

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ACTUALIZACIÓN BALANCE HÍDRICO EN CHILE. METODOLOGÍA Y DESAFÍOS
DE MODELACIÓN**

XIMENA VARGAS M.¹
JAMES McPHEE T.² SEBASTIÁN VICUÑA.³
FRANCISCO SUAREZ³ FRANCISCO MEZA⁴
LINDA DANIELE⁵ ROBERTO RONDANELLI⁶
MIGUEL LAGOS Z.⁷ PABLO MENDOZA⁷ NICOLÁS BAMBACH⁸
JUAN PABLO BOISIER⁹ JAVIER CEPEDA A.¹⁰ NICOLÁS VÁSQUEZ P.¹⁰
DAVID MORALES¹¹ JORGE SANDOVAL¹² ANGELLO NEGRI¹⁰ ALEXIS CARO¹⁰

RESUMEN

Se presenta la metodología elaborada para actualizar el balance hídrico en Chile y se muestran los desafíos de la modelación en las cuencas pilotos seleccionadas en el estudio.

¹ Profesor Adjunto, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – xvargas@uchile.cl

² Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – jmcphree@u.uchile.cl

³ Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile – svcuna@ing.puc.cl – fsuarez@ing.puc.cl

⁴ Profesor Titular, Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile – fmeza@uc.cl

⁵ Profesor Asociado, Departamento de Geología, Universidad de Chile – ldaniele@ing.uchile.cl

⁶ Profesor Asistente, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile – ronda@dgf,uchile.cl

⁷ Investigador Asociado, AMTC – miguel.lagos@amtc.cl – pablo.mendoza@amt.cl

⁸ Director Ejecutivo, Centro de Cambio Global UC, Pontificia Universidad Católica de Chile – nbambach@uc.cl

⁹ Postdoctorante, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile – jboisier@dgf.uchile.cl

¹⁰ Ayudante de Investigación, Universidad de Chile – nvasquez.plac@gmail.com – j.cepeda.abad@gmail.com – anegri024@gmail.com – dennyscaro@ug.uchile.cl

¹¹ Investigador Asociado, Centro de Cambio Global UC, Pontificia Universidad Católica de Chile – dlmorale@uc.cl

¹² Investigador, Centro de Cambio Global UC, Pontificia Universidad Católica de Chile – jcsandov@uc.cl

1. INTRODUCCIÓN

El Balance Hídrico Nacional (DGA, 1987) fue concebido como una herramienta que permitiría determinar la disponibilidad del recurso hídrico a nivel de cuenca, considerando para esto la ecuación (1), que se basa en un balance de masa simplificado y no una caracterización de los procesos físicos asociados al ciclo hidrológico.

$$\bar{P} - \bar{Q} = \bar{E} + \eta \quad (1)$$

Donde \bar{P} es la precipitación media del período y del área, \bar{Q} el caudal medio del período y del área efluente neto de la cuenca, \bar{E} las pérdidas medias del período y del área y η un término de discrepancia¹³.

La actualización del producto que inicia la DGA en 2016, a través del trabajo de los Departamentos de Ingeniería Civil, Geofísica y Geología y el Centro Avanzado de la Minería de la Universidad de Chile junto al Centro de Cambio Global y el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Universidad Católica de Chile, tuvo por objetivo desarrollar una metodología reproducible y viable que permita tener en cuenta la representación de procesos físicos en la estimación de la disponibilidad del recurso hídrico. De este modo, se procura tener un producto robusto y que permita incorporar cambios en los usos de suelo, así como las proyecciones de cambio climático esperadas para todo el territorio nacional.

Para llevar a cabo el estudio se considera la utilización del modelo de simulación hidrológica Variable Infiltration Capacity, VIC, (Liang et al, 1994) y se fijan los siguientes objetivos específicos:

- Determinar bases de datos meteorológicas rasterizadas para todo el territorio nacional de precipitación y temperaturas.
- Comparación a nivel climatológico del balance hídrico respecto al balance de 1987 (DGA, 1987).
- Definir metodologías de validación de diversos componentes del ciclo hidrológico a nivel de cuencas y contrastarlas con las metodologías existentes en el modelo hidrológico VIC.
- Determinación de las variables que influyen en el balance y que son afectadas por la variabilidad climática, considerando su respectivo análisis de sensibilidad.

Las cuencas que se modelan se seleccionan de acuerdo a la representación que tienen respecto de las cuatro macrozonas en las que se divide Chile continental (Norte, Centro, Sur y Austral). Para la zona norte se escogen dos cuencas (Loa y Choapa), mientras que para el resto de las macrozonas se escogen las cuencas de los ríos Maipo, Imperial y Aysén respectivamente.

¹³ Ecuación extraída del Balance Hídrico Nacional, DGA (1987).

Tendencias históricas en temperatura y precipitación

Observaciones de temperatura y precipitación en la zona central de Chile para un periodo entorno a los últimos 30 años presentan tendencias, en general, al aumento de la temperatura y disminución de las precipitaciones. Falvey y Garreaud (2009) presentan tendencias de temperatura en la zona norte y centro de Chile (17° - 37° S) para el periodo comprendido entre 1979 - 2006. En este caso, se observó un patrón disímil entre las zonas costeras y las zonas de valle y cordillera. En el caso del valle central y la zona occidental de los Andes, Falvey y Garreaud (2009) presentan una tendencia al alza de la temperatura, con un incremento de aproximadamente $0,2^{\circ}\text{C}$ por década, mientras que las observaciones en la costa presentaban una disminución de la temperatura. Sin embargo, al considerar un periodo más reciente (1985 – 2015), las tendencias hacia el aumento de temperatura comienzan a ser más consistentes en todo el territorio, pero los incrementos más significativos siguen tomando lugar en las zonas de valle y precordillera. En relación a las precipitaciones, a lo largo de los siglos XX y XXI las tendencias observadas son débiles y dependen de la región y periodo considerados en el análisis. En la zona norte (18 - 30° Sur) las precipitaciones a lo largo del siglo XX presentaron un importante grado de variabilidad interdecadal asociada a las fases del fenómeno “El Niño” Oscilación del Sur (ENSO) (Montecinos et al., 2000; Montecinos y Aceituno, 2003). En el caso de la zona central (30 - 35° Sur), las precipitaciones presentan variaciones interanuales asociadas a ENSO (Montecinos y Aceituno, 2003) e interdecadales asociadas a la oscilación decadal del Pacífico, PDO (Garreaud et al., 2009), mientras que en la zona sur (37 - 43° Sur) se ha manifestado una tendencia a la disminución desde mediados del siglo pasado (Quintana y Aceituno 2012). Sin embargo, al considerar el periodo 1979-2015, se evidencia una tendencia más significativa a la disminución de la precipitación a lo largo de la zona centro sur de Chile (Boisier et al., 2016). En el periodo 2010-2015 la zona centro sur del país (desde Coquimbo hasta la Araucanía) registró un déficit de precipitaciones cercano al 30% (Boisier et al., 2016), con una extensión temporal y espacial sin análogos en el siglo XX. Si bien los modos de variabilidad climática interanual y decadal que influyen la climatología de Chile tienen una huella significativa en las observaciones y tendencias de temperatura y precipitaciones observadas, existe suficiente evidencia para considerar que nuestro clima ha sido y seguirá siendo afectado por el fenómeno de cambio climático antropogénico. Por tanto, el análisis de variables hidro-climatológicas debiese considerar metodologías para incorporar los cambios y la incertidumbre asociada a los cambios climáticos que afectan a Chile.

2. METODOLOGÍA

En esta sección se detalla brevemente el modelo VIC y las consideraciones necesarias para su uso, la modelación de cuencas en régimen natural e intervenidas y las macrozonas en las cuales se dividió Chile continental.

Modelo Variable Infiltration Capacity (VIC)

El modelo “Variable Infiltration Capacity” (VIC) es semi-distribuido, de base física y está diseñado para grandes zonas representadas mediante pixeles de tamaño mucho mayor a un kilómetro. Como en zonas de gran heterogeneidad esto puede ser insuficiente, es posible incluir

“n” tipos de vegetación (o usos de suelo) en cada pixel, además de crear bandas de elevación para incluir el efecto topográfico sobre las forzantes (precipitación y temperatura). Cada tipo de uso de suelo, en cada pixel, es representado mediante su índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés), fracción de vegetación y por el porcentaje de raíces que cada uso de suelo tiene en las distintas capas del mismo. A pesar de que existen muchos procesos representados en VIC, los principales corresponden a la evapotranspiración, acumulación y derretimiento de nieve, infiltración y generación de flujo base y escorrentía superficial. Adicionalmente, se estima un balance de energía donde la incógnita es la temperatura del suelo, y para cada paso de tiempo ésta se debe iterar para cerrar dicho balance.

En la Figura 1 se muestran los procesos de evaporación desde suelo desnudo (E_1), evaporación de agua interceptada en el follaje (E_c), transpiración (E_t), precipitación (P), escorrentía producto de la precipitación en exceso (R), flujo base (B) y el traspaso de agua entre las distintas capas del suelo (Q). Además, se muestra la representación de los usos de suelo en cada pixel. Junto con el balance de masa, VIC realiza un balance energético que depende de la temperatura del suelo, variable que se itera hasta que el balance de energía cierre.

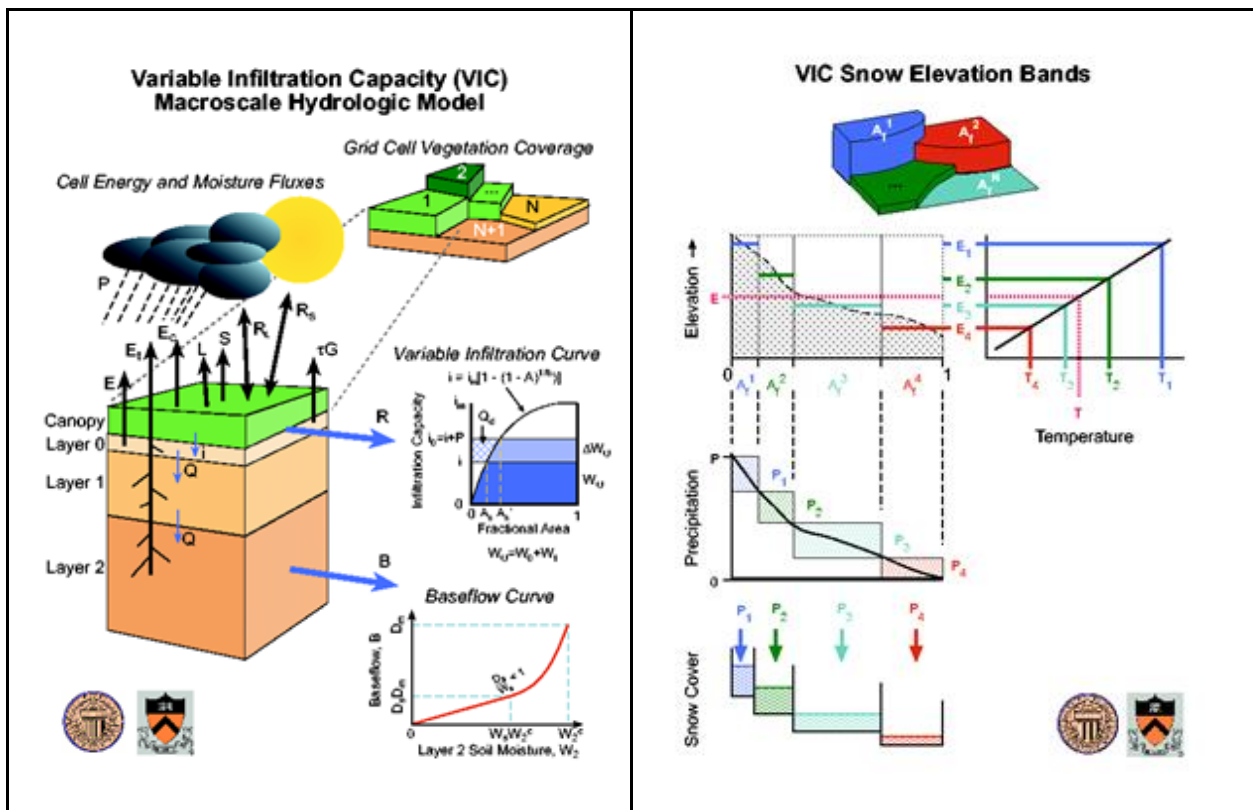


Figura 1: Esquematación del modelo VIC. Fuente: Cherkauer et al., 2003.

De manera adicional, se modelan los procesos relacionados con acumulación, pérdida y derretimiento de nieve, lo que lo convierte en un modelo versátil que se adapta a distintas zonas geográficas del país. Como la representación de VIC es mediante una grilla de “baja” resolución

espacial, es posible incorporar heterogeneidad en cada pixel mediante bandas de elevación, tal como se muestra en la Figura 1, donde la temperatura y la precipitación se distribuyen en cada una de estas bandas, lo cual es altamente ventajoso pues es posible incorporar la gran heterogeneidad que presenta la cordillera de los Andes en la modelación.

No obstante, el suelo, que está representado por distintas capas, no incorpora explícitamente aguas subterráneas ni tampoco flujos laterales subterráneos. En consecuencia, algunos supuestos son necesarios para estimar la recarga de los acuíferos. Una vez que cada celda realiza el balance, los flujos correspondientes a la escorrentía directa y el flujo base son directamente enviados al cauce debido a que no existe conexión entre las celdas, lo cual implica limitantes para representar adecuadamente los procesos subterráneos.

Las forzantes meteorológicas requeridas para la modelación hidrológica con el modelo VIC son: precipitación, humedad relativa, temperatura, velocidad del viento, radiación de onda corta y larga. Además, se requiere información sobre el tipo y uso de suelo, la que se puede obtener tanto desde información satelital como de trabajos realizados por los distintos ministerios chilenos, incluyendo tanto mapas de coberturas y tipo de suelo de Chile como índices de área foliar (LAI) y de vegetación mejorado (EVI).

Modelación

La modelación se lleva a cabo usando un intervalo temporal de 3 horas, debido a la conceptualización del modelo VIC, ya que al trabajar a nivel sub-diario éste permite representar de mejor forma los procesos físicos asociados a los flujos verticales de salida (evapotranspiración y sublimación). Por otro lado, la resolución espacial es de $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ y para modelar se considera como período de spin-up (i.e., inicialización de variables de estado) los años hidrológicos 1979/80-1984/85, con el fin de reducir sesgos en las condiciones iniciales. La calibración se realiza a nivel mensual, promediando los valores observados y los simulados de manera de obtener promedios mensuales, considerando solo los meses que posean más de 15 días de información. El período de calibración y validación es variable, dependiendo de la longitud de registro existente en las distintas estaciones, utilizando aproximadamente $\frac{2}{3}$ de los años hidrológicos existentes para la calibración y $\frac{1}{3}$ para la validación, tratando que en el primer período existan años hidrológicos normales, secos y húmedos. Un ejemplo de la representación espacial de las cuencas se muestra en la Figura 2, donde se aprecia la grilla de $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ para la precipitación media de las forzantes para el período comprendido entre los años hidrológicos 1979-1980 a 2014-2015. El modelo VIC (en este trabajo) considera la grilla de las forzantes meteorológicas para su ejecución.

Para aislar sistemas de regulación y otros factores de origen antropogénico en la obtención de parámetros, se analiza la existencia de sub-cuencas en régimen natural dentro de las cuencas piloto, las que serán modeladas de forma independiente. Adicionalmente, con el fin de analizar de forma separada los procesos hidrológicos más relevantes, la modelación se realiza desde “aguas arriba hacia aguas abajo”, considerando al menos una sub-cuenca de alta montaña donde los procesos dominantes sean la acumulación y derretimiento de nieve.

En celdas afluentes a cuencas con mediciones alteradas por usos consuntivos, se debe estimar las extracciones superficiales para restar dichos caudales a lo estimado por VIC, con el fin de

comparar directamente los caudales con la estación fluviométrica intervenida. En el caso de cuencas extremadamente áridas, donde el riego es despreciable en comparación a los usos consuntivos asociados a procesos industriales y agua potable, se realiza un análisis de la ubicación espacial de dichos derechos de agua, considerando que el inicio de la extracción comienza en el año que se dictó la resolución.

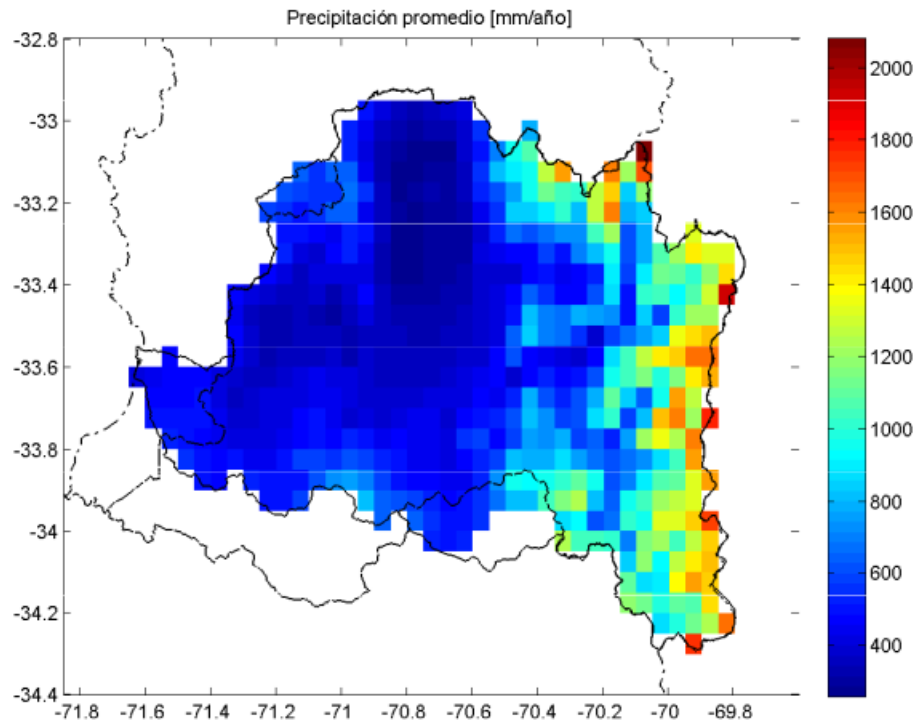


Figura 2: Precipitación media sobre la cuenca del río Maipo según una grilla de $0,05^{\circ} \times 0,05^{\circ}$.
Coordenadas geográficas.

Uno de los lugares donde es especialmente relevante la estimación de las pérdidas evapotranspirativas, es en zonas agrícolas, ya que la diferencia entre la evapotranspiración potencial y la real define la demanda de riego del cultivo. Para incorporar el componente de riego en la modelación, se definieron 4 clases vegetacionales asignadas como cultivo en los parámetros del modelo (un cultivo en el modelo será definido como aquella cobertura vegetacional que será considerada en el cálculo de la demanda de agua por riego). Estas correspondieron a cultivos anuales, frutales, hortalizas y viñas y parronales. Se definieron estas clases debido a que permitían diversificar los cultivos en base a ciertas características vegetacionales definitorias y al tipo de riego utilizado en cada una de ellas, al mismo tiempo que permitían sintetizar información de muchas especies con características similares en una sola clase desde el punto de vista de la modelación. Metodológicamente, la asignación de riego se hace mediante la corrección de la serie de escorrentía superficial simulada sin extracciones en los puntos de enmascaramiento definidos para cada cuenca. El volumen de agua necesario para satisfacer la diferencia entre evaporación potencial y real en áreas cultivadas es sustraído a la escorrentía, siendo este caudal corregido el que se calibra finalmente en el modelo.

A pesar de su importancia, desde el punto de vista metodológico, la evapotranspiración es una variable muy difícil de medir a escala regional (Rodell et al., 2004; Howell, 1990). El modelo VIC calcula la evapotranspiración a partir de las forzantes meteorológicas y los parámetros vegetaciones y de caracterización de los estratos de suelo a través de formulaciones de base física de los distintos subprocesos que la componen. Dada la diversidad de fuentes de información, y la variabilidad intrínseca de los modelos involucrados, se vuelve necesario analizar los resultados de la modelación comparándolos con mediciones y estimaciones en base a observaciones realizadas en terreno u obtenidas de otras fuentes de información como lo son los productos satelitales y de percepción remota. En este trabajo, se utilizó bases de datos de información en terreno de evaporación desde dos fuentes: bandejas evaporímetras de la DGA y estimaciones locales de evapotranspiración en estaciones meteorológicas del INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria) y el CEAZA (Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas). Las estaciones de la DGA registran evaporación desde tanques evaporímetros clase A, con las cuales se entregan valores de evaporación en mm/día. Por su parte, las estaciones del INIA y el CEAZA miden las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa, radiación y velocidad del viento) que permiten estimar la evapotranspiración de cultivo de referencia (ET_0) mediante la ecuación de Penmann-Monteith. En el caso de los productos satelitales, se cuenta con el producto MOD16. Este incluye la evaporación potencial y real acumulada en 8 días. La resolución espacial es de 1 km, y tiene información para todos los lugares que no corresponden a cuerpos de agua, zonas que reciben aporte nival o zonas sin vegetación. El período donde existe información es desde enero de 2001 hasta la actualidad.

Para examinar el desempeño del modelo hidrológico seleccionado, se analizan las siguientes variables:

- Caudal: Se acumulan los resultados de escorrentía superficial total obtenidos a lo largo de la cuenca multiplicados por el área asociada a cada pixel, y se contrastan con el caudal en régimen natural de las distintas estaciones fluviométricas, según la metodología antes planteada de “naturalización” de caudales.
- Evapotranspiración: Se contrastan a nivel de cuenca las estimaciones basadas en observaciones y productos satelitales con los resultados de la modelación. Adicionalmente, con el fin de analizar tanto la variabilidad espacial como los parámetros asociados a los distintos tipos de vegetación, se contrastan algunos pixeles representativos de los distintos usos de suelo.
- Nieve: Se analiza la evolución temporal del equivalente en agua de nieve y la fracción de área cubierta por nieve (SWE y FSCA, por sus siglas en inglés), considerando como información a contrastar las estimaciones de ambas variables realizadas por Cortés, (2016) y/o la información de FSCA obtenida a partir de los productos MODIS, dependiendo de la información disponible.

Como principales parámetros a calibrar, se consideran los asociados al tipo de suelo (que modifican tanto el flujo base como la escorrentía en exceso) y algunos parámetros del modelo de nieve.

El desempeño del modelo se evalúa mediante:

- Criterio Kling-Gupta (KGE, ver ecuación 2) (Gupta et al., 2009; Kling et al., 2012), donde $KGE=1$ representa un ajuste perfecto

- Criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE, ver ecuación 3) (Nash y Sutcliffe, 1970), donde NSE=1 representa un ajuste perfecto, mientras que valores negativos implican que el promedio es un mejor estimador que el modelo analizado; Una de las principales falencias de este criterio es la gran influencia de los valores altos, por lo que para suplir esto también se analiza el logaritmo natural de las variables (NSE_LN) y
- Sesgo estadístico asociado al total de la escorrentía (BiasRR, ver ecuación 4)

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

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o} \quad \gamma = \frac{Cv_s}{Cv_o} = \frac{\sigma_s/\mu_s}{\sigma_o/\mu_o}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_k [X_{s_k} - X_{o_k}]^2}{\sum_k [X_{o_k} - \bar{X}_o]^2} \quad (3)$$

$$\%BiasRR = \frac{\sum_k [X_{s_k} - X_{o_k}]}{\sum_k X_{o_k}} * 100 \quad (4)$$

Donde

r= Coeficiente de correlación entre la simulación y la observación.

β = BIAS.

γ = coeficiente de variación

μ = promedio. S significa simulación y o observación.

σ = desviación estándar. S significa simulación y o observación.

BiasRR= sesgo estadístico asociado a la escorrentía, con X_{s_k} la variable simulada para el día k, X_{o_k} la variable observada para el día k y \bar{X}_o el promedio de la variable observada.

Construcción de Escenarios de Cambio Climático

Con objeto de incorporar escenarios de cambio climático antropogénico en el análisis, se construyeron escenarios futuros (2030-2060) de temperatura y precipitación. Los escenarios de clima futuro fueron construidos mediante la metodología de uso de “deltas” (Ramirez-Villegas et al., 2010). Para el cálculo y la aplicación de la metodología de deltas, se toman cada uno de los puntos ya sea de una grilla espacial con información climática o puntos asociados a estaciones meteorológicas, por ejemplo, para en primer lugar conocer las diferencias existentes entre el periodo historio y futuro (asociado a distintos periodos de tiempo y escenarios) en un determinado modelo de circulación general (GCM por sus siglas en inglés). Se evaluó cambios en el clima considerando el escenario de trayectoria de concentración de emisiones más desfavorable (i.e. RCP 8.5). La selección de modelos de GCM fue realizada en base a una decisión basada en la sensibilidad climática regional y el desempeño del modelo representando

modos de variabilidad climática (i.e. ENSO y SAM). Los modelos seleccionados para la construcción de escenarios fueron: GISS-E2-H, CCSM4, y IPSL-CM5A-LR.

Los deltas fueron calculados en periodos estacionales considerando una media de tres meses comprendida en los periodos Diciembre-Enero-Febrero, Marzo-Abril-Mayo, Junio-Julio-Agosto y Septiembre-Octubre-Noviembre. Previamente las series diarias de los puntos que correspondan se agregan a nivel mensual a partir de promedios simples en caso de las temperaturas y la sumatoria de los montos de agua caída en el caso de las precipitaciones. El valor de delta desde el modelo se obtiene como la diferencia existente entre los valores estacionales futuros (para el modelo y escenario que corresponda) e históricos, para el caso de las temperaturas. En el caso de las precipitaciones, este delta corresponde al cociente, o tasa de cambio del escenario futuro respecto del histórico. A este delta calculado, posteriormente se le aplicó un armónico seno/coseno para llevarlo a una serie diaria anual que exprese los cambios detectados tanto en °C como en % para temperaturas y precipitaciones respectivamente.

$$\text{delta} = \sin\left(\alpha * \frac{\pi}{p} * t\right) + \cos\left(\alpha * \frac{\pi}{p} * t\right) \quad (5)$$

Donde:

α : Coeficiente de forma,

p: periodo (1/frecuencia)
t: paso de tiempo

Los escenarios de cambio climático contruidos permiten cuantificar la magnitud e incertidumbre asociada a los cambios en temperatura y precipitación. Estos escenarios fueron utilizados como variables de entrada en el modelo VIC, con objeto de evaluar el efecto de estos cambios en las otras variables del balance hídrico.

3. RESULTADOS INICIALES

Para cada cuenca se analiza el desglose de la precipitación entre los distintos procesos hidrológicos, lo que permite identificar cuál de ellos domina el balance de masa. Debido a que las cuencas se encuentran intervenidas, los resultados incorporan la intervención por riego. Adicionalmente, se presenta la curva de variación mensual para caudales observados y modelados.

En los siguientes gráficos de este capítulo, la evapotranspiración hace referencia a la suma de los siguientes términos:

$$ET = E_{bare\ soil} + E_{canopy} + T_{veg} + Sub_{snow} + Sub_{canopy} \quad (6)$$

Donde

ET = Evapotranspiración

$E_{bare\ soil}$: Evaporación desde el suelo desnudo

E_{canopy} : Evaporación desde el agua interceptada en el follaje

T_{veg} : Transpiración de la vegetación

Sub_{snow} : Sublimación desde el manto de nieve

Sub_{canopy} : Sublimación de la nieve interceptada en el follaje

Con el fin de mostrar resultados preliminares, solamente se muestra valores en las macrocuencas analizadas (las que se muestran en la Figura 4), y no en las subcuencas. Esto, además, para no incorporar un exceso de gráficos. Todos los valores están sujetos a calibración.

Cuenca del río Loa

Loa en Desembocadura

En la cuenca del río Loa en Desembocadura existe una alta incertidumbre asociada a los derechos de agua consuntivos. Debido a las pequeñas magnitudes del caudal, cualquier extracción (no) considerada o sobredimensionada induce un sesgo que puede ser ficticio.

En la Figura 3 se muestra la curva de variación estacional del caudal modelado (azul) y el observado por la estación más los derechos de agua permanentes y consuntivos, donde se aprecia un importante sesgo que es necesario analizar.

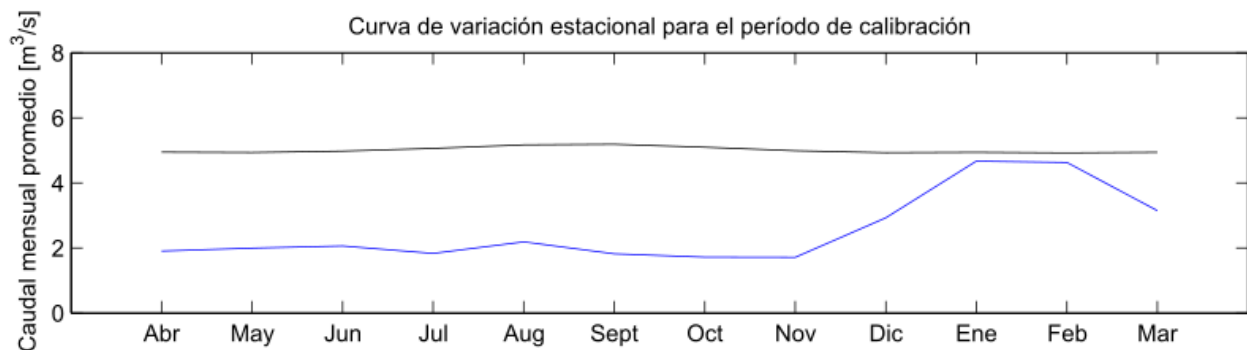


Figura 3: Curva de variación estacional para la estación fluviométrica DGA Loa en Desembocadura. El período de calibración empieza en el año hidrológico 1985-1986 y termina en 2004-2005. En azul se muestra el caudal modelado, mientras que en negro lo observado.

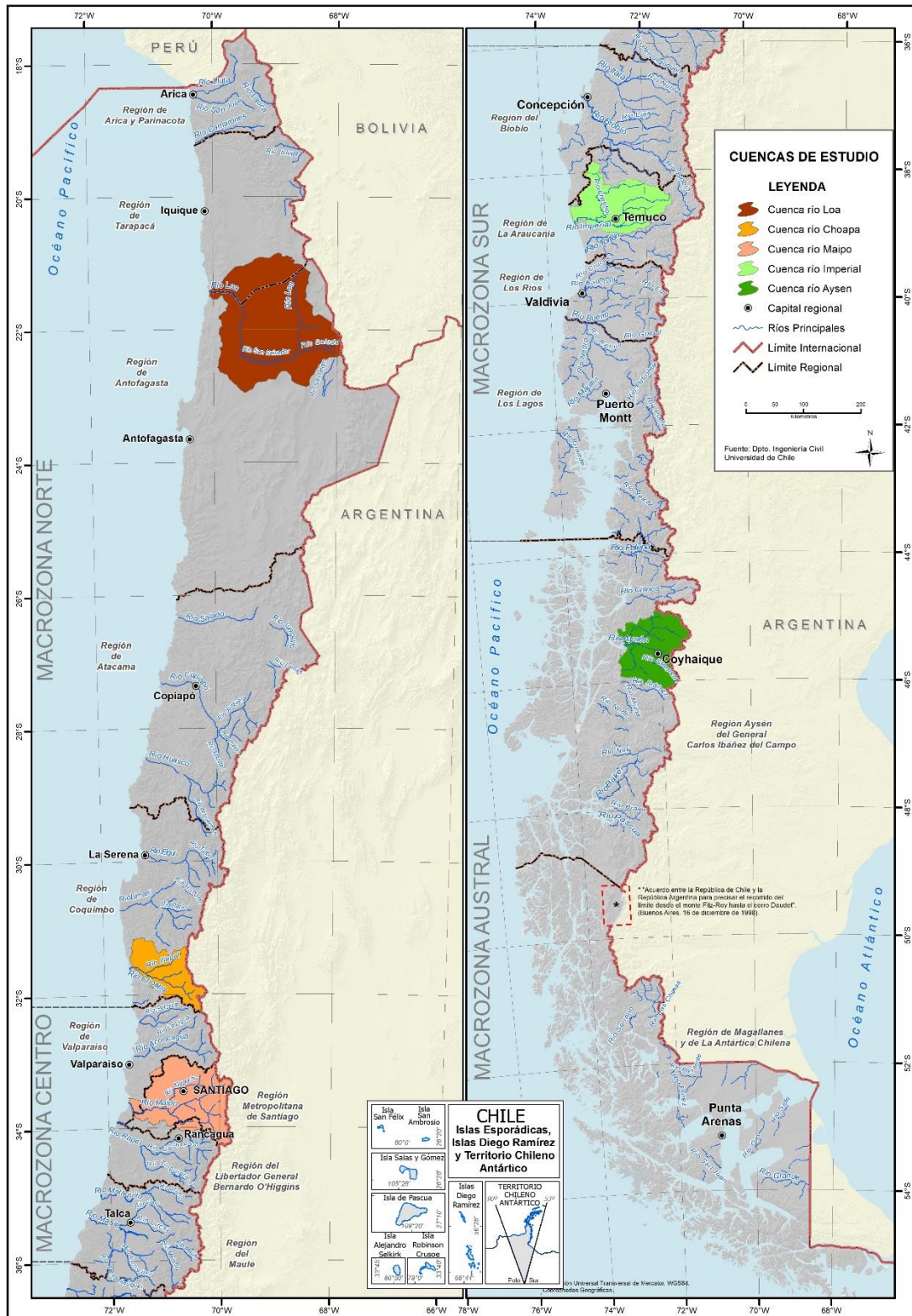


Figura 4: Cuencas pilotos consideradas para validar la metodología propuesta para actualizar el Balance Hídrico Nacional.

En la zona del Norte Grande se espera que la evapotranspiración juegue un rol importante en la hidrología de las cuencas, lo que se aprecia en la Figura 5, donde la evapotranspiración es, según lo modelado, cercana al 90% del volumen de agua disponible.

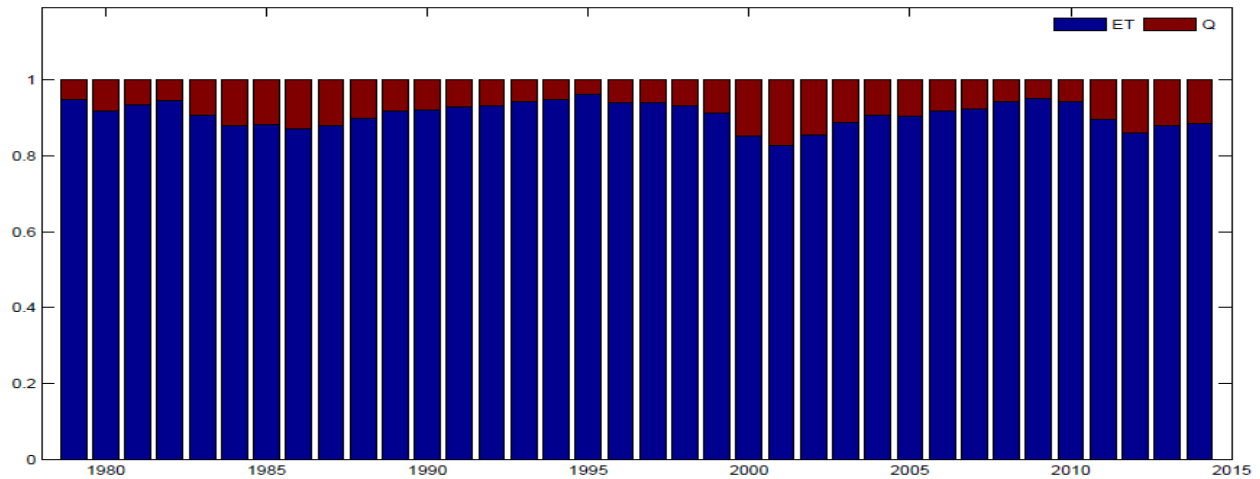


Figura 5: Fracciones de evapotranspiración y caudal modelados respecto a la salida total de volúmenes de agua de la cuenca Loa en Desembocadura.

Desagregando la evapotranspiración dentro de la cuenca, se aprecia en la Figura 6 que ésta proviene principalmente de tres flujos: la evaporación desde el suelo, la evaporación desde el follaje y la sublimación desde el follaje. Como cerca del 20% de la cuenca tiene aportes de precipitación, estos montos corresponden a la parte altiplánica de la cuenca, donde las temperaturas, el viento y la radiación son considerables. Sin embargo, todos esos valores están sujetos, aún, a calibración.

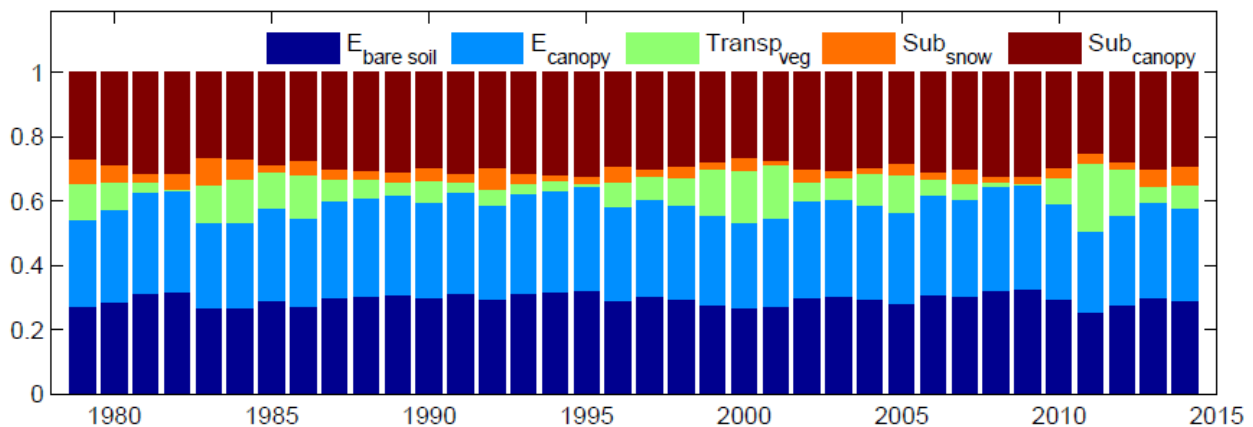


Figura 6: Repartición de los distintos flujos que componen la evapotranspiración respecto a la evapotranspiración total. Cuenca del río Loa en Desembocadura.

Loa en Lequena

La cuenca del río Loa en Lequena se encuentra prácticamente en régimen natural, por lo que los resultados del modelo son comparables con lo registrado por la estación fluviométrica. Esta cuenca se encuentra en la zona alta del río Loa, donde existe un aporte importante de precipitación, tal como se aprecia en la Figura 7, donde el caudal modelado (azul) está por sobre lo observado.

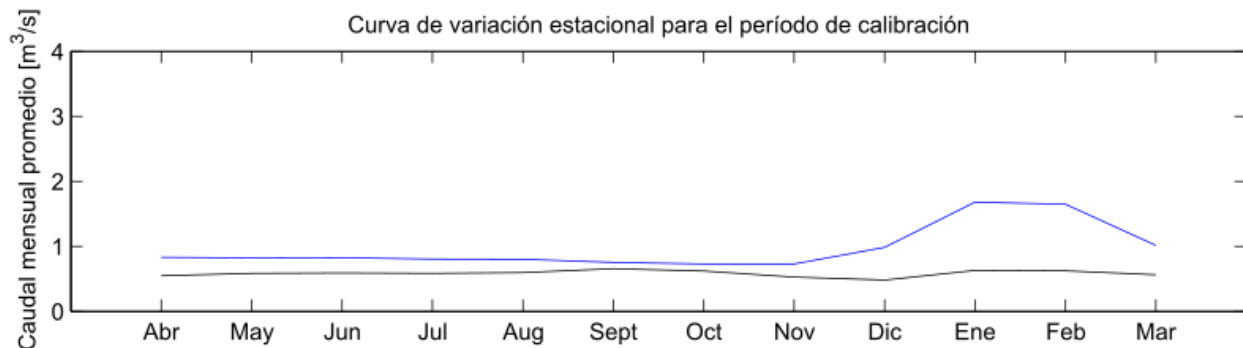


Figura 7: Curva de variación estacional para la estación fluviométrica DGA Loa en Lequena. El período de calibración empieza en el año hidrológico 1985-1986 y termina en 2004-2005. En azul se muestra el caudal modelado, mientras que en negro lo observado

Cuenca del río Choapa

Choapa aguas arriba del Estero La Canela

Esta cuenca incorpora riego, el cual está incluido en la curva de variación estacional de la Figura 8. Se aprecia que aún es necesario disminuir la escorrentía en invierno y aumentar la de verano, la cual proviene principalmente del derretimiento del manto nival en la zona cordillerana.

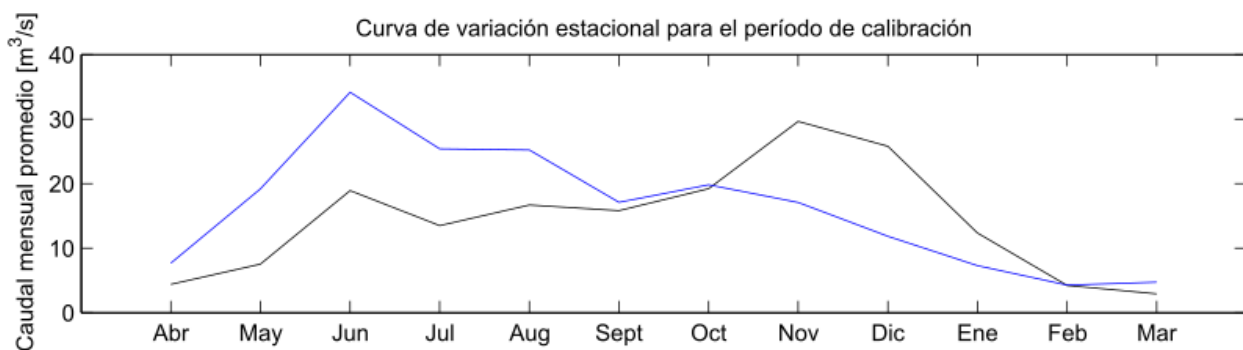


Figura 8: Curva de variación estacional para la estación fluviométrica DGA Choapa aguas arriba del Estero la Canela. El período de calibración empieza en el año hidrológico 1985-1986 y termina en 2004-2005. En azul se muestra el caudal modelado, mientras que en negro lo observado

Al igual que en la cuenca del río Loa, en Choapa la evapotranspiración domina (hasta el estado actual de calibración) los procesos hidrológicos dentro de la cuenca (ver Figura 9).

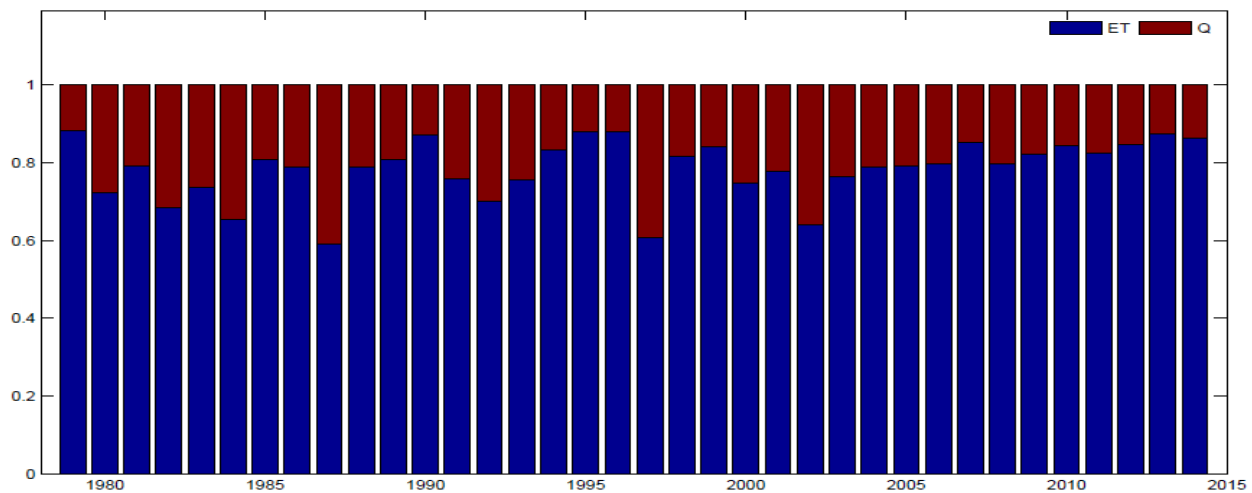


Figura 9: Fracciones de evapotranspiración y caudal modelados respecto a la salida total de agua de la cuenca Choapa aguas arriba del Estero la Canela.

En esta cuenca se aprecia mejor la influencia de la vegetación (ver Figura 10), al aumentar considerablemente el agua transpirada por las plantas. Del mismo modo, el agua interceptada y que es posteriormente evaporada es cercana al 20%, de manera que la influencia de la vegetación representa cerca del 65% del total de agua evapotranspirada.

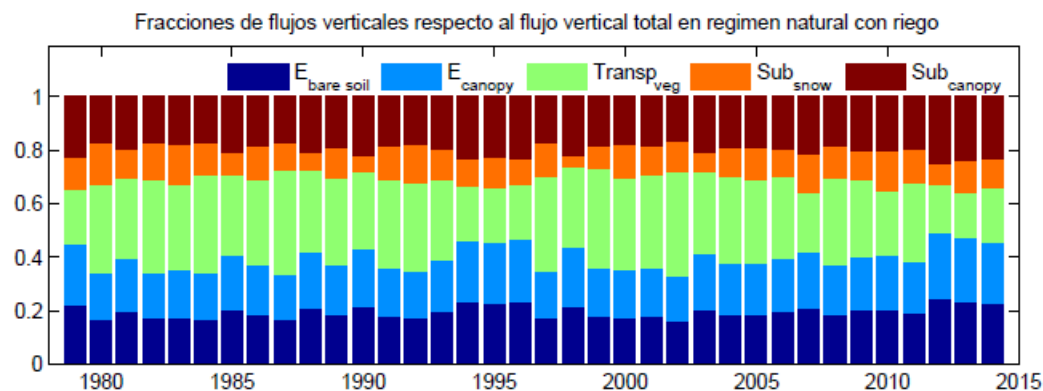


Figura 10: Repartición de los distintos flujos que componen la evapotranspiración respecto a la evapotranspiración total. Cuenca del río Choapa aguas arriba del Estero la Canela.

Choapa en Cuncumén

Choapa en Cuncumén es una cuenca cordillerana que se encuentra en régimen natural. Según la Figura 11 los caudales durante el período de invierno parecen estar relativamente bien representados (aunque con un sesgo), pero los de deshielos están fuertemente subestimados. Esta cuenca ha sido un desafío importante pues las modificaciones de los inputs (especialmente la precipitación) afectan fuertemente la disponibilidad de agua durante el verano. Adicionalmente, el viento juega también un rol importante pues influencia la sublimación, el cual también controla la disponibilidad de agua en cuencas de régimen nival.

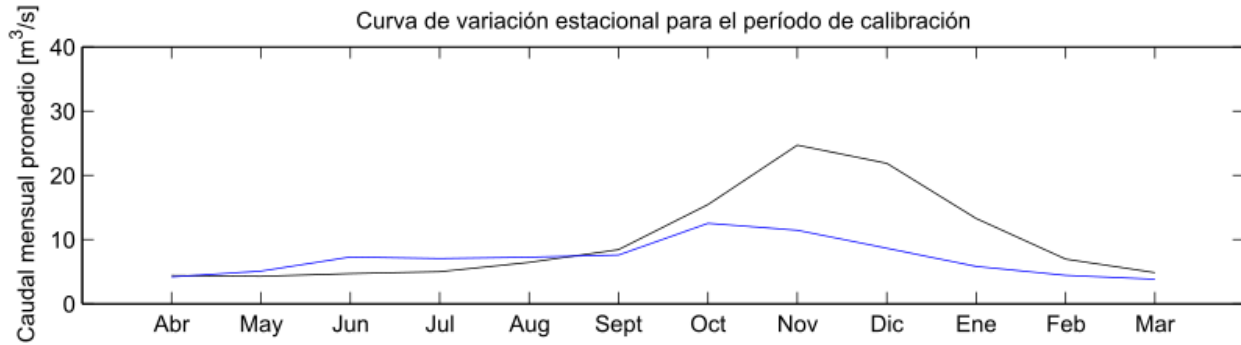


Figura 11: Curva de variación estacional para la estación fluviométrica DGA Choapa en Cuncumén. El período de calibración empieza en el año hidrológico 1985-1986 y termina en 2004-2005. En azul se muestra el caudal modelado, mientras que en negro lo observado.

Cuenca del río Maipo

Maipo en Cabimbao

Esta cuenca engloba casi la totalidad del río Maipo, la cual se encuentra altamente intervenida. La intervención considerada corresponde a la del riego. De la Figura 12 se aprecia que los caudales de invierno están subestimados, mientras que los de verano están sobrestimados, por lo que los parámetros del modelo VIC asociados al suelo deben ser calibrados para lograr representar bien los procesos de escorrentía e infiltración.

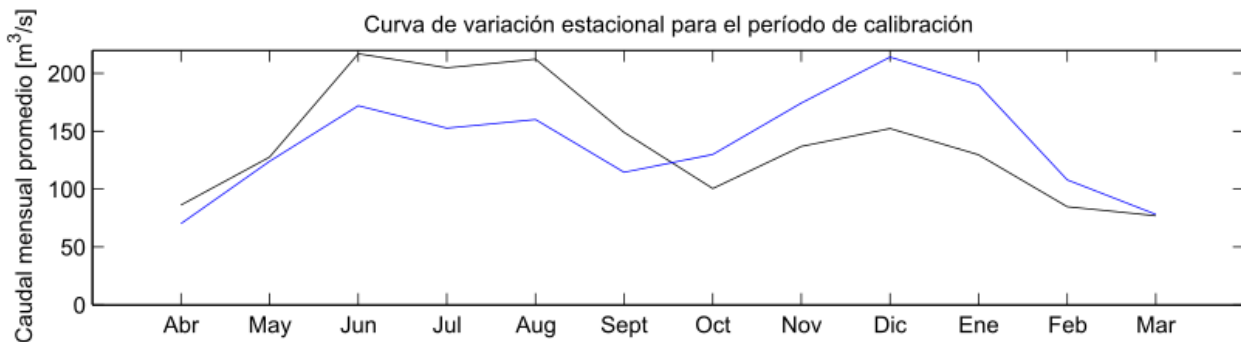


Figura 12: Curva de variación estacional para la estación fluviométrica DGA Maipo en Cabimbao. El período de calibración empieza en el año hidrológico 1985-1986 y termina en 2004-2005. En azul se muestra el caudal modelado, mientras que en negro lo observado.

A medida que se avanza hacia el sur del país, los factores de escorrentía aumentan, tal como lo muestra la Figura 13, donde la escorrentía es cercana al 45% de los flujos totales de salida de la cuenca.

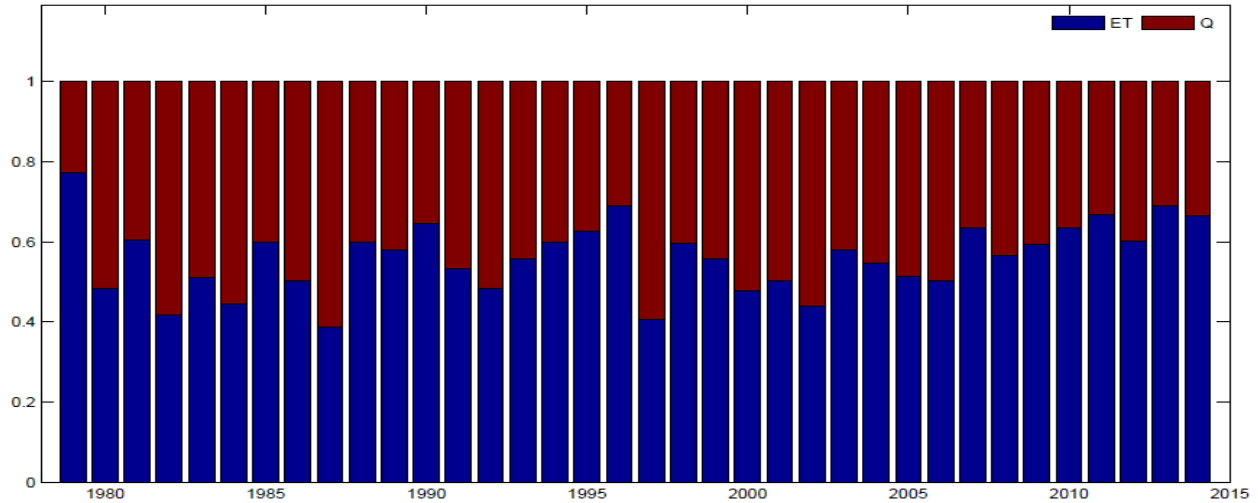


Figura 13: Fracciones de evapotranspiración y caudal modelados respecto a la salida total de agua de la cuenca Maipo en Cabimbao.

Según se muestra en la Figura 13, la transpiración de las plantas se hace más importante en esta cuenca, de modo que la vegetación explica cerca del 70% de la evapotranspiración total.

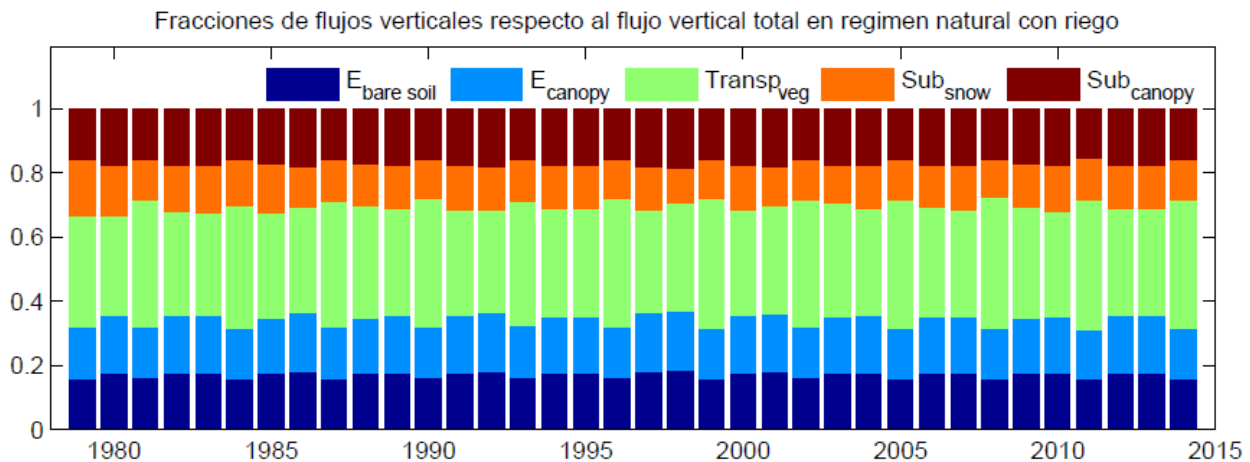


Figura 14: Repartición de los distintos flujos que componen la evapotranspiración respecto a la evapotranspiración total. Cuenca del río Choapa aguas arriba del Estero la Canela.

Maipo en el Manzano

Maipo en el Manzano engloba prácticamente la totalidad de la zona cordillerana del río Maipo. Se muestra, en la Figura 15, que los caudales están bien ajustados, aunque con un pequeño sesgo, el cual puede ser calibrado ajustando algunos parámetros del suelo. Sin embargo, da cuenta que los inputs meteorológicos parecen razonables, especialmente en esta cuenca, donde existe una gran incertidumbre, especialmente en los montos de precipitación.

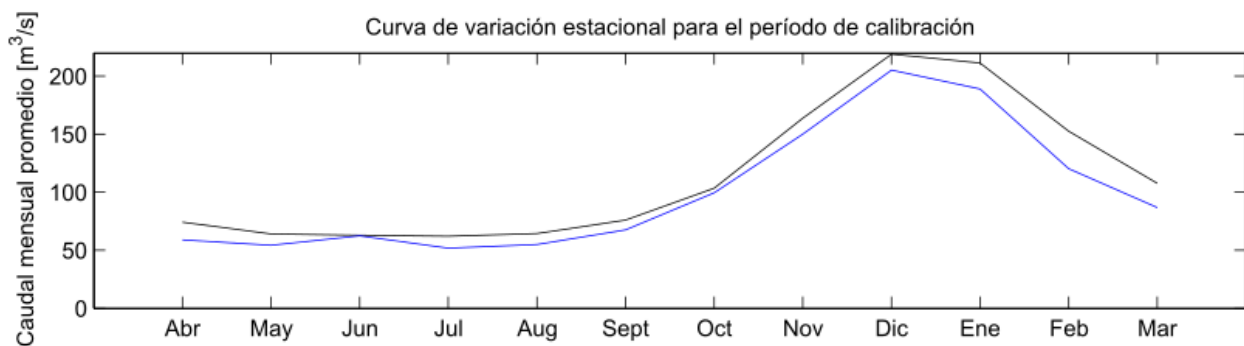


Figura 15: Curva de variación estacional para la estación fluviométrica DGA Maipo en Cabimbao. El período de calibración empieza en el año hidrológico 1985-1986 y termina en 2004-2005. En azul se muestra el caudal modelado, mientras que en negro lo observado.

Cuenca del río Imperial

A diferencia de las cuencas anteriores, el río Imperial no cuenta con estaciones fluviométricas cercanas a la desembocadura. En consecuencia, se controlan dos cuencas importantes (e intervenidas): el río Cholchol y el río Cautín. Adicionalmente, se presenta la curva de variación estacional de caudales para la cuenca Cautín en Rari-Ruca, la cual se encuentra en régimen natural hasta cerca del año 2000.

Cautín en Rari Ruca

En esta cuenca existe un sesgo en caudales durante todo el año, tal como se aprecia en la Figura 16, donde el caudal modelado (azul) es menor al observado. En esta cuenca se debe analizar la evapotranspiración, para ver si es posible mejorar el desempeño del modelo en lo que respecta a los caudales.

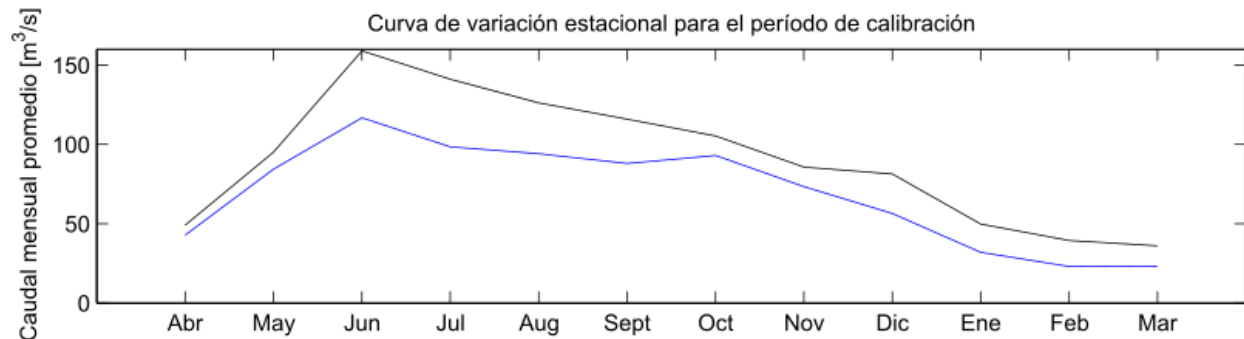


Figura 16: Curva de variación estacional para la estación fluviométrica DGA Cautín en Rari-Ruca. El período de calibración empieza en el año hidrológico 1985-1986 y termina en 1998-1999. En azul se muestra el caudal modelado, mientras que en negro lo observado.

Cautín en Almagro

En esta cuenca existe un sesgo importante durante el período de invierno, el cual podría mejorarse modificando los parámetros de suelo. La Figura 17 incluye las extracciones de riego de la cuenca.

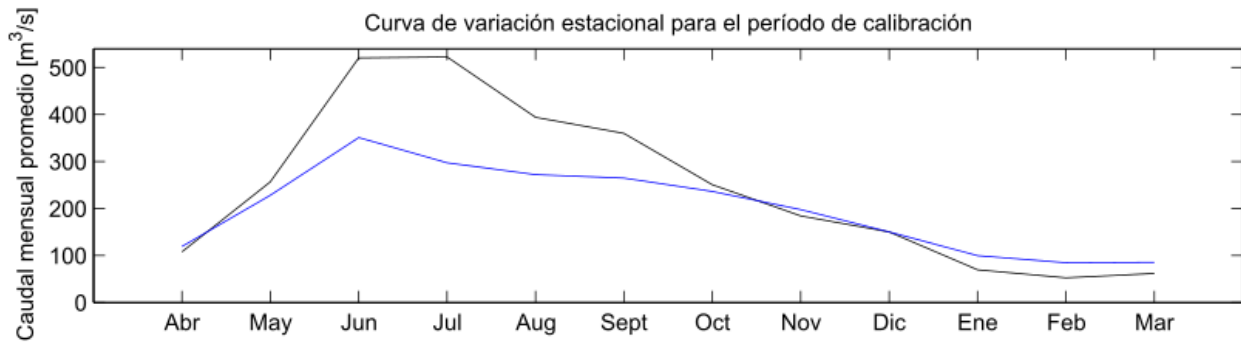


Figura 17: Curva de variación estacional para la estación fluviométrica DGA Cautín en Almagro. El período de calibración empieza en el año hidrológico 1985-1986 y termina en 2004-2005. En azul se muestra el caudal modelado, mientras que en negro lo observado.

La Figura 18 muestra que los procesos de escorrentía son más importantes, pues representan cerca del 70% de los flujos de salida. Sin embargo, es probable que, cambiando los parámetros del suelo, esta fracción aumente, mejorando los caudales de invierno.

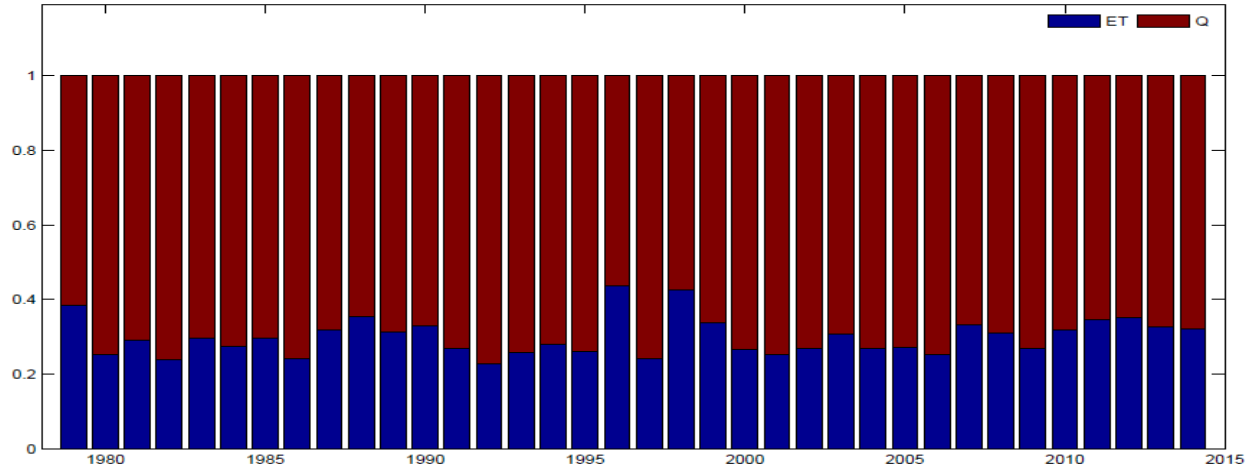


Figura 18: Fracciones de evapotranspiración y caudal modelados respecto a la salida total de agua de la cuenca Cautín en Almagro.

La existencia de grandes bosques en la cuenca implica que cerca del 80% de los flujos evapotranspirativos dependan de la vegetación, según el estado actual de la modelación, tal como se muestra en la Figura 19.

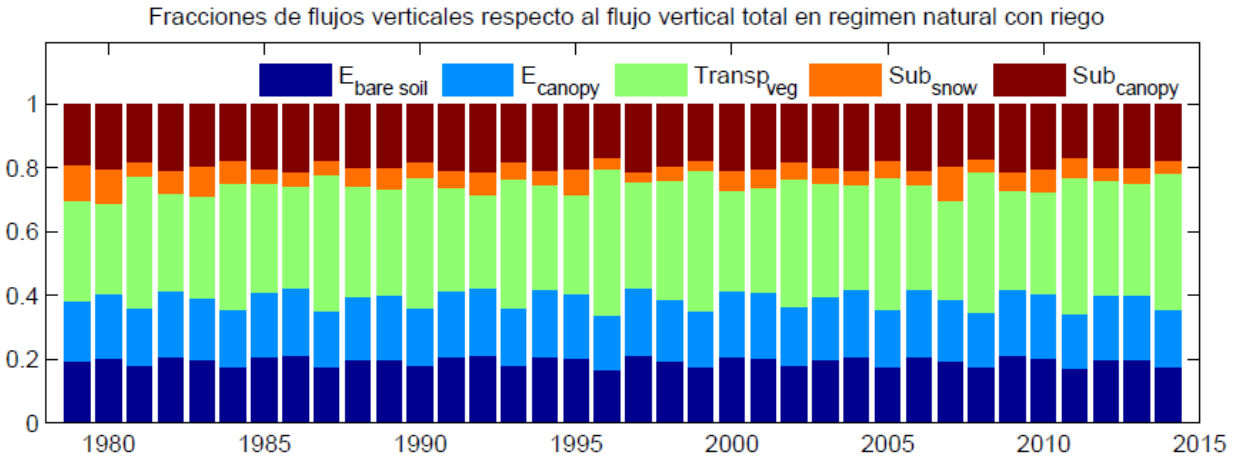


Figura 19: Repartición de los distintos flujos que componen la evapotranspiración respecto a la evapotranspiración total. Cuenca del río Cautín en Almagro.

Cautín en Cholchol

En esta cuenca, que engloba gran parte de la parte norte de la cuenca afluente al río Imperial, ocurre lo mismo que en la cuenca del río Cautín (zona sur de la región de la Araucanía). En la Figura 20 se muestra que los caudales de inviernos son subestimados, mientras que los de verano parecen estar relativamente bien, aunque algo sobrestimados.

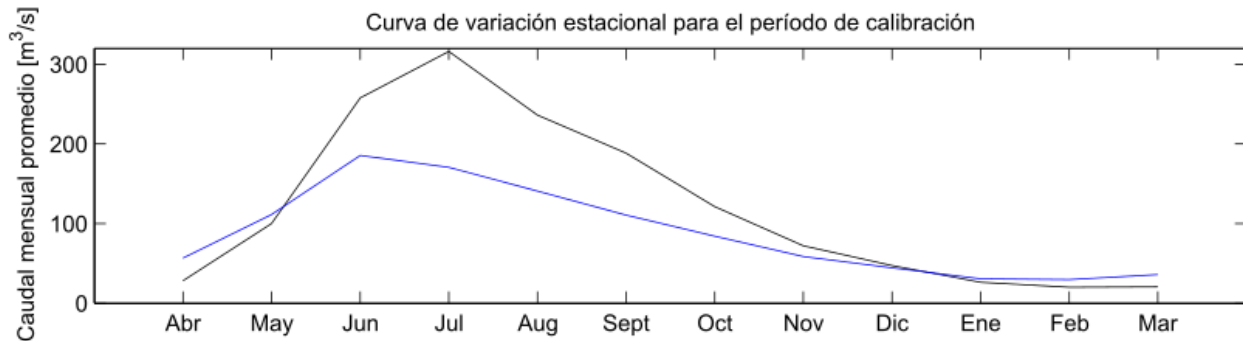


Figura 20: Curva de variación estacional para la estación fluviométrica DGA Cautín en Almagro. El período de calibración empieza en el año hidrológico 1985-1986 y termina en 2004-2005. En azul se muestra el caudal modelado, mientras que en negro lo observado.

Cuenca del río Aysén

La cuenca del río Aysén en Puerto Aysén es una de las más desafiantes debido a la baja densidad de estaciones meteorológicas y la alta heterogeneidad de la cuenca. Al igual que el río Imperial, existe un sesgo en los caudales, lo que se aprecia en la Figura 21. El desafío de la modelación es lograr aumentar la escorrentía en invierno para mejorar el desempeño del modelo.

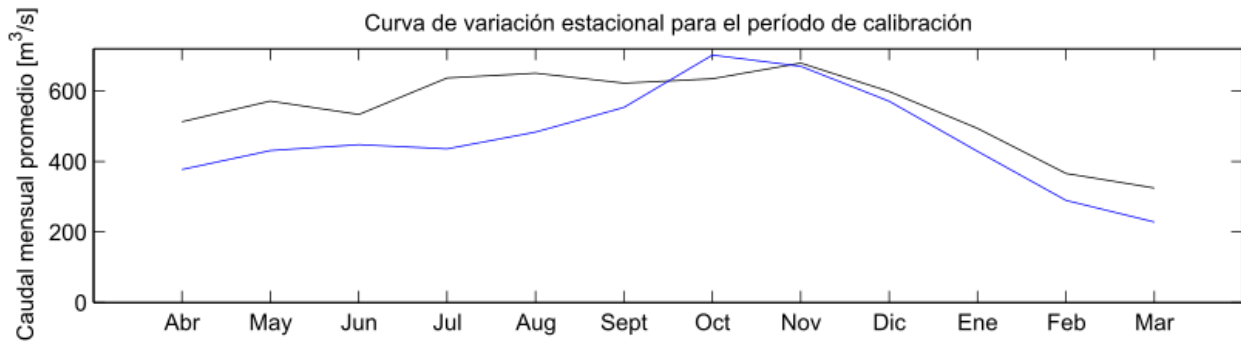


Figura 21: Curva de variación estacional para la estación fluviométrica DGA Aysén en Puerto Aysén. El período de calibración empieza en el año hidrológico 1996-1997 y termina en 2013-2014. En azul se muestra el caudal modelado, mientras que en negro lo observado.

Según la Figura 22, los procesos de escorrentía dominan los flujos de salida de la cuenca. Los procesos relacionados con la nieve representan (hasta el momento de la calibración) más del 40% del flujo total de evapotranspiración, tal como lo muestra la Figura 23. El desafío estará en lograr disminuir la evapotranspiración para mejorar el sesgo en caudales.

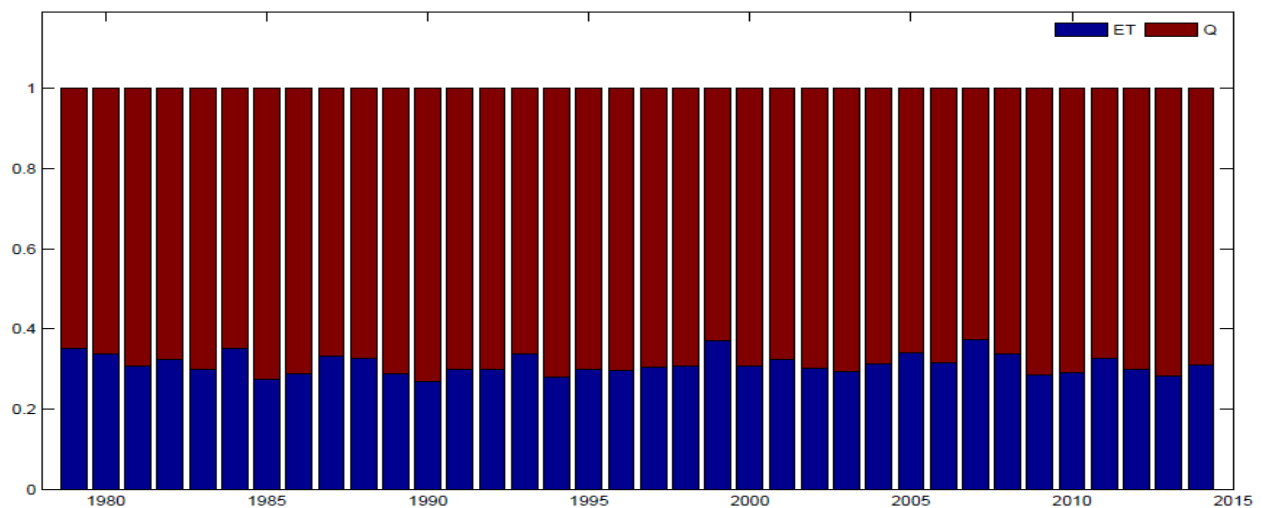


Figura 22: Fracciones de evapotranspiración y caudal modelados respecto a la salida total de agua de la cuenca Aysén en Puerto Aysén.

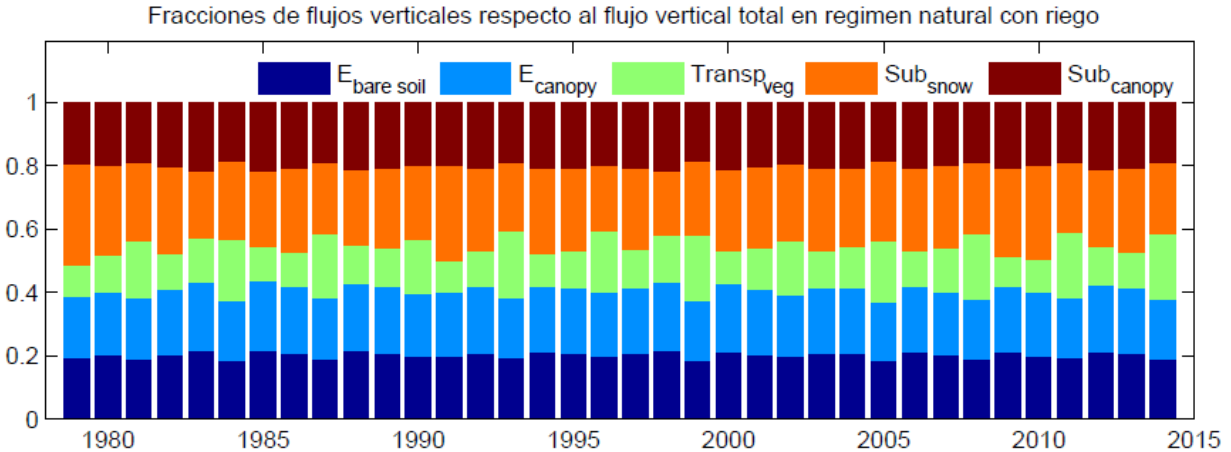


Figura 23: Repartición de los distintos flujos que componen la evapotranspiración respecto a la evapotranspiración total. Cuenca del río Aysén en Puerto Aysén.

4. DESAFÍOS

Para obtener el balance hídrico en las cuencas piloto señaladas, los principales desafíos se pueden separar en (1) la obtención de los inputs del modelo y (2) la representación de los procesos físicos.

Inputs del Modelo VIC

Forzantes meteorológicas

Cada una de las celdas del modelo VIC requiere de información meteorológica para estimar el balance hídrico. Esto puede ser desafiante en zonas donde no existen observaciones y que son relevantes para la hidrología de las cuencas como, por ejemplo, las zonas cordilleranas de los ríos Choapa y Maipo. En consecuencia, estimar correctamente variables como precipitación o temperatura es difícil, pero es posible corroborar las estimaciones mediante el modelo VIC pues éste representa todos los procesos superficiales en base a ecuaciones físicas. No obstante, cuando la modelación de los procesos físicos no es la esperada, es necesario revisar las forzantes nuevamente, lo que implica un análisis cada vez más acabado que no es trivial de llevar a cabo.

Distribución temporal sub-diaria de la información

Para representar de forma correcta los distintos procesos físicos asociados al ciclo hidrológico, es necesario realizar una modelación a nivel sub-diario. La cantidad de estaciones meteorológicas que cuentan con dicho tipo de registro en Chile, además de su longitud de registro, no permiten obtener una base de datos robusta para realizar la desagregación temporal de la información, por lo que es necesario acudir a fuentes externas. En el caso del presente estudio se utilizó la información tri-horaria asociada al modelo de re-análisis Era-Interim, distribuyendo la precipitación diaria para cada pixel según la proporción señalada por dicho modelo.

Otros inputs de modelo VIC

De manera adicional a las forzantes meteorológicas, es necesario representar la heterogeneidad del uso de suelos en cada pixel mediante la fracción de uso de suelos para cada pixel, y los valores de los índices LAI y EVI para cada una de esas fracciones y en cada pixel. Esto requiere que la resolución espacial de la información de uso de suelos sea mayor que la resolución espacial a la cual trabajará el modelo y un uso intensivo de sistemas de información geográfica para procesar productos satelitales, para luego distribuir esa información según cada uso de suelo y para cada pixel. Adicionalmente, se necesita información de las áreas irrigadas en cada una de las regiones y cómo ésta se distribuye en cada uno de los pixeles.

Procesos Físicos

Riego

Debido a que el modelo VIC no considera intervenciones en la modelación, se requiere incorporar el agua extraída por riego de manera externa al modelo. Lo anterior considera que los cultivos evapotranspiran a su potencial y que existen eficiencias de riego para ciertos tipos de cultivo, por lo que es posible estimar la cantidad de agua que se extrae del río. No obstante, lo anterior incorpora incertidumbre pues es difícil estimar cuánta agua realmente se extrae, lo que evidentemente afecta cualquier intento de balance.

Representación de acuíferos

Uno de los aspectos más desafiantes es la representación de los acuíferos dentro del modelo, pues éste no modela napas subterráneas. En consecuencia, existen complicaciones con (1) representar fielmente el movimiento y flujos de agua subterráneas y (2) estimar los afloramientos naturales y artificiales y las salidas de agua producto de evaporación desde el acuífero como ocurre, por ejemplo, en la zona Norte del país. En consecuencia, se deben realizar ciertos supuestos que permitan, al menos, aproximar los flujos de agua que no están explícitamente representados en el modelo.

Heterogeneidad espacial

Como VIC representa sus procesos mediante ecuaciones físicas, los parámetros que se consideran deben tener coherencia espacial, lo cual es un desafío si no se tiene suficiente información. En consecuencia, la estimación de los parámetros no puede obtenerse solamente buscando mejorar algún índice de eficiencia, por lo que deben incorporarse otros criterios que expliquen, por las razones correctas, el buen comportamiento del modelo.

5. CONCLUSIONES

Hasta el momento, se ha estimado variables meteorológicas como precipitación, temperatura y viento para todo el país a una escala de 0,05° (Latitud-Longitud), las que se han contrastado con observaciones y está siendo, además, validado mediante la modelación hidrológica. Estas forzantes abarcan el período 1979-2015 cada tres horas, lo que implica un gran esfuerzo por caracterizar la climatología de todo el país a resoluciones espaciales y temporales que nunca antes se habían logrado en el país.

El proceso de calibración de los parámetros del modelo VIC está en ejecución (al momento de escribir este documento) y requiere de capacidades de cómputo que no son menores y que, al mismo tiempo, imponen un desafío, especialmente en el tiempo disponible para calibrar.

Debido a la incertidumbre que existe en muchas de las variables analizadas, es imperante una constante revisión de los resultados obtenidos hasta la fecha. La precipitación, la sublimación, la evapotranspiración, la infiltración, la recarga al acuífero, etc., son procesos que no han sido medidos y rara vez estudiados a la escala a la cual se está trabajando en este proyecto. En consecuencia, cuando algún proceso se debe mejorar, es desafiante dirimir si los causantes son las forzantes, o son los parámetros del modelo y, en consecuencia, para obtener una buena representación del proceso hidrológico se requiere de tiempo e iteraciones hasta que todos los procesos tengan sentido.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo agradecen a la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas por el financiamiento otorgado a través del Contrato denominado “Actualización del Balance Hídrico Nacional”.

REFERENCIAS

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

Cortés, G. (2016). Gaining insight into Andean snowpack climatology and change using a snow reanalysis approach applied over the Landsat satellite record. Los Angeles. 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>.

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C.,

Thépaut, J.-N. and Vitart, F. (2011), The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137: 553–597. doi:10.1002/qj.828

Falvey, M. and Garreaud, R.D., 2009. Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D4).

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1), 80-91.

Howell, T. A., 1990. Relationships between crop production and transpiration, evapotranspiration, and irrