMACIONES DE VALIDACIÓN

Con el fin de poder validar las estimaciones de cada uno de los flujos relevantes para la determinación del balance hídrico se consideran las siguientes acciones:

- Estimar, a escala diaria, las series temporales de cobertura de nieve y de evapotranspiración que servirán de base para validar la representación de los procesos físicos asociados a la acumulación y derretimiento de nieve, así como los flujos verticales de salida respectivamente, como recarga de agua subterránea.
- Comparar las salidas del modelo hidrológico con los flujos verticales y variables de estado de las cuencas, con las estimaciones realizadas por otras metodologías y fuentes de información.
- En el caso de los flujos de recarga de acuífero, se comparan las metodologías de 1) Curva de recesión en base a Rorabaugh (1964) (Método RORA), y 2) método del escurrimiento promedio mínimo mensual (MoMLR), según Wundt (1958). Los métodos de recarga empleados se basan en la premisa de que la curva de recesión, es decir, la rama descendente de un hidrograma que representa la disminución de la escorrentía se desplaza hacia arriba durante periodos de recarga de agua subterránea (RORA). Por su parte el método MoMLR indica que la recarga es igual al promedio de las escorrentías mínimas mensuales

6.5. VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Para evaluar los potenciales efectos del cambio climático, utilizando variaciones de precipitación y temperatura que proyecten en el escenario RCP8.5, en el periodo (2030-2060), para la zona en estudio, los modelos climáticos globales seleccionados: CCSM4, CSIRO-MK3.6, MIROC-ESM e IPSL-CM5A-LR. En base al análisis de variación climatológica, se busca modelar las variables hidrológicas de interés utilizando las nuevas forzantes meteorológicas, con el fin de estimar el impacto del cambio climático en dichas variables.

En base a los resultados obtenidos se busca:

- Generar los mapas de escorrentía, evapotranspiración, precipitación y temperatura media anual promedio en el período 1985-2015.
- Comparar los resultados a nivel de cuenca en el período 1985-2015 con los del Balance Hídrico existente (DGA, 1987), para tener una noción de la evolución climatológica de los flujos de agua a nivel nacional.
- Comparar los resultados a nivel de cuenca en el período 1985-2015 con aquellos que se obtengan con las nuevas forzantes meteorológicas obtenidas a base de las variaciones climáticas entregadas por los modelos climáticos globales para el período 2030-2060.

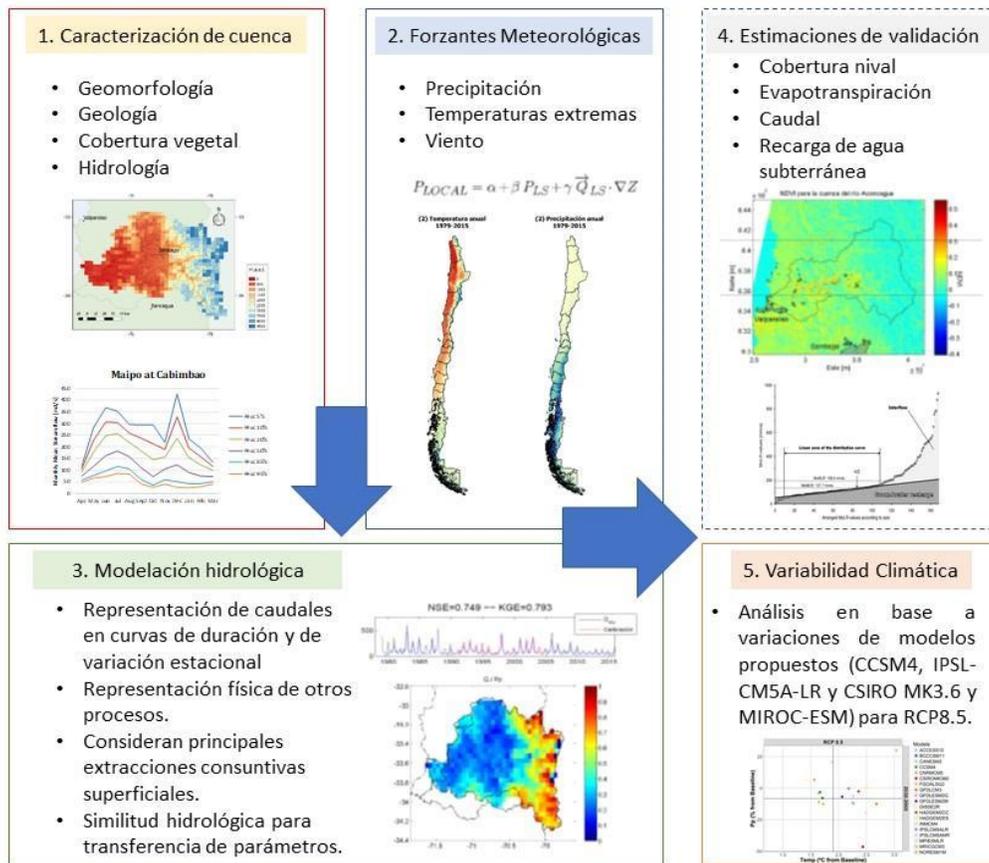


Figura 6-1: Diagrama conceptual del resumen metodológico a ocupar en el balance

7. BALANCE HÍDRICO EN LAS CUENCAS PILOTO

La ubicación espacial de las cuencas piloto seleccionadas para probar la metodología propuesta en este estudio se muestra en la Figura 7-1, donde además se distinguen las distintas macrozonas y límites regionales.

Los resultados obtenidos en cada una de las cuencas piloto donde se aplicó la metodología se presentan para cada cuenca piloto en tres grandes ítems. En primera instancia se muestran los resultados de la modelación hidrológica, luego los resultados del balance hídrico actualizado y, finalmente se muestran las proyecciones climáticas según distintos modelos de cambio climático.

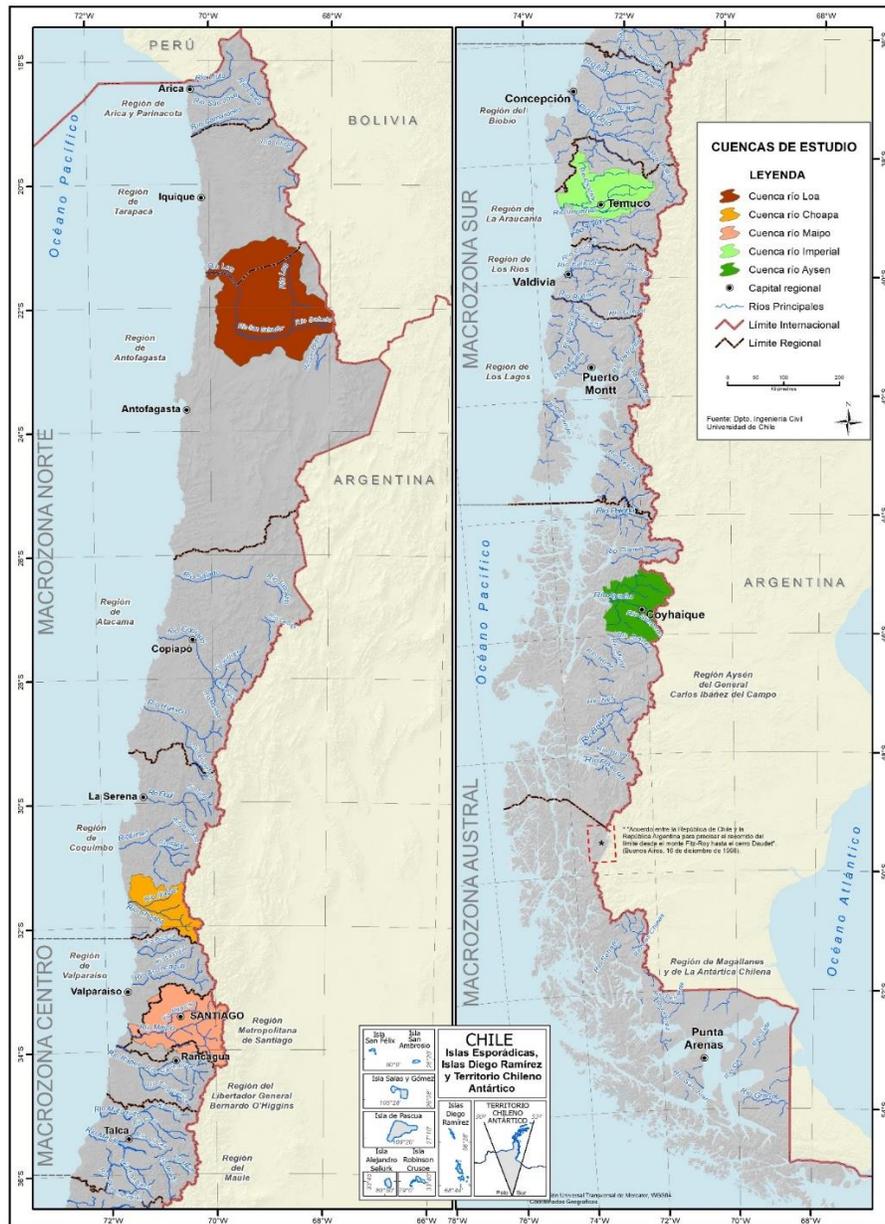


Figura 7-1: Ubicación general de las cuencas piloto seleccionadas para la actualización del balance hídrico nacional

7.1. CUENCA DEL RÍO LOA

En la Figura 7-2 se muestra la cuenca del río Loa junto a su red de estaciones de nivel de aguas subterráneas, evaporación, temperatura, caudal y precipitación; junto a la red hídrica principal, límites regionales e internacionales.

7.1.1. RESULTADOS MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Para encontrar los parámetros del modelo VIC, se lleva a cabo una calibración a nivel mensual de las principales cuencas de cabecera y se analiza la transferibilidad de dichos parámetros a las cuencas con cauces sin control fluviométrico. La cuenca seleccionada para donar parámetros al resto de la cuenca corresponde al río Salado en Sifón Ayquina (estación DGA), cuya calibración alcanza un índice de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) igual a 0,34. Del producto meteorológico usado se estima la precipitación media anual sobre toda la cuenca del río Loa en 26 mm/año, las cuales se reparten en 24,2 mm/año en evapotranspiración y sólo 1,8 mm/año en escorrentía. Lo anterior equivale a que menos del 7% de la precipitación escurre a través de los ríos y que, en consecuencia, el principal flujo de masa y energía se encuentra dominado por la evapotranspiración.

Respecto a las nevadas dentro de la cuenca, los productos MODIS (sigla en inglés para los satélites Moderate Resolution Imagen Spectroradiometer) de fracción de cobertura nival (fSCA) MOD10 y MYD10 arrojan que durante el período 2001-2015, el evento de precipitación que produce la mayor cobertura nival es cercano al 12% de la cuenca. Los demás eventos de precipitación sólida son menores y, en general, no cubren más del 5% del área total. Estos resultados son replicados por VIC, donde para el evento de mayor cobertura, se estima una cobertura nival cercana al 10%, mientras que, para el resto de los eventos, los valores modelados son cercanos o inferiores al 8%.

Los valores de recarga de agua subterránea en la cuenca del río Loa obtenidos mediante la modelación realizada con VIC varían entre menos de 1 mm/año hasta valores próximos a 105 mm/año, con una recarga media de 11 mm/año. Adicionalmente, las estimaciones de recarga en las estaciones de control, es decir, “Loa antes de represa Lequena” y “Loa en Desembocadura”, arrojaron valores de 31 y 11 mm/año, respectivamente. Por otra parte, en las mismas estaciones de control, a partir de la metodología MoMLRr se obtuvieron valores de 7,8 y 0,14 mm/año, y usando los cálculos RORA de 8,1 y 0,13 mm/año. Ambas metodologías presentan valores consistentes entre sí y distintos a los estimados por VIC. Esta diferencia podría deberse a la complejidad de los procesos hidrogeológicos que ocurren en esta área y que probablemente VIC no logra representar.

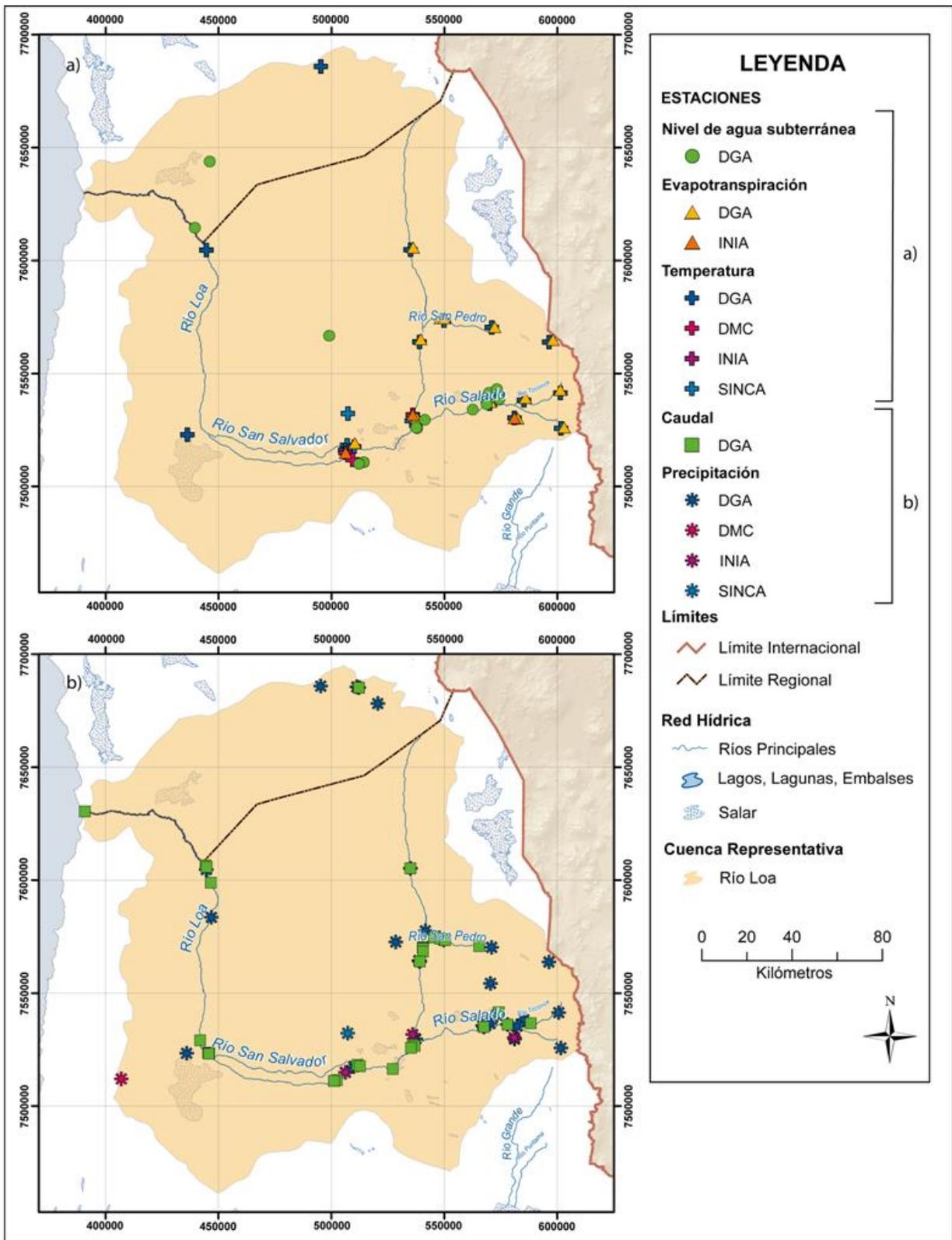


Figura 7-2: Cuenca del río Loa y su instrumentación hidrometeorológica vigente según distintas fuentes de información.

7.1.2. RESULTADOS BALANCE HÍDRICO

La partición del balance hídrico mensual para la cuenca del río Loa, se presenta en la Figura 7-3, en términos de precipitación mensual promedio, escorrentía media mensual y evapotranspiración mensual promedio. En esta figura es posible apreciar el régimen de precipitaciones influenciadas por el invierno altiplánico donde prácticamente el 80% de la precipitación ocurre entre los meses de diciembre a marzo. La escorrentía por su parte es relativamente plana, con un régimen pluvial, generando sus máximos caudales medios mensuales en los meses de verano, finalmente la evapotranspiración sigue el comportamiento esperando teniendo los mayores valores durante el verano por la mayor disponibilidad energética de la atmósfera y de agua disponible.

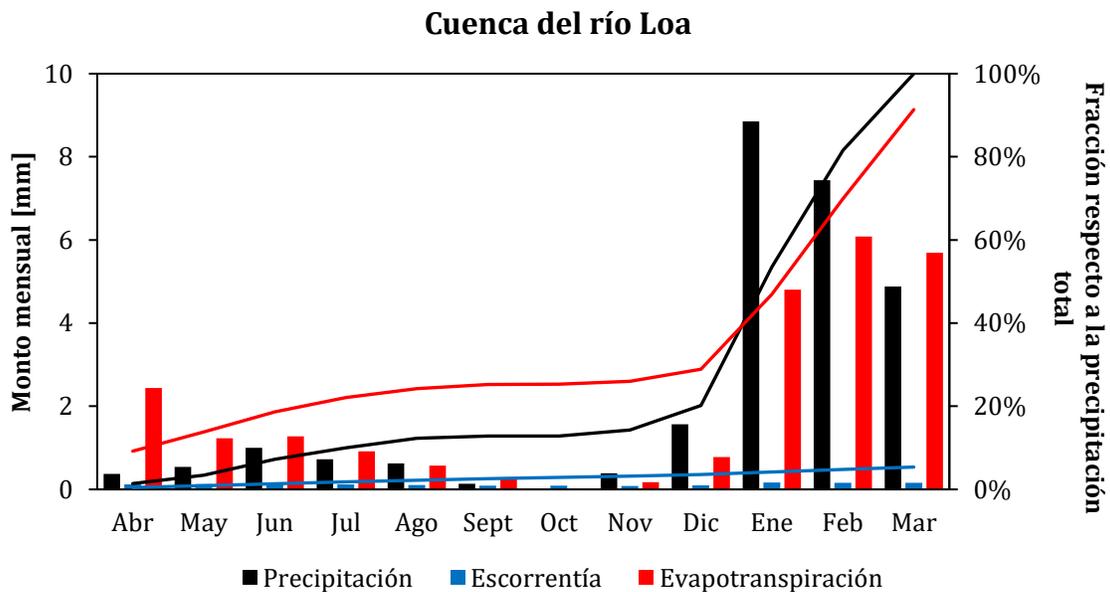
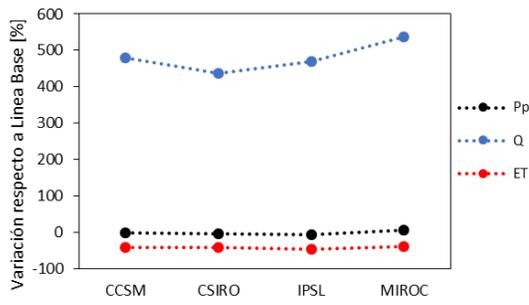


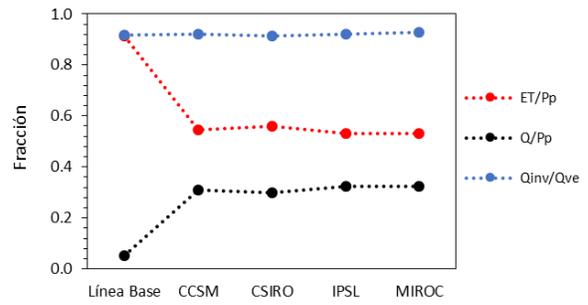
Figura 7-3: Curva de variación estacional y fracción acumulada promedio durante el periodo 1985/1986 – 2014/2015 para la precipitación, escorrentía y evapotranspiración en la cuenca del río Loa. Los valores corresponden a las salidas del modelo VIC.

7.1.3. RESULTADOS VARIABILIDAD CLIMÁTICA

La variación de precipitación, temperatura y escorrentía se muestran la Figura 7-4, así como también la variación de algunos índices de interés hidrológico. Las variaciones están calculadas como la diferencia de las climatologías entre el periodo (2030-2060) y el periodo histórico (1985-2015). Se aprecia un gran aumento en la escorrentía (cercana a 5 veces respecto a la línea base) y una disminución en el agua disponible para evapotranspiración, lo que se ve reflejado en la partición de la precipitación (panel derecho de la Figura 7-4) entre escorrentía y evapotranspiración.



(a) Variación en montos anuales



(b) Índices hidrológicos

Figura 7-4: (a) Variación en montos de precipitación (Pp), escorrentía (Q) y evapotranspiración (ET) respecto a la línea base. (b) Índice hidrológico según cada modelo de cambio climático. Qinv: Escorrentía en invierno (abril-septiembre) y Qver: escorrentía en verano (agosto-marzo). Cuenca del río Loa, periodo (2030-2060) respecto al periodo histórico (1985-2015).

7.2. CUENCA DEL RÍO CHOAPA

En la Figura 7-5, se muestra la cuenca del río Choapa junto a su red de estaciones de nivel de aguas subterráneas, evaporación, temperatura, caudal, precipitación y rutas de nieve; junto a la red hídrica principal, límites regionales e internacionales.

7.2.1. RESULTADOS MODELACIÓN HIDROLÓGICA

La zona centro-norte de Chile, en la cual se encuentra la cuenca del río Choapa, presenta un grado de intervención alto, por lo que en esta cuenca se considera para la calibración la cuenca del río Choapa en Cuncumén (estación DGA) que se encuentra en régimen natural. Adicionalmente, y debido a las extracciones de agua desde el río, es necesario modelar las pérdidas evapotranspirativas producto de las extracciones con fines agrícolas, lo que se realiza considerando que el riego satisface totalmente la demanda evapotranspirativa potencial de las plantas, lo que se obtiene mediante VIC para cada mes donde el riego es intensivo (septiembre-marzo). Con esto, es posible estimar el agua que sale de la cuenca de manera natural más la intervención antrópica producto del riego.

El valor del índice de eficiencia NSE que se alcanza tras el proceso de calibración es igual a 0,72 (nivel mensual). La precipitación media anual (espacial y temporal) de la totalidad del área de la cuenca del río Choapa es cercana a 262 mm/año. La evapotranspiración, que representa el 75% de la precipitación, asciende a 196 mm/año en régimen natural, mientras que incorporando el riego aumenta a 207,8 mm/año. Por otra parte, la escorrentía es cercana a 72 mm/año.

Respecto a la cobertura nival, los productos MODIS consideran que cerca del 40% de la cuenca del río Choapa recibe precipitación sólida y que, debido a la influencia de la cordillera de los Andes, ésta se mantiene durante el tiempo, lo que se refleja en regímenes nivales en cuencas de alta montaña. Respecto al incremento y derretimiento de la nieve, VIC modela adecuadamente ambos procesos, así como también las coberturas nivales máximas alcanzadas.

Los valores de recarga de agua subterránea en la cuenca del río Choapa obtenidos mediante la modelación realizada con VIC comprende valores inferiores a 1 mm/año hasta valores cercanos a 270 mm/año, con una recarga media igual a 53 mm/año. De manera conjunta, los cálculos de recarga en las estaciones de control, es decir, “Choapa en Cuncumén” y “Choapa aguas arriba estero La Canela”, estimaron valores de 224 y 65 mm/año, respectivamente. Por otra parte, en las mismas estaciones de control, a partir de la metodología MoMLRr se obtuvieron valores de 114 y 15 mm/año, y usando los cálculos RORA de 221 y 65 mm/año. Ambas estimaciones coinciden en el orden e incluso en algunos casos en los valores calculados mediante VIC, avalando así los resultados obtenidos.

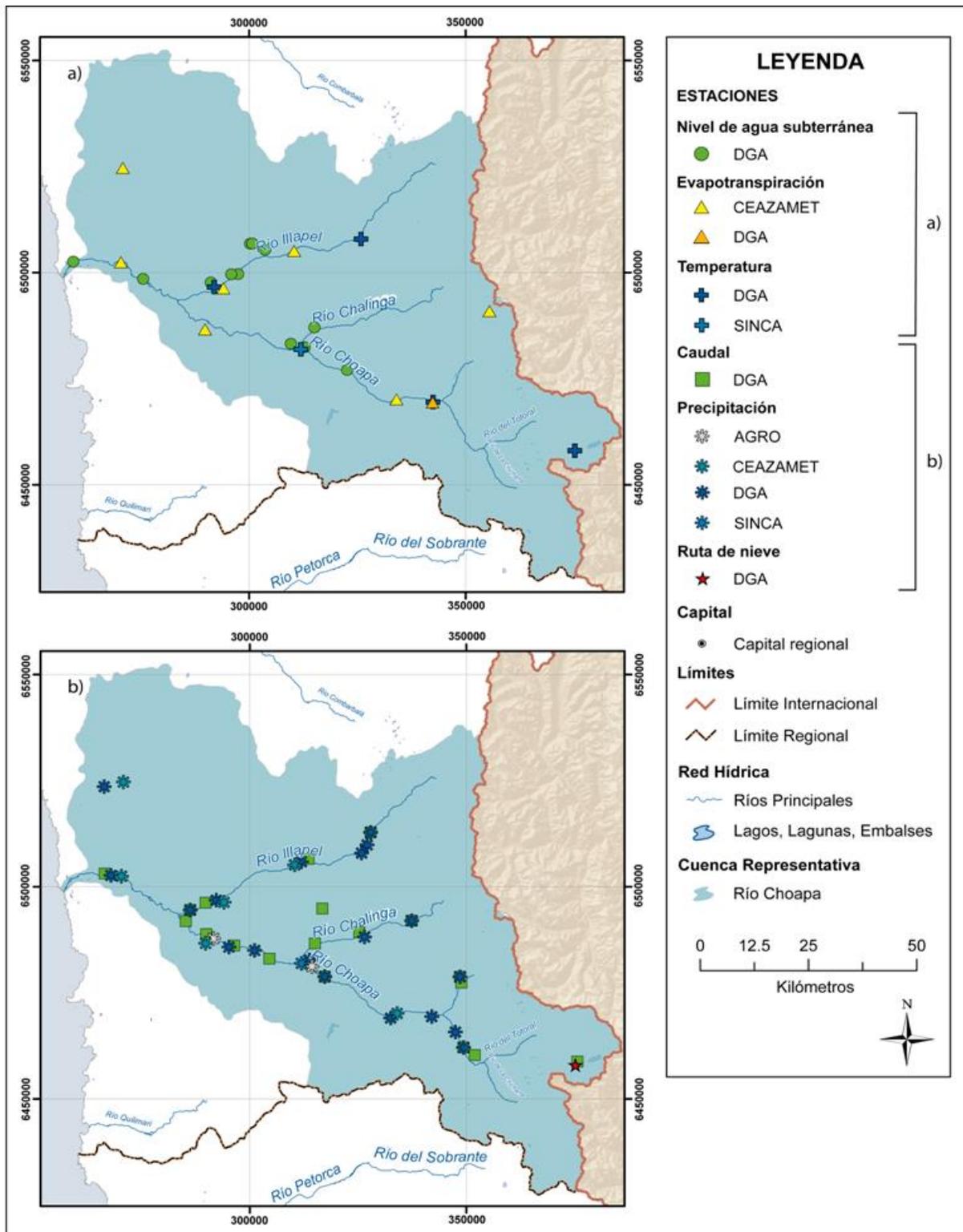


Figura 7-5: Cuenca del río Choapa y su instrumentación hidrometeorológica vigente según distintas fuentes de información.

7.2.2. RESULTADOS BALANCE HÍDRICO

La partición del balance hídrico mensual en términos de precipitación mensual promedio, escorrentía media mensual y evapotranspiración, se muestra en la Figura 7-6. En esta Figura es posible apreciar que el régimen de precipitaciones es mayoritariamente invernal, donde el 88% de la precipitación ocurre entre los meses de abril a agosto. La escorrentía por su parte presenta un régimen nivo-pluvial con un caudal medio mensual máximo en el mes de noviembre. La evapotranspiración presenta las mayores tasas durante los meses de junio a septiembre debido a la mayor disponibilidad de agua en esta época respecto a los meses de verano.

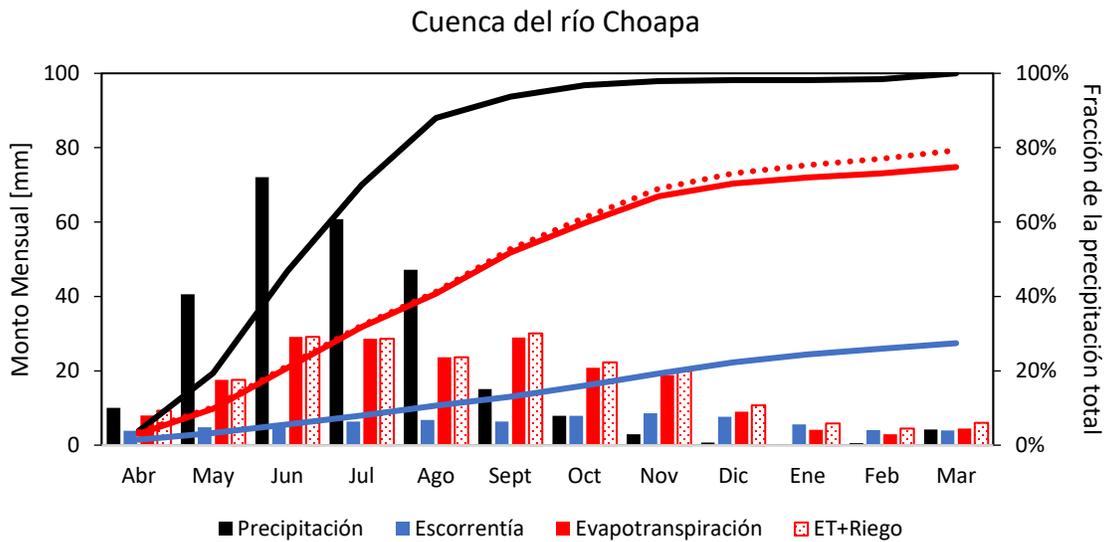
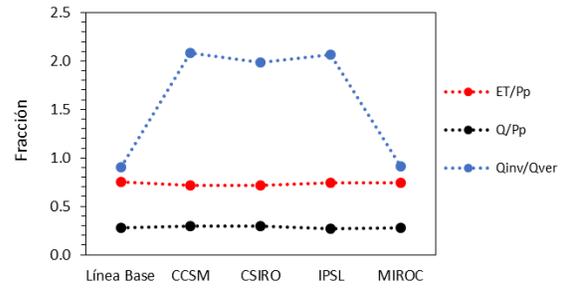
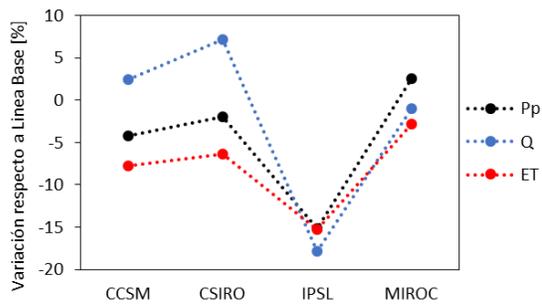


Figura 7-6 Curva de variación estacional y fracción acumulada promedio durante el periodo 1985/1986 – 2014/2015 para la precipitación, escorrentía y evapotranspiración en la cuenca del río Choapa. Los valores corresponden a las salidas del modelo VIC.

7.2.3. RESULTADOS VARIABILIDAD CLIMÁTICA

En la Figura 7-7, se presenta la variación en montos promedios para cada uno de los modelos seleccionados en el futuro (2030-2060), respecto a la línea base (1985-2015). Del panel izquierdo no se aprecia una tendencia clara, pues tres modelos proyectan una disminución de la precipitación, mientras que el modelo MIROC sugiere un aumento. Respectos a los índices hidrológicos, solo se aprecia cambios en la distribución entre el caudal del invierno y el de verano.



(a) Variación en montos anuales

(b) Cambios en índices hidrológicos

Figura 7-7: (a) Variación en montos de precipitación (Pp), escorrentía (Q) y evapotranspiración (ET) respecto a la línea base. (b) Índice hidrológico según cada modelo de cambio climático. Q_{inv}: Escorrentía en invierno (abril-septiembre) y Q_{ver}: escorrentía en verano (agosto-marzo). Cuenca del río Choapa periodo (2030-2060) respecto al periodo histórico (1985-2015).

7.3. CUENCA DEL RÍO MAIPO

En la Figura 7-8, se muestra la cuenca del río Maipo junto a su red de estaciones de nivel de aguas subterráneas, evaporación, temperatura, caudal, precipitación y rutas de nieve; junto a la red hídrica principal, límites regionales e internacionales.

7.3.1. RESULTADOS MODELACIÓN HIDROLÓGICA

La forma de obtener los valores modelados para la cuenca del río Maipo es similar a la del río Choapa. La sub-cuenca en régimen natural a calibrar corresponde al río Maipo en el Manzano, que engloba gran parte del sector andino de la cuenca del río Maipo. La calibración realizada entrega un índice de eficiencia NSE a nivel mensual para la cuenca de Maipo en el Manzano igual a 0,72.

Respecto a la totalidad de la cuenca y según el producto grillado de precipitaciones, la precipitación media anual sobre la cuenca del río Maipo es cercana a los 603 mm/año. Del total de agua disponible, un 59% se transforma en escorrentía, mientras que la evapotranspiración representa el 41% considerando un régimen natural, lo que equivale a 250 mm/año. Si se incorpora la pérdida evapotranspirativa debido al riego, el monto aumenta a 308 mm/año.

Respecto a los procesos nivales, los procesos de aumento y disminución de área nival se encuentran adecuadamente representados. Adicionalmente, se encuentra disponible el producto de SWE (Snow Water Equivalent) de Cortés (2016), quien estima para los Andes centrales chilenos el valor de SWE de manera grillada. Al comparar las series de volúmenes de SWE estimadas por Cortés y VIC, se aprecia una clara relación interanual, siendo los volúmenes modelados por VIC menores a los calculados por Cortés.

Los valores de recarga de agua subterránea en la cuenca del río Maipo obtenidos mediante la modelación realizada con VIC varía entre 5 mm/año y 840 mm/año, con una recarga media igual a 214 mm/año. Al mismo tiempo, las estimaciones de recarga en las estaciones de control, es decir, “Maipo en el Manzano” y “Maipo en Cabimbao”, arrojaron valores de 380 y 232 mm/año, respectivamente. Por otra parte, a partir del método MoMLRr se estimaron valores de 423 y 153 mm/año, y usando los cálculos RORA de 572 y 193 mm/año, respectivamente. Ambas metodologías alternativas presentan valores que coinciden en el orden de las estimaciones calculadas mediante VIC avalando los resultados obtenidos. No obstante, ambos métodos sistemáticamente muestran valores más altos en la estación “Maipo en el Manzano” y más bajos en “Maipo en Cabimbao” producto, probablemente, a un pequeño déficit y exceso del caudal modelado respecto al observado, respectivamente.

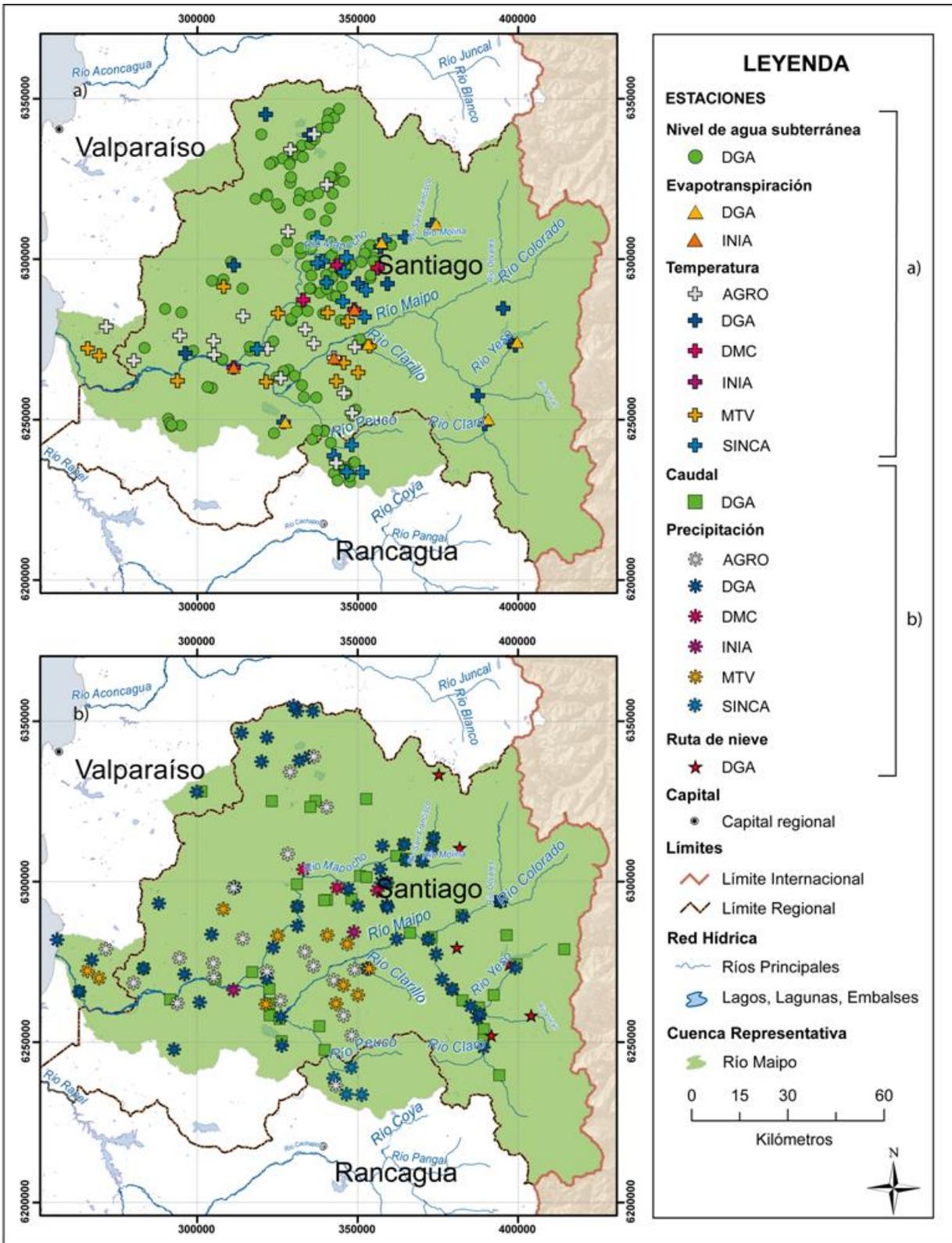


Figura 7-8: Cuenca del río Maipo y su instrumentación hidrometeorológica vigente según distintas fuentes de información.

7.3.2. RESULTADOS BALANCE HÍDRICO

La partición del balance hídrico para la cuenca del río Maipo en términos de precipitación mensual promedio, escorrentía media mensual y evapotranspiración mensual promedio, se muestra en la Figura 7-9. En esta figura es posible apreciar que el régimen de precipitaciones es mayoritariamente invernal, donde el 79% de la precipitación ocurre entre los meses de abril a agosto. La escorrentía por su parte presenta un régimen nivo-pluvial y un caudal medio mensual máximo en el mes de diciembre. La evapotranspiración presenta las mayores tasas durante los meses de junio a noviembre debido a la mayor disponibilidad de agua en esta época respecto a los meses de verano. Durante los meses de verano la evapotranspiración producto del riego aumenta considerablemente respecto a la ET en el resto del año hidrológico.

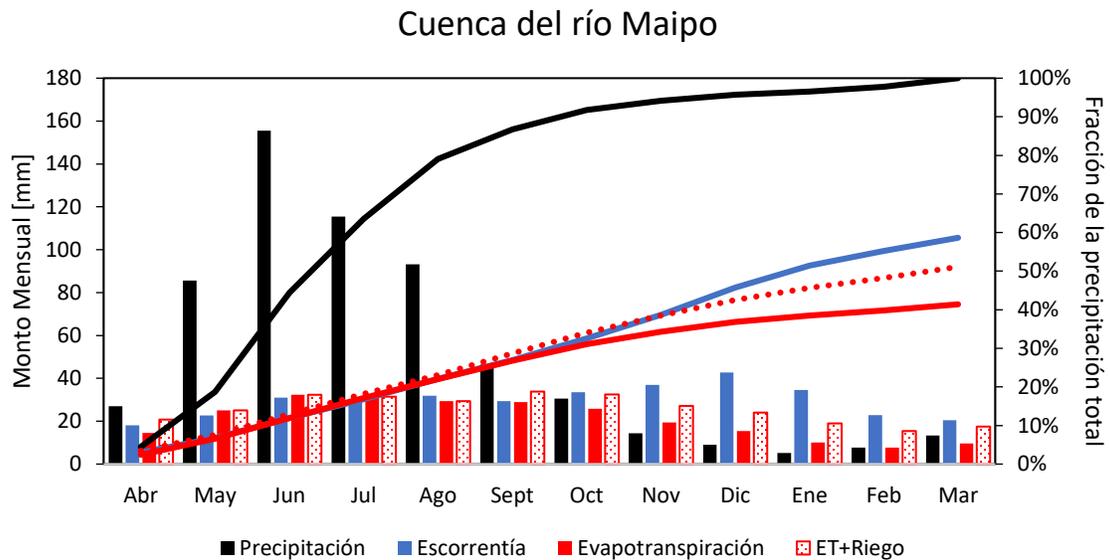
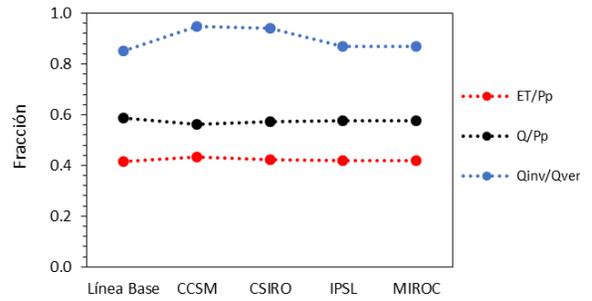
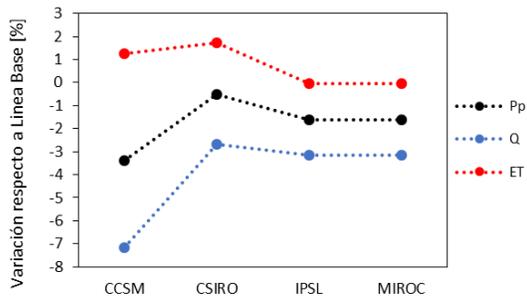


Figura 7-9: Curva de variación estacional y fracción acumulada promedio durante el periodo 1985/1986 – 2014/2015 para la precipitación, escorrentía y evapotranspiración en la cuenca del río Maipo. Los valores corresponden a las salidas del modelo VIC.

7.3.3. RESULTADOS VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Para la cuenca del río Maipo, todos los modelos de circulación global seleccionados proyectan disminuciones en los montos de precipitación en el periodo futuro (1985-2015), respecto a la línea base (1985-2015), tal como se aprecia en la Figura 7-10. No obstante, esto no se traduce en cambios significativos en la partición de la precipitación entre escorrentía y evapotranspiración.



(a) Variación de los montos medios

(b) Cambios en índices hidrológicos

Figura 7-10: (a) Variación en montos de precipitación (Pp), escorrentía (Q) y evapotranspiración (ET) respecto a la línea base. (b) Índice hidrológico según cada modelo de cambio climático. Qinv: Escorrentía en invierno (abril-septiembre) y Qver: escorrentía en verano (agosto-marzo). Cuenca del río Maipo periodo (2030-2060) respecto al periodo histórico (1985-2015).

7.4. CUENCA DEL RÍO IMPERIAL

En la Figura 7-11, se muestra la cuenca del río Imperial junto a su red de estaciones de nivel de aguas subterráneas, evaporación, temperatura, caudal y precipitación; junto a la red hídrica principal, límites regionales e internacionales.

7.4.1. RESULTADOS MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Durante el proceso de calibración se recurre a tres cuencas: Cautín en Rari-Ruca, Cautín en Almagro y Cholchol en Cholchol, todas estaciones fluviométricas pertenecientes a la DGA. La que presenta el menor grado de intervención corresponde a Cautín en Rari-Ruca, en la que en el proceso de calibración de caudales se obtiene un índice de eficiencia NSE de 0,82.

La precipitación media sobre toda la cuenca del río Imperial, considerando el período 1985-2015, bordea los 1.554 mm/año, el que se divide en 996 mm/año para la escorrentía y 569 mm/año para la evapotranspiración (régimen natural). Las pérdidas mediante evapotranspiración debido a la actividad agrícola se estiman en 34 mm/año. En consecuencia, el factor de escorrentía de la cuenca es de 64%.

Según información del producto MODIS, el área que recibe nieve es, en general, inferior al 10%, salvo eventos excepcionales que han cubierto cerca del 15% de la cuenca de nieve. Los valores modelados de cobertura nival representan satisfactoriamente los procesos de incremento y retroceso de la cobertura nival.

Los valores de recarga de agua subterránea en la cuenca del río Imperial obtenidos mediante la modelación realizada con VIC oscilan entre 140 mm/año y 1.370 mm/año. Además, los cálculos de recarga en las estaciones de control, es decir, “Cautín en Rari-Ruca”, “Cautín en Almagro” y “Cholchol en Cholchol” entregaron valores de 1.110, 817 y 485 mm/año, respectivamente. Por otra parte, a partir del método MoMLRr se obtuvieron valores de 1.265, 482 y 214 mm/año, y usando el método RORA se obtuvieron los valores de 1.960, 1.200 y 877 mm/año, respectivamente. Ambas metodologías tienen valores dispares en las estimaciones de recarga variando una respecto a la otra hasta un 300%, asociado probablemente a que estas estaciones tienen áreas de drenaje mayores a 1.295 km² donde empieza a tener problemas RORA. Además, en relación a los valores simulados, la metodología MoMLRr subestima la recarga en aproximadamente en un 50% en las estaciones “Cautín en Almagro” y “Cholchol en Cholchol” producto probablemente a la sobreestimación de los caudales bajos en VIC respecto al observado.

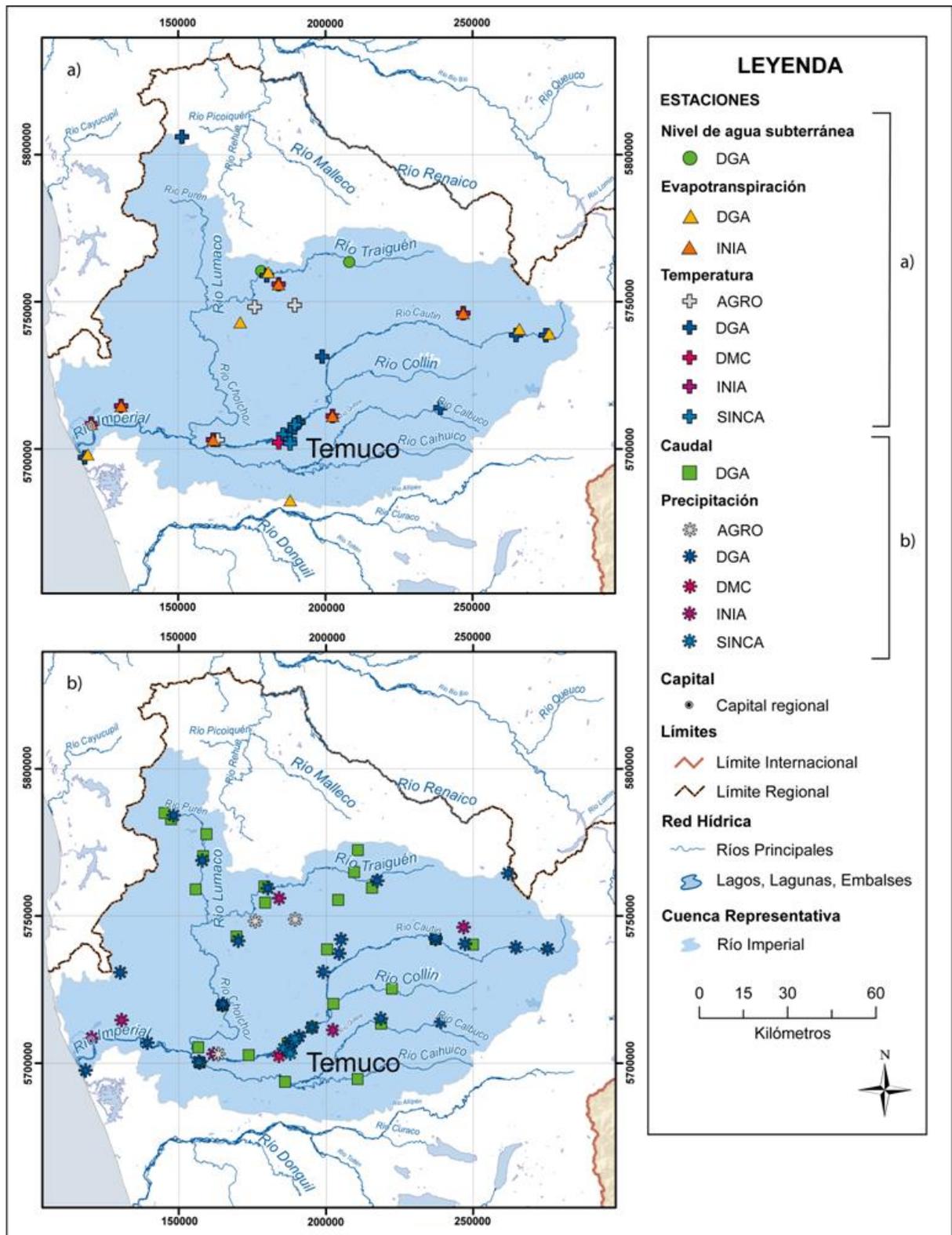


Figura 7-11: Cuenca del río Imperial y su instrumentación hidrometeorológica vigente según distintas fuentes de información.

7.4.2. RESULTADOS BALANCE HÍDRICO

La partición del balance hídrico para la cuenca del río Imperial se presenta en términos de precipitación mensual promedio, escorrentía media mensual y evapotranspiración mensual promedio, en la Figura 7-12. En esta figura es posible apreciar que el régimen de precipitaciones es más uniforme durante el año que en las cuencas anteriores, donde el 88% de la precipitación ocurre entre los meses de abril a noviembre. La escorrentía por su parte presenta un régimen pluvial con un caudal máximo en el mes de diciembre. La evapotranspiración presenta un comportamiento prácticamente uniforme durante todo el año, debido a que es una zona donde la evapotranspiración potencial está limitada por la poca energía solar de esas latitudes, sumado a la mayor presencia de humedad atmosférica producto de las precipitaciones que ocurren prácticamente durante todo el año.

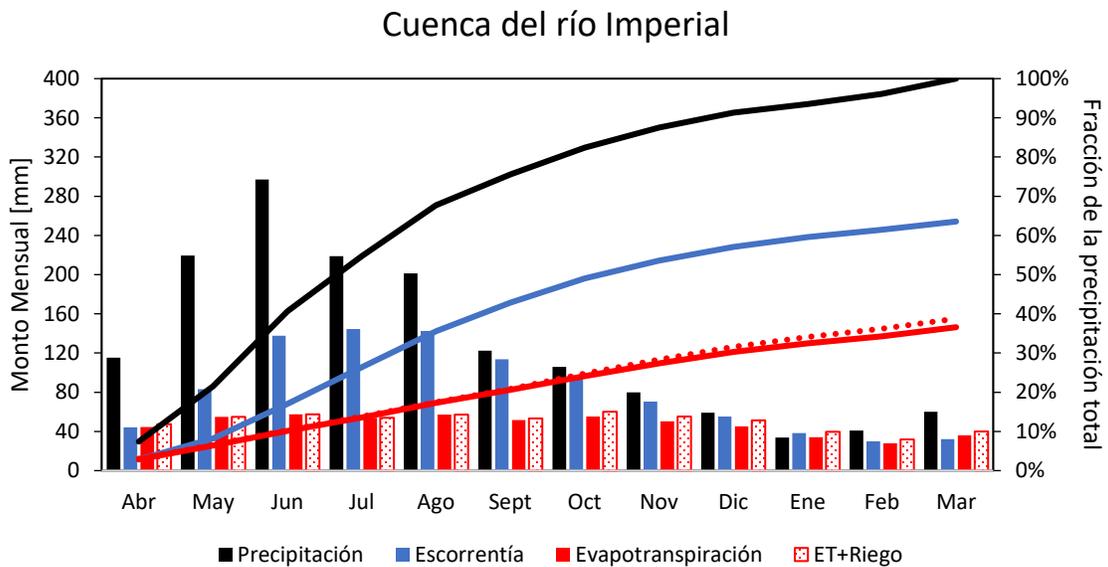
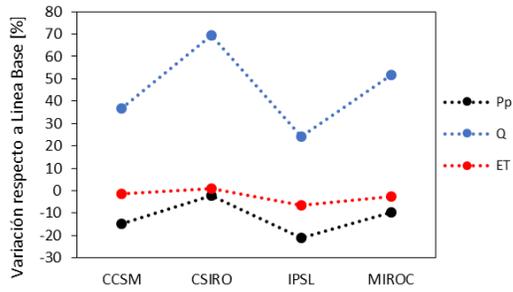


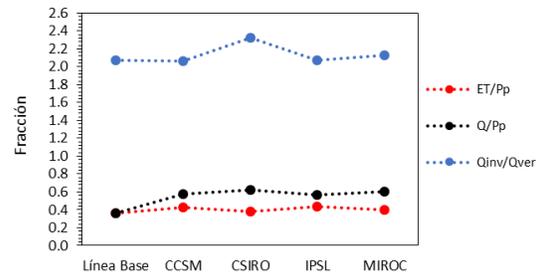
Figura 7-12: Curva de variación estacional y fracción acumulada promedio durante el periodo 1985/1986 – 2014/2015 para la precipitación, escorrentía y evapotranspiración en la cuenca del río Imperial. Los valores corresponden a las salidas del modelo VIC.

7.4.3. RESULTADOS VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Al igual que en el río Maipo, en el río Imperial todos los modelos de cambio climático proyectan para el periodo (2030-2060) respecto a la climatología histórica (1985-2015), una disminución de la precipitación que, en este caso, es más acentuada, llegando a valores cercanos a -20% para algunos modelos (ver Figura 7-13). No obstante, lo anterior no se refleja fuertemente en la partición proyectada de la precipitación entre escorrentía y evapotranspiración, que permanece relativamente constante para todos los modelos respecto a la línea base.



(a) Variación en montos medios



(b) Cambios en índices hidrológicos

Figura 7-13: (a) Variación en montos de precipitación (Pp), escorrentía (Q) y evapotranspiración (ET) respecto a la línea base. (b) Índice hidrológico según cada modelo de cambio climático. Qinv: Escorrentía en invierno (abril-septiembre) y Qver: escorrentía en verano (agosto-marzo). Cuenca del río Imperial, periodo (2030-2060) respecto al periodo histórico (1985-2015).

7.5. CUENCA DEL RÍO AYSÉN

En la Figura 7-14, se muestra la cuenca del río Aysén caracterizada por su red hídrica principal, escasa información hidrometeorológica en comparación al resto de las cuencas piloto, en particular sin mediciones de niveles de pozo ni rutas de nieve.

7.5.1. RESULTADOS MODELACIÓN HIDROLÓGICA

La cuenca del río Aysén tiene una estación fluviométrica que controla la escorrentía generada por toda la cuenca: Río Aysén en Puerto Aysén, la que se encuentra prácticamente en régimen natural. En el proceso de calibración se obtiene un índice de eficiencia NSE igual a 0,64. Con la calibración realizada, es posible distribuir la precipitación media sobre la cuenca, que es cercana a 2.044 mm/año, entre escorrentía (1.502 mm/año) y evapotranspiración (542 mm/año) las que corresponden a un 74 y 26% de la precipitación total, respectivamente.

Debido a la presencia de nubes durante gran parte del año, la comparación de cobertura nival entre MODIS y VIC es compleja pues los productos satelitales de fSCA son poco confiables.

Los valores de recarga de agua subterránea en la cuenca del río Aysén obtenidos mediante la modelación realizada con VIC oscila entre valores menores a 1 mm/año hasta valores cercanos a 1.600 mm/año. Al mismo tiempo, las estimaciones de recarga simuladas en las estaciones de control, es decir, “Mañiguales antes junta río Simpson” y “Aysén en Puerto Aysén” arrojaron valores de 595 y 611 mm/año, respectivamente. Por otra parte, por medio de la metodología del MoMLRr se estimaron valores de 654 y 743 mm/año, respectivamente. Además, mediante RORA se obtuvo una estimación de recarga solo para la estación “Aysén en Puerto Aysén” de 896 mm/año. Ambas estimaciones coinciden en el orden de los valores calculados mediante VIC avalando los resultados obtenidos. No obstante, RORA sobreestima la recarga aproximadamente un 50% debido probablemente a que el área de drenaje es mayor a 1.295 km² donde empieza a tener problemas esta metodología.

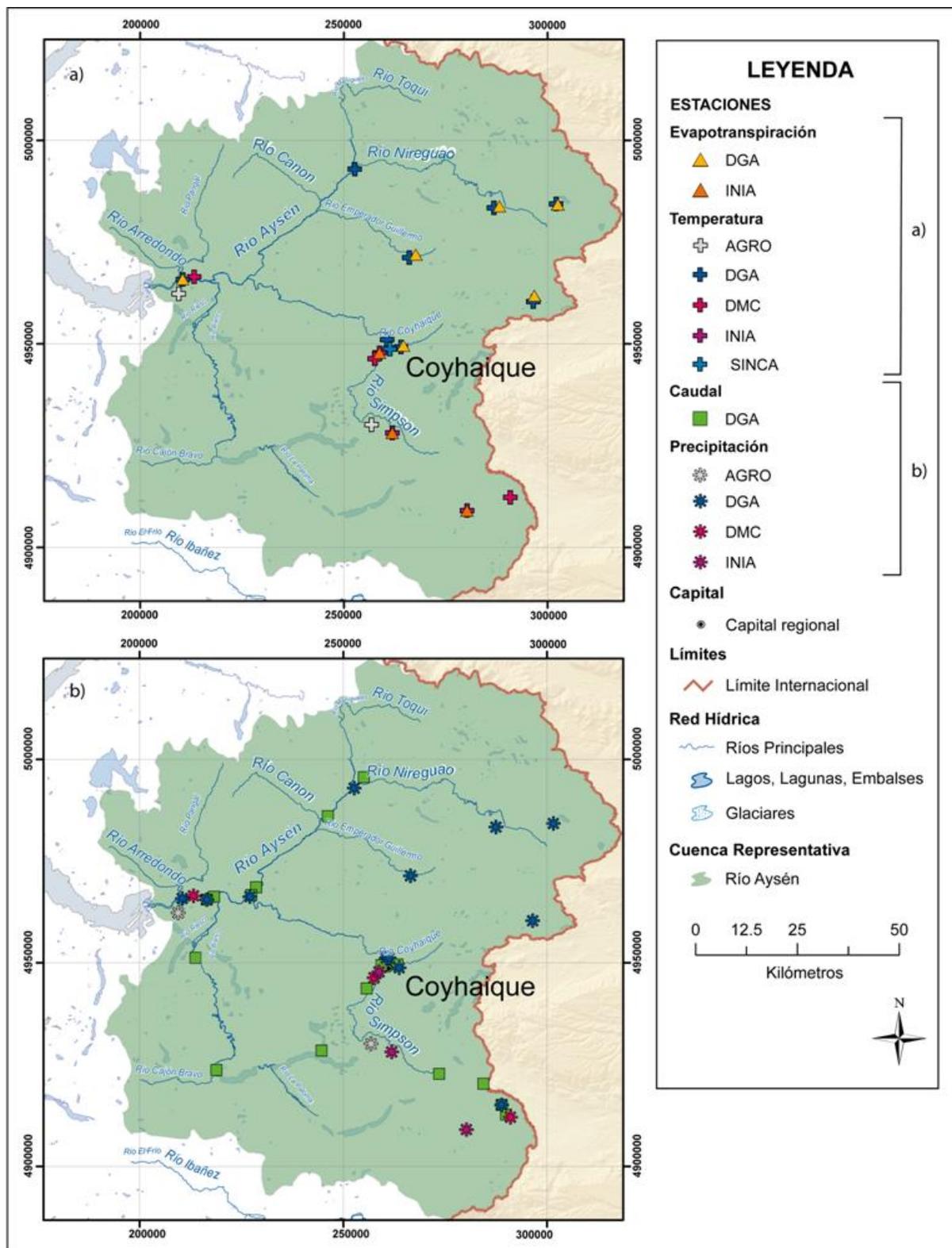


Figura 7-14: Cuenca del río Aysén y su instrumentación hidrometeorológica vigente según distintas fuentes de información.

7.5.2. RESULTADOS BALANCE HÍDRICO

La partición del balance hídrico para la cuenca del río Aysén, se presenta en términos de precipitación mensual promedio, escorrentía media mensual y evapotranspiración mensual promedio, se muestra en la Figura 7-15. En esta Figura es posible apreciar que el régimen de precipitaciones es prácticamente uniforme durante el año donde el 89% de la precipitación ocurre entre los meses de abril a diciembre. La escorrentía por su parte presenta un régimen nivo-pluvial con un coeficiente de escorrentía de 0,73 y un caudal medio mensual máximo en el mes de octubre. La evapotranspiración por su parte presenta un comportamiento prácticamente uniforme durante todo el año, debido a que es una zona donde la evapotranspiración potencial está limitada por la poca energía solar de esas latitudes, sumado a la mayor presencia de humedad atmosférica producto de las precipitaciones que ocurren prácticamente durante todo el año.

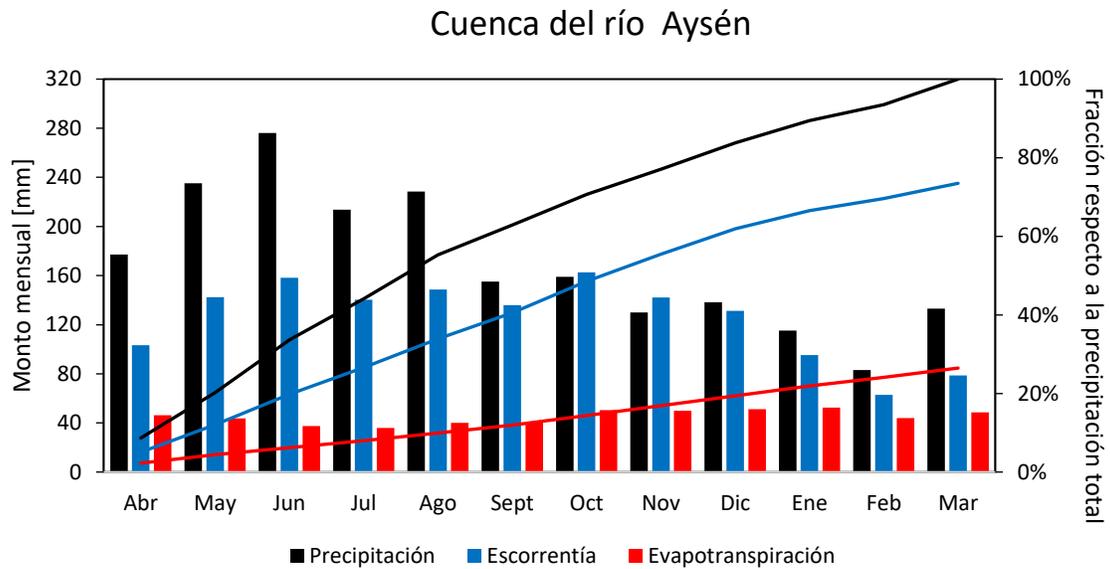
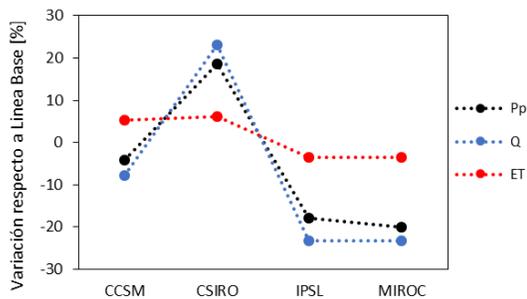


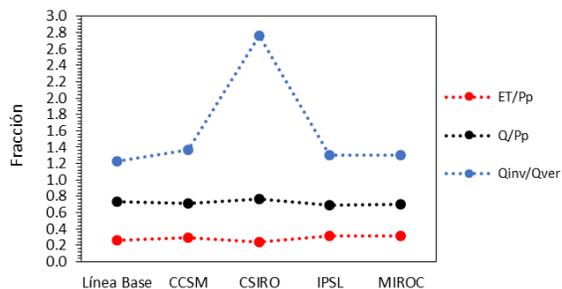
Figura 7-15: Curva de variación estacional y fracción acumulada promedio durante el periodo 1985/1986 – 2014/2015 para la precipitación, escorrentía y evapotranspiración en la cuenca del río Aysén. Los valores corresponden a las salidas del modelo VIC.

7.5.3. RESULTADOS VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Para la cuenca del río Aysén hay discrepancia respecto a la variación futura de la precipitación (ver Figura 7-16) del periodo (2030-2060), respecto al periodo histórico (1985-2015). Solo tres de cuatro modelos pronostican una disminución, la que al igual que en los casos anteriores, no se ve reflejada en la partición de la precipitación. Sin embargo, resalta el modelo CSIRO, que cambia drásticamente la relación entre el caudal de invierno respecto al de verano, producto del aumento de precipitación proyectado en dicho periodo.



(a) Variación en montos medios



(b) Cambios en índices hidrológicos

Figura 7-16: (a) Variación en montos de precipitación (Pp), escorrentía (Q) y evapotranspiración (ET) respecto a la línea base. (b) Índice hidrológico según cada modelo de cambio climático. Qinv: Escorrentía en invierno (abril-septiembre) y Qver: escorrentía en verano (agosto-marzo). Cuenca del río Aysén, periodo (2030-2060) respecto al periodo histórico (1985-2015).

8. COMPARACIÓN CON BALANCE HÍDRICO 1987

8.1. COMPARACIÓN FORZANTES METEOROLÓGICAS EN CHILE CONTINENTAL

En general, se obtuvieron diferencias importantes entre los resultados del balance hídrico presentado en este informe y los resultados del balance hídrico publicado en 1987. En términos de forzantes meteorológicas se presentan las distribuciones de precipitación anual promedio y temperatura media anual en la Figura 8-1 y Figura 8-2, respectivamente.

8.2. COMPARACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO A NIVEL DE CUENCAS PILOTO

Para las cuatro cuencas piloto, se resume el balance hídrico para el periodo del estudio presente (1985-2015) y del estudio DGA (1987) (1950-1980) entre la Tabla 8.1 y la a Tabla 8.5. Por otro lado, en la Figura 8-3, se separan las distintas componentes principales del balance, donde se evidencia que el mayor cambio es en las precipitaciones donde habrían disminuido para todas las macro cuencas. En términos de escorrentía, solo las cuencas del Maipo y Choapa presentan más escorrentía que para el periodo histórico anterior, por último, la evapotranspiración sólo habría aumentado en la cuenca del río Aysén.

Se señala además que los flujos de salida pueden no sumar totalmente la precipitación debido a que la modelación parte en el año 1979 (para el período 1985-2015) y el año 2028 (para la modelación de variabilidad climática), por lo que existen almacenamientos (principalmente en el suelo, posiblemente en la nieve) y aportes subterráneos que inducen un error al considerar solo un sub-período, debido a que los flujos de salida (escorrentía y evapotranspiración), no provienen (o aún no se producen) totalmente de la precipitación que cayó en dicho sub-período.

(1) Pma (1950-1980) [mm]

(2) Pma (1985-2015) [mm]

Diferencia (2) – (1) [%]

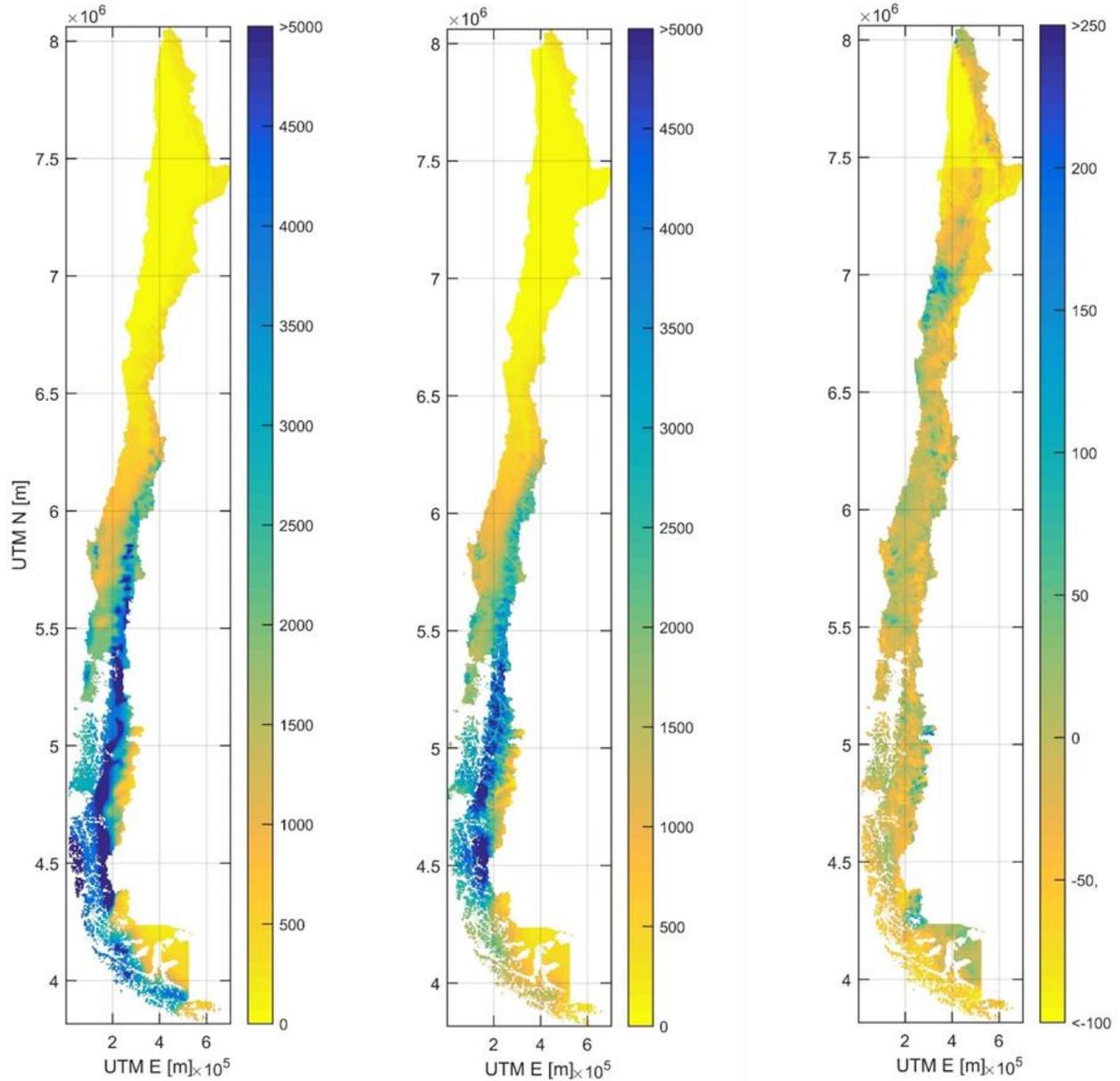


Figura 8-1: Precipitación anual promedio para distintos periodos climatológicos (1950-1980) en el panel izquierdo, (1985-2015) en el panel central y su diferencia porcentual (panel derecho).

(1) Tma (1950-1980) [°C]

(2) Tma (1985-2015) [°C]

Diferencia (2) – (1) [°C]

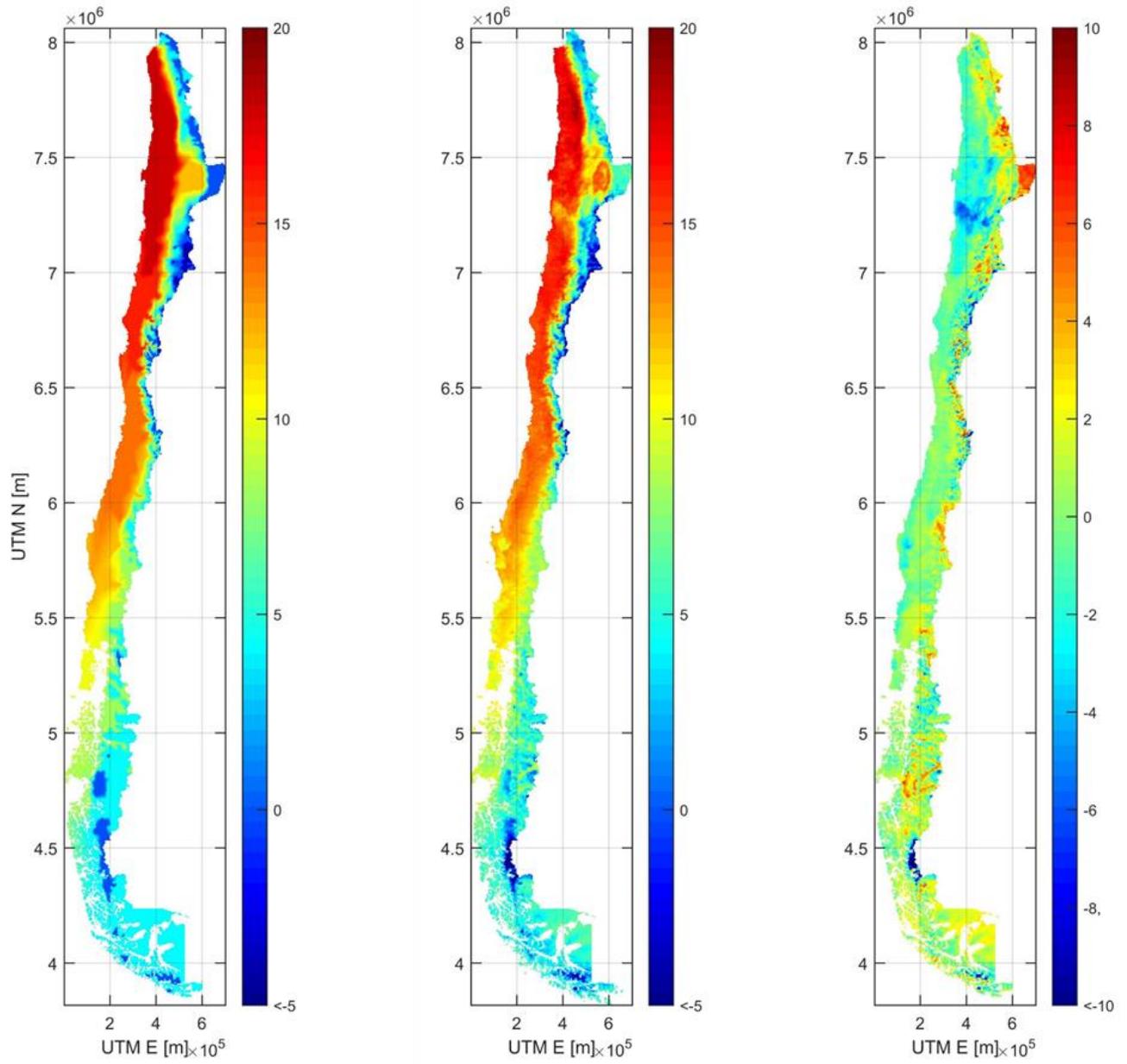


Figura 8-2: Temperatura media anual para distintos periodos climatológicos (1950-1980) en el panel izquierdo, (1985-2015) en el panel central y su diferencia (panel derecho).

Tabla 8.1: Promedios temporales sobre la cuenca del río Loa para la precipitación, escorrentía y evapotranspiración considerando el período del balance DGA (1987) (1950-1980) y el periodo del presente estudio (1985-2015). Se muestran además las diferencias entre ambos periodos calculadas como periodo actual v/s pasado.

Cuenca río Loa	Precipitación anual promedio [mm]	Escorrentía media anual [mm]	Evapotranspiración anual promedio ² [mm]	Coefficiente de Escorrentía promedio
Periodo (1950-1980)	39,6	0,5	34,8	0,01
Periodo (1985-2015)	26,5	1,4	24	0,05
Δ	-13,1	0,9	-10,8	0,04
Δ [%]	-33%	180%	-31%	318%

Tabla 8.2: Promedios temporales sobre la cuenca del río Choapa para la precipitación, escorrentía y evapotranspiración considerando el período del balance DGA (1987) (1950-1980) y el periodo del presente estudio (1985-2015). Se muestran además las diferencias entre ambos periodos calculadas como periodo actual v/s pasado.

Cuenca río Choapa	Precipitación anual promedio [mm]	Escorrentía media anual [mm]	Evapotranspiración anual promedio [mm]	Coefficiente de Escorrentía promedio
Periodo (1950-1980)	326	54,2	260	0,17
Periodo (1985-2015)	262	72	196	0,27
Δ	-64	17,8	-64	0,11
Δ [%]	-20%	33%	-25%	65%

Tabla 8.3: Promedios temporales sobre la cuenca del río Maipo para la precipitación, escorrentía y evapotranspiración considerando el período del balance DGA (1987) (1950-1980) y el periodo del presente estudio (1985-2015). Se muestran además las diferencias entre ambos periodos calculadas como periodo actual v/s pasado.

Cuenca río Maipo	Precipitación anual promedio [mm]	Escorrentía media anual [mm]	Evapotranspiración anual promedio [mm]	Coefficiente de Escorrentía promedio
Periodo (1950-1980)	663	207	360	0,31
Periodo (1985-2015)	603	354	250	0,59
Δ	-60	147	-110	0,27
Δ [%]	-9%	71%	-31%	88%

² Las evapotranspiraciones escritas en las Tablas 8.1 a 8.5, corresponden para ambos periodos de tiempo, a las evapotranspiraciones reales de superficies naturales.

Tabla 8.4: Promedios temporales sobre la cuenca del río Imperial para la precipitación, escorrentía y evapotranspiración considerando el período del balance DGA (1987) (1950-1980) y el período del presente estudio (1985-2015). Se muestran además las diferencias entre ambos periodos calculadas como periodo actual v/s pasado.

Cuenca río Imperial	Precipitación anual promedio [mm]	Escorrentía media anual [mm]	Evapotranspiración anual promedio [mm]	Coefficiente de Escorrentía promedio
Periodo (1950-1980)	1.638	1.064	579	0,65
Periodo (1985-2015)	1.553	988	569	0,64
Δ	-85	-76	-10	-0,01
Δ [%]	-5%	-7%	-2%	-2%

Tabla 8.5: Promedios temporales sobre la cuenca del río Aysén para la precipitación, escorrentía y evapotranspiración considerando el período del balance DGA (1987) (1950-1980) y el período del presente estudio (1985-2015). Se muestran además las diferencias entre ambos periodos calculadas como periodo actual v/s pasado.

Cuenca río Aysén	Precipitación anual promedio [mm]	Escorrentía media anual [mm]	Evapotranspiración anual promedio [mm]	Coefficiente de Escorrentía promedio
Periodo (1950-1980)	2.244	1.794	444	0,80
Periodo (1985-2015)	2.043	1.502	541	0,74
Δ	-201	-292	97	-0,06
Δ [%]	-9%	-16%	22%	-8%

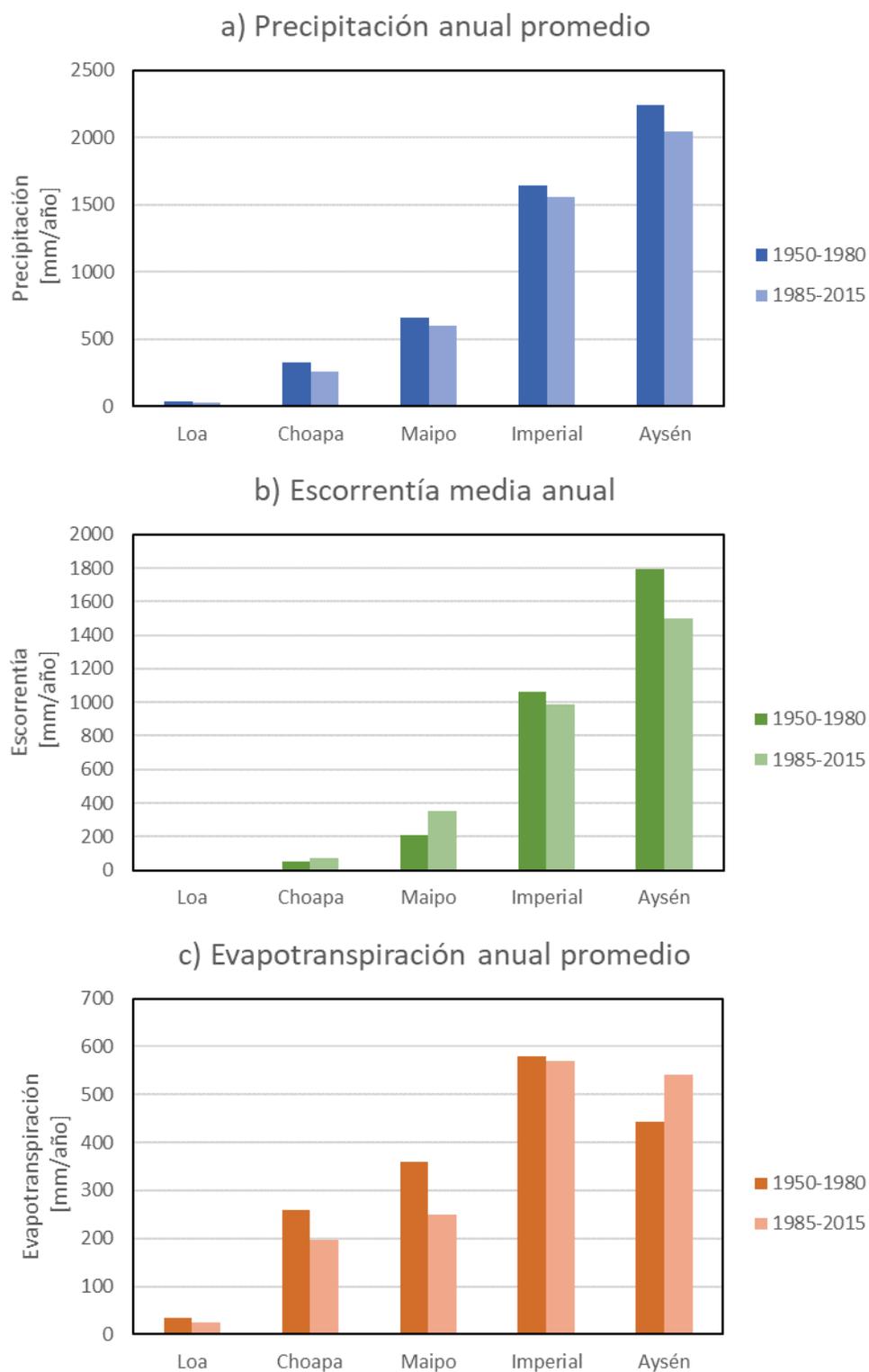


Figura 8-3: Comparación para todas las cuencas piloto de los flujos de a) precipitación, b)escorrentía y c)evapotranspiración, entre los periodos del balance hídrico DGA (1987) en el periodo (1985-1980) y el periodo del balance actual (1985-2015).

El resumen de las proyecciones climáticas en cada cuenca piloto en cada uno de los términos del balance se muestra en la Tabla 8.6, mientras que las variaciones porcentuales de cada GCM respecto al periodo histórico de este estudio (1985-2015) se muestran en la Figura 8-4.

Tabla 8.6: Promedios temporales sobre la cuenca para la precipitación anual promedio, escorrentía media anual y evapotranspiración anual promedio, considerando el período 2030/2031 - 2059/2060.

Cuenca	Modelo	Precipitación [mm]	Escorrentía [mm]	Evapotranspiración [mm]
Loa	CCSM	27	8	15
	CSIRO	26	8	14
	IPSL	25	8	13
	MIROC	28	9	15
Choapa	CCSM	251	74	181
	CSIRO	257	77	183
	IPSL	222	59	166
	MIROC	257	71	190
Maipo	CCSM	583	328	253
	CSIRO	600	344	254
	IPSL	594	343	250
	MIROC	594	343	250
Imperial	CCSM	1.326	767	561
	CSIRO	1.523	950	574
	IPSL	1.226	696	531
	MIROC	1.403	850	555
Aysén	CCSM	1.957	1.386	570
	CSIRO	2.424	1.848	574
	IPSL	1.677	1.154	522
	MIROC	1.636	1.154	522

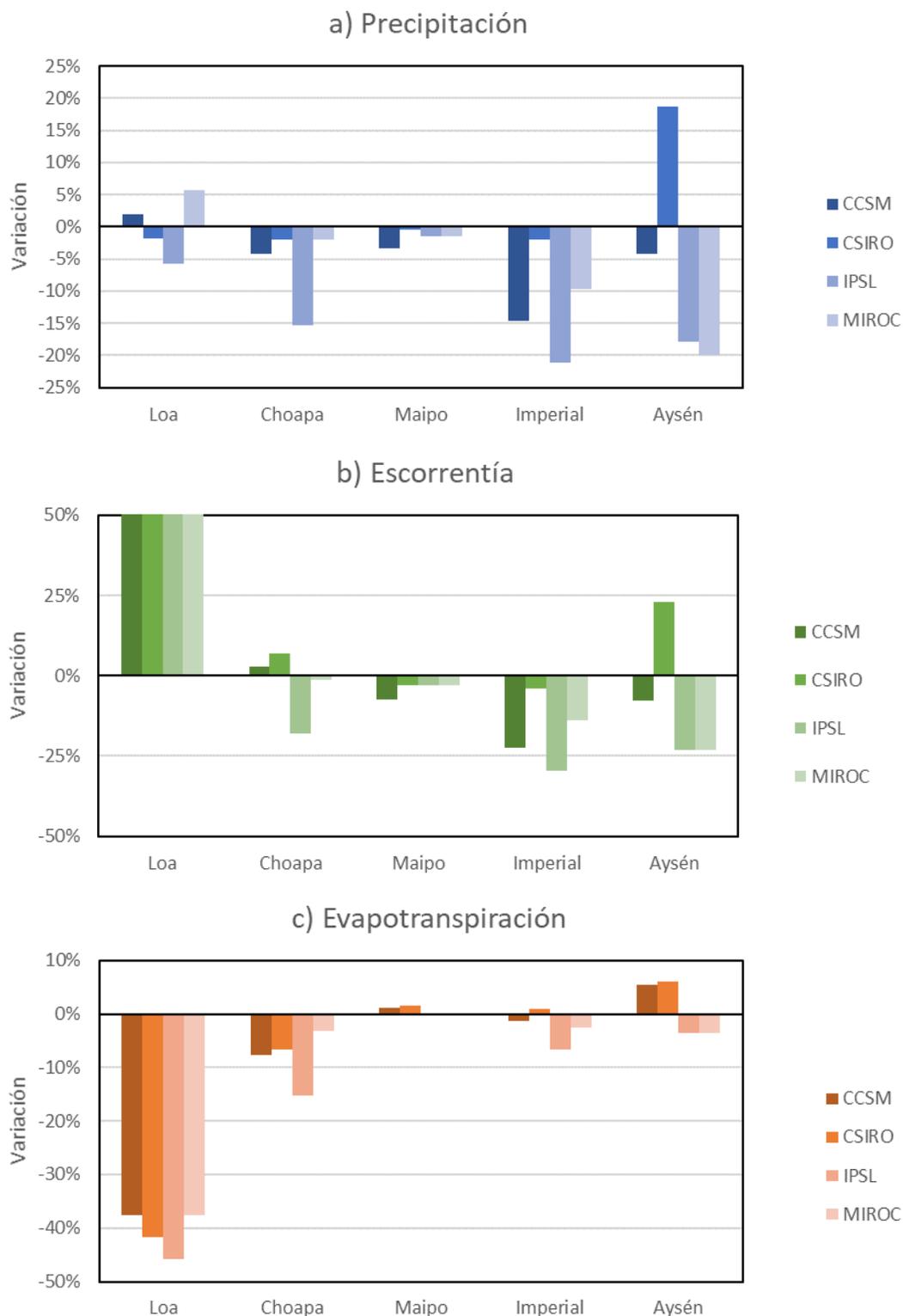


Figura 8-4: Variación porcentual para el periodo (2030-2060) respecto al periodo histórico (1985-2015) según los 4 GCM seleccionados para a) Precipitación, b) Escorrentía y c) Evapotranspiración. Para la escorrentía, las variaciones porcentuales del río Loa casi quintuplican los valores históricos, por lo que para efectos de visualización se cortó la escala en 50%.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. CONCLUSIONES

9.1.1. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA ACTUAL

Los resultados de este trabajo entregan información relevante sobre la partición de precipitación entre escorrentía total y evapotranspiración a lo largo de un gradiente hidroclimático. Por ejemplo, un resultado interesante es la variación latitudinal de la fracción de precipitación anual que evapotranspira a nivel de cuenca, comenzando con un 91% en la cuenca del río Loa, y finalizando con un 26% en la cuenca del río Aysén. A grandes rasgos, también destaca la transición desde un régimen árido en la cuenca del río Loa (con precipitaciones entre enero y marzo, principalmente), a un régimen con abundantes precipitaciones en la cuenca del río Aysén, pasando por regímenes nivales (Choapa y Maipo) y pluviales (cuenca del río Imperial).

Si se analiza el volumen de escorrentía modelado para los distintos períodos de calibración (varía según la cuenca), se encuentran resultados satisfactorios en prácticamente todas las cuencas, salvo la cuenca del río Loa. Por ejemplo, en la cuenca del río Loa en Lequena, se modela un 86% más de escorrentía superficial respecto a la registrada en la estación fluviométrica. Sin embargo, si se consideran las cuencas del río Salado en Sifón Ayquina y la de San Pedro en Canaleta Parshall N°2, el modelo sobrestima solo un 6% y subestima un 5%, respectivamente. Lo mismo ocurre en la cuenca del río Choapa en Cuncumén, donde hay una diferencia de 2% respecto a la estación. En la cuenca del río Choapa antes junta del Estero La Canela, se sobrestima el caudal en un 35%. Sin embargo, las extracciones superficiales y subterráneas complican la comparación, a diferencia de la cuenca Choapa en Cuncumén, que se encuentra en régimen natural. El caso es similar en el río Maipo, donde en la cuenca Maipo en el Manzano, el modelo subestima en un 3%, mientras que en Cabimbao se sobrestima en un 17%. En la cuenca del río Imperial, se calibraron tres cuencas: Cautín en Almagro, Cautín en Rari-Ruca y Cholchol en Cholchol. En las tres se subestima el caudal en 9%, 15% y 9% respectivamente. En la cuenca del río Aysén las diferencias son mínimas. Se subestima un 3% en la cuenca del río Aysén en Puerto Aysén, mientras que en el río Mañiguales antes junta con el río Simpson, se modela 1% más de escorrentía.

Respecto a la nieve, en todas las cuencas, salvo la de Aysén, el proceso de incremento y retroceso de área nival (fSCA), se encuentra bien representado. En términos de SWE, en Choapa se subestima el volumen acumulado de SWE en la cuenca comparado con Cortés et al. (2016), no obstante, el caudal modelado no difiere más allá del 2% en la cuenca de Choapa en Cuncumén. En el Maipo, los volúmenes de SWE son más cercanos a los estimados por Cortés et al. (2016). Del mismo modo, las estaciones Barros Negros, Estero Plomo y Las Arenas arrojan resultados satisfactorios si se considera que se está comparando una medición puntual (en el tiempo y el espacio, con un pixel que está constituido por una alta heterogeneidad en la distribución espacial de SWE).

Respecto a la evapotranspiración, el modelo VIC reproduce bien los valores de ETo en los periodos de mayor flujo hacia la atmósfera, pero presenta un sesgo positivo respecto las estimaciones de invierno obtenida en base a estaciones INIA. En relación a la evapotranspiración potencial, VIC y MODIS presentan resultados distintos. El producto MODIS tiende a generar valores muy altos de ETP, mientras que VIC es más acotado. Además, MODIS entrega resultados mucho más homogéneos espacialmente que VIC para los pixeles de las cuencas. El modelo VIC entrega mejores resultados en términos de la variabilidad espacial, pero a simple vista, estaría generando valores de ETP relativamente bajos. Esto puede ser fruto, al menos en las zonas agrícolas, de los tipos de cobertura vegetal seleccionados como representativos. Se recomienda una revisión a la parametrización de estas componentes para mejorar los resultados, la que debería efectuarse por los consultores que continúen con futuras etapas de la actualización del balance hídrico. En relación a la evapotranspiración real, los resultados de ET parecieran estar subestimados por el modelo.

9.1.2. VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO

Para analizar la influencia de la variabilidad climática en cuencas chilenas en el período 2030-2060 se escogieron cuatro modelos climáticos globales, MCGs, según su comportamiento histórico y futuro, siendo seleccionados CCSM4 (CC), CSIRO-Mk3-6-0 (CS), IPSL-CM5A-LR (IP) y MIROC-ESC (MI). Estos modelos representan simulaciones de sensibilidad baja moderada, baja extrema, alta extrema y alta moderada respectivamente.

Los resultados de cambio hidrológico ilustran distintas narrativas, dependiendo de la región de interés. Por ejemplo, todas las proyecciones en la cuenca del río Loa indican que la escorrentía media anual aumentará al menos cuatro veces en comparación con condiciones actuales, debido principalmente a la disminución de la sublimación. Los resultados para la cuenca del río Choapa reflejan una “aceleración” del ciclo hidrológico, es decir, una disminución en la precipitación total, con una mayor fracción de ella en forma líquida y una aceleración del derretimiento de nieve producto del aumento de temperatura. Tanto en la cuenca del río Maipo como la cuenca del río Imperial, las proyecciones indican una disminución en la precipitación y escorrentía media anual, sin cambios importantes en la estacionalidad de ésta última. Sin embargo, los resultados obtenidos para la cuenca del río Aysén (donde un GCM proyecta un considerable aumento en la precipitación y escorrentía durante los meses de invierno) ilustran las discrepancias que pueden existir entre distintos modelos climáticos.

En virtud de estos resultados, es importante destacar la importancia de incorporar distintas fuentes de incertidumbre al cuantificar impactos de cambio climático, además de la elección de los MCGs. Dichas fuentes incluyen, entre otras, la elección de escenarios (por ejemplo, Vano et al. 2015), tipo de escalamiento modelos climáticos regionales o estadístico (por ejemplo, Mizukami et al. 2016), y la elección de la estructura de modelo hidrológico (por ejemplo, Najafi et al. 2011; Surfleet et al. 2012), que pueden afectar de distinta forma los resultados.

9.1.3. COMPARACIÓN CON EL BALANCE HÍDRICO DE 1987

En términos de las forzantes obtenidas, estas se compararon a nivel nacional y se aprecia una tendencia a menores precipitaciones y temperaturas más altas, las que son reforzadas por el análisis de tendencias en las estaciones meteorológicas utilizadas, estas diferencias indicarían que en el periodo (1985-2015) se tendría a nivel nacional 265 mm de lluvia anual menos que en el periodo (1950-1980). En términos de temperatura, a nivel nacional se tienen diferencias de 0.28 °C más cálidos respecto al balance hídrico DGA (1987).

A nivel de las cuencas piloto, las diferencias de precipitación media anual entre ambos productos superan los 300 mm en algunas celdas de las cuencas de Loa y Choapa, mientras que hacia el sur las discrepancias son cercanas a los 3000 mm en algunos sitios. Para el caso de temperatura media anual, también se observaron diferencias máximas cercanas o superiores a 5° C en las cinco cuencas piloto, destacando (en el caso de la cuenca del río Aysén) una heterogeneidad espacial considerable en las diferencias entre los dos productos. Por su parte, también se observaron diferencias importantes en los flujos de evapotranspiración. Las diferencias se deben, por una parte, a la diferencia existente en la información meteorológica de precipitación y temperatura, pero por otra parte, están fuertemente relacionadas al método de estimación utilizado, ya que para el balance de 1987 se utilizó el método de Turc para el cálculo de isolíneas de evapotranspiración anual acumulada. Este método es un ajuste empírico para la evapotranspiración real anual que solo considera la temperatura y precipitación promedio anual, por lo que carece de una correcta representación del fenómeno, ya que no considera la demanda evapotranspirativa derivada de la radiación solar ni del déficit de presión de vapor desde la atmósfera, ni tampoco la influencia de la cobertura vegetal o tipo de suelo, así como tampoco las variaciones estacionales de las condiciones hidrometeorológicas.

Sin embargo, es importante destacar que los resultados de este son comparables de forma referencial con el balance hídrico de 1987 debido a diferencias metodológicas. Éstas incluyen, principalmente, diferentes períodos de análisis considerado, así como también el uso de una metodología única, aplicada de manera consistente, para el cálculo de forzantes meteorológicas y variables hidrológicas en las cinco cuencas piloto (salvo excepciones relacionadas con la conversión de escorrentía observada a régimen natural, como en el caso del río Loa).

En el caso de la meteorología base, el presente estudio propone una metodología basada en mediciones *in situ*, combinando modelos estadísticos con métodos de interpolación. Lo anterior representa un avance importante, con respecto al balance hídrico de 1987, desde un enfoque que tiene una fuerte componente subjetiva, a un enfoque basado en decisiones objetivas en la modelación estadística y con una etapa de evaluación robusta, en línea con esfuerzos reportados recientemente en otros países (por ejemplo, Livneh et al. 2013; Newman et al. 2015), con el valor agregado de estimación de incertidumbre. Como resultado, el producto 2017 genera una

distribución espacio-temporal de variables meteorológicas más realista y consistente con la heterogeneidad geográfica de Chile Continental.

En cuando a la caracterización hidrológica, el uso de un modelo con motivación física permitió obtener mucha más información que el balance hídrico de 1987, incluyendo variables de estado (por ejemplo, equivalente de agua en nieve y humedad del suelo) y variables de flujo (por ejemplo, flujos evapotranspirativos, recarga a los acuíferos), así como su variación estacional. Finalmente, la inclusión de escenarios de cambio climático (con estimaciones de cambio hidrológico) constituye una fuente de información imprescindible para futuras decisiones relacionadas con la administración y planificación de recursos hídricos en cuencas chilenas. Por lo tanto, es de esperar que futuras extensiones de este trabajo incorporen una caracterización de la sensibilidad hidrológica a cambios en el clima a lo largo del territorio nacional, incorporando estimaciones de incertidumbre.

9.2. RECOMENDACIONES

En vista de los resultados de la aplicación de la metodología de balance en las cuencas piloto, se considera pertinente re-visitarse algunas decisiones de modelación y análisis. Las principales recomendaciones se indican a continuación:

9.2.1. FORZANTES METEOROLÓGICAS

En cuanto a las precipitaciones, se recomienda:

- Aumentar el número de estaciones y su ubicación en particular en zonas remotas como la Patagonia, así como en zonas de alta cordillera, especialmente entre las regiones de Atacama y Los Lagos que permitan reducir la incertidumbre del producto aquí generado.
- Analizar la incorporación de productos de radares como TRMM³ y GPM⁴, así como reanálisis de nueva generación, en particular para mejorar la estimación de la precipitación basada en este tipo de productos y caracterizar mejor el gradiente orográfico de precipitación que posee una baja representatividad en las estaciones superficiales.
- Probar de manera más extensiva la agregación espacial de las estaciones y su uso en la calibración de los campos de reanálisis.

En cuanto a las temperaturas, se recomienda

- Mejorar la representatividad espacial de las estaciones superficiales, especialmente en zonas donde existe escasez de información.
- La incorporación de modelos físicos sencillos que den cuenta de los términos advectivos que en algunas ocasiones pueden dominar el balance de energía en píxeles en que haya un cambio abrupto del tipo de terreno, lo que puede disminuir la incertidumbre en los términos del balance que dependen de la temperatura como la evapotranspiración y la sublimación.

Respecto al enfoque estadístico:

- Se recomienda explorar el uso de transformaciones a la precipitación diaria, así como explorar otras técnicas de regresión para la estimación de forzantes meteorológicas como, por ejemplo, modelos lineales generalizados (McCullagh & Nelder 1989) o modelos no paramétricos (Loader 1999).
- Se sugiere reducir el número de variables predictoras en los modelos estadísticos de P, Tx y Tn mediante selección *stepwise* en base a criterio de información de Akaike (Akaike 1974) o mediante el uso de regresión de componentes principales (por ejemplo, Mevik and Wehrens, 2007).

³ Sigla en inglés para “Tropical Rainfall Measuring Mission”.

⁴ Sigla en inglés para “Global Precipitation Measurements”.

- Se sugiere efectuar el proceso de validación cruzada de las forzantes en todas las estaciones, para verificar la capacidad predictiva de los modelos estadísticos. Y cuantificar de este modo sesgos en la estimación de este tipo de forzantes.

Se recomienda explorar, como alternativa metodológica y punto de referencia para zonas de gran elevación y carentes de estaciones pluviométricas, la generación de precipitación a nivel nacional mediante *downscaling* dinámico con alta resolución espacial.

Se señala que las recomendaciones anteriormente descritas se plantea analizarlas en futuras etapas, puesto que no es posible conocer a priori las macro-zonas climáticas donde el producto desarrollado en el presente proyecto no representa adecuadamente las condiciones hidroclimáticas en zonas no instrumentadas. Esto último podrá ser evaluado para la modelación de todas las cuencas del país.

9.2.2. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

En función de lo anterior y de los resultados obtenidos en las cuencas piloto, se recomienda:

- El desarrollo de una base de datos de cuencas a nivel nacional, que incluya variables hidroclimáticas a resolución diaria (en particular de caudales en cuencas controladas), así como una caracterización física (es decir, geología, suelos cobertura vegetal) de cada cuenca para una mejor comprensión de procesos, estimación de distribución *a priori* de parámetros y evaluación de resultados de la modelación hidrológica.
- Realizar una clasificación de las cuencas controladas en régimen natural, en base a su comportamiento hidrológico, el cual puede ser cuantificado con medidas de diagnóstico tales como el coeficiente de escorrentía (balance hídrico) o pendiente de la curva de duración diaria (velocidad de respuesta de la cuenca), entre otros (Yilmaz et al. 2008).
- Investigar, además, la relación entre similitud física, similitud climática y similitud hidrológica a lo largo del territorio nacional para facilitar el diagnóstico sobre las fortalezas y debilidades del modelo hidrológico escogido, así como la formulación de hipótesis alternativas para procesos cuyos resultados fueron deficientes (por ejemplo, flujo subsuperficial en la cuenca del río Loa).

Independientemente de la(s) estructura(s) de modelo(s) escogida(s) para la estimación del balance a nivel nacional, se recomienda:

- Incorporar rastreo de caudales si la modelación hidrológica se efectúa a nivel diario.
- Realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo, utilizando múltiples medidas de diagnóstico (Viglione et al. 2013) para identificar si existen grupos de parámetros sensibles a una métrica en particular, descomponiendo el proceso de calibración en problemas de optimización más simples.
- Implementar una metodología de calibración que permita transferir (es decir, regionalizar) parámetros hacia cuencas no controladas.

- Incorporar múltiples funciones objetivo (basadas en medidas de diagnóstico) en el proceso de calibración, buscando representar de mejor forma diversos procesos como escorrentía, cobertura nival, entre otros.

9.2.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración real es una variable física que presenta una gran dificultad en su monitoreo. Los métodos de medición requieren instrumental sofisticado, de difícil mantención y operación y normalmente de alto costo (Torres de Flujo, Medidores de Raon de Bowen, Lisímetros, Scintilómetros, etc). Sin embargo, hay dos sugerencias que pueden ayudar a la conformación de una red de verificación de procedimientos basados en imágenes de satélite.

- Se sugiere que se integre la información disponible de tanques evaporímetros y estaciones meteorológicas, en un único sistema donde esta información esté disponible en línea (DGA, INIA, CEAZAMET, entre otros). En este sistema integrado, la información debería ser consistente (e.g., frecuencia de muestreo similar, mismas unidades) de modo que el acceso a la información sea el adecuado con respecto al avance tecnológico actual.
- Se recomienda que se actualice la red de evaporímetros del país, pues existe una cantidad relevante de tanques evaporímetros que están no vigentes. Por ejemplo, el año 1990 se llegó a tener 40 tanques evaporímetros funcionando, mientras que en el año 2015 solamente 18 estaban vigentes.
- En zonas áridas con suelos desnudos, donde la napa es superficial, se recomienda mejorar la información de niveles del agua subterránea. Esto permitirá estimar evaporación real a partir de la profundidad de la napa. Por otro lado, en zonas irrigadas se sugiere iniciar una red de monitoreo del contenido de humedad de la superficie del terreno, para poder estimar de mejor manera la evapotranspiración de referencia y poder verificar el desempeño de modelos de simulación.
- Implementar una red de mediciones de humedad de suelo que permita corregir las estimaciones de ET real mediante ecuaciones del tipo Jarvis-Stewart y que a su vez sea un segundo elemento de verificación de los modelos ya que las variaciones del contenido de humedad en el tiempo en intervalos pequeños son un buen estimador del flujo de evapotranspiración real.

9.2.4. RECARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA

El análisis de la información disponible de las aguas subterráneas ha revelado que la red de monitoreo presenta en la actualidad algunas deficiencias en la distribución de los pozos de control, en la frecuencia de las mediciones y, en el estado técnico de las captaciones. A la luz de estas evidencias, sería recomendable considerar las siguientes opciones:

- Instalar una red de monitoreo estratégicamente diseñada para que permita un control exhaustivo del recurso hídrico subterráneo. Las redes de monitoreo tienen que permitir detectar, en tiempos acotados, los cambios generales en el flujo y evaluar el impacto de posibles riesgos al recurso hídrico subterráneo. Es imperante la necesidad de un control espacial que permita observar las aguas subterráneas en áreas alejadas de los ríos, en las áreas más próximas a los cambios litológicos que configuran los límites en superficie de los acuíferos. Entendiendo que la inversión para tal propósito es mayor, se aconseja priorizar los acuíferos en función de la dependencia de las actividades y de la sociedad de este recurso y, espacialmente, se debería dar énfasis a las posibles zonas de recarga teniendo en consideración que dada la configuración territorial del país, las zonas de pre-cordillera se configuran como tales.
- Es necesario instalar pozos de observación dedicados exclusivamente al monitoreo de agua, ya que las captaciones productivas se ven afectadas por el ciclo de abatimiento-recuperación que tiene un impacto directo en los niveles estáticos y, claramente, también en su medición.
- Instrumentar la red de monitoreo y considerar diferentes pozos por cuenca hidrográfica con registradores automáticos (*divers*) que almacenen los datos diarios no solo del nivel del agua sino también de otros parámetros como la temperatura y la conductividad eléctrica. Las medidas en cortos intervalos de tiempo en puntos clave ayudarían a identificar los flujos de recarga y las respuestas de los acuíferos a estos procesos. Este tipo de instrumentación requiere la adquisición de la información durante las visitas a terreno o, la trasmisión remota a una computadora. De esta forma, se asegura la fiabilidad del dato y su gestión inmediata.

Respecto a los cálculos de las recargas potenciales mediante la modelación hidrológica, se recomienda:

- La realización de modelos conceptuales hidrogeológicos previos a los modelos matemáticos computacionales, con el fin de comprender el funcionamiento de cada sistema: los mecanismos de recarga, las zonas de recarga, el sistema hídrico subterráneo y los procesos hidrogeológicos principales que controlan la circulación de los fluidos. Este punto requiere inversión tanto en recopilar información geológica de detalle como el uso de la geofísica para establecer las geometrías de los sistemas acuíferos.
- Generar mapas con información hidrogeológica a partir de datos en terreno mediante ensayos y pruebas (por ejemplo, de infiltración) con el fin de ocupar datos reales en el cálculo de la recarga de agua subterránea. De esta forma, el cálculo de la recarga no sería solo producto de una calibración de otras variables.

- La utilización de la información del tipo de suelo del CIREN, en el caso de que se encuentren disponibles, es fundamental ya que ésta entrega datos texturales de los primeros metros de suelo más que del tipo de roca madre permitiendo así una valoración más precisa de la capacidad de infiltración.

9.2.5. VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO

- En base a un mayor número de modelos climáticos (MCG's), se recomienda efectuar una caracterización de la interacción entre cambios de precipitación y temperatura, así como los efectos de dicha interacción en las estimaciones de cambio hidrológico.
- Se recomienda analizar la incorporación de otras fuentes de incertidumbre en la 'cascada de decisiones' (Wilby & Dessai 2010), de acuerdo narrativas posibles en cada zona de estudio (Clark et al. 2016). Esto podría incluir, por ejemplo, un pequeño *ensemble* de métodos de *downscaling* y modelos hidrológicos, incorporando además incertidumbre paramétrica.
- Con el fin de tener proyecciones que consideren toda la dinámica de la atmósfera se sugiere explorar la modelación hidrológica considerando técnicas de escalamiento de los MCG que podría entregar otras señales de cambio hidrológico que las empleadas en este estudio.

Con las medidas anteriormente descritas, sería posible cuantificar en futuros análisis de cambio hidrológico, cambios en la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos.

9.2.6. SOBRE LA ACTUALIZACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO

Debido a que con el paso del tiempo existen nuevas fuentes de información, la actualización del balance podría realizarse de forma sistemática explorando incluso la posibilidad de semi-automatizar estos procesos, a modo de incorporar anualmente las nuevas fuentes de información, principalmente de las forzantes meteorológicas, a escala de cuenca.

Como recomendación, para integrar éstas de forma efectiva, una buena práctica sería que la Dirección General de Aguas pudiese trabajar en conjunto a universidades y centros de investigación, para instalar un sistema de cómputo de alto rendimiento, que permita la consulta y actualización en un periodo de tiempo a evaluar del balance hídrico a nivel nacional⁵, en una plataforma SIG en línea para su expedita distribución en los distintos usuarios.

El paso siguiente, sería que la DGA, en conjunto con otros organismos que otorgan derechos o acciones, disponga de forma eficaz los distintos usos del agua, con el fin de incorporar la disponibilidad real del recurso hídrico, que considere los distintos usos y derechos otorgados, los que no se consideraron en este desarrollo al modelar en las cuencas piloto los procesos físicos en régimen "natural".

⁵ Dependiendo de las capacidades de cómputo esto podría sistematizarse anualmente o a pasos temporales superiores. Se recomienda actualizar el balance hídrico a intervalos lo más inferiores posible a 30 años.

REFERENCIAS

Akaike, H., 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), pp.716–723.

Clark, M.P. et al., 2016. Characterizing Uncertainty of the Hydrologic Impacts of Climate Change. *Current Climate Change Reports*, 2(2), pp.55–64.

Cortés, G. (2016). Gaining insight into Andean snowpack climatology and change using a snow reanalysis approach applied over the Landsat satellite record. Los Ángeles. Tesis para optar al grado de doctor en Filosofía en Ingeniería Civil. Universidad de California. Obtenido de e-Scholarship University of California: <https://escholarship.org/uc/item/1qd302m8#page-1>.

DGA; 1987. Balance Hídrico de Chile.

DGA, 2016. Atlas del Agua.

DGA, 2016b. Análisis efecto en el régimen hídrico por cambio en patrones meteorológicos. Desarrollado por Hídrica Consultores SPA.

Livneh, B. et al., 2013. A long-term hydrologically based dataset of land surface fluxes and states for the conterminous United States: Update and extensions. *Journal of Climate*, 26(23), pp.9384–9392.

Loader, C., 1999. *Local Regression and Likelihood*, New York: Springer.

McCullagh, J. & Nelder, P., 1989. *Generalized Linear Models* Second edi., London: Chapman and Hall/CRC.

Mevik, B. & Wehrens, R., 2007. The pls package: principal component and partial least squares regression in R. *Journal of Statistical Software*, 18(2), pp.1–24.

Mizukami, N. et al., 2016. Implications of the Methodological Choices for Hydrologic Portrayals of Climate Change over the Contiguous United States: Statistically Downscaled Forcing Data and Hydrologic Models. *Journal of Hydrometeorology*, 17(1), pp.73–98. Available at: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JHM-D-14-0187.1>.

Najafi, M.R., Moradkhani, H. & Jung, I.W., 2011. Assessing the uncertainties of hydrologic model selection in climate change impact studies. *Hydrological Processes*, 25, pp.2814–2826.

Newman, A.J. et al., 2015. Gridded Ensemble Precipitation and Temperature Estimates for the Contiguous United States. *Journal of Hydrometeorology*, 16(6), pp.2481–2500.

Rorabaugh, M.I., 1964. Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow. *International Association of Scientific Hydrology*, 63(1), pp.432-441.

Surfleet, C.G. et al., 2012. Selection of hydrologic modeling approaches for climate change assessment: A comparison of model scale and structures. *Journal of Hydrology*, 464–465, pp.233–248.

Vano, J.A. et al., 2015. Selecting climate change scenarios using impact-relevant sensitivities. *Geophysical Research Letters*, 42(13), pp.5516–5525.

Viglione, A. et al., 2013. Comparative assessment of predictions in ungauged basins – Part 3: Runoff signatures in Austria. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(6), pp.2263–2279.

Wilby, R.L. & Dessai, S., 2010. Robust adaptation to climate change. *Weather*, 65(7), pp.180–185.

Wundt, W., 1958. *Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen.*

Yilmaz, K.K., Gupta, H. V. & Wagener, T., 2008. A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model. *Water Resources Research*, 44(9), p.W09417.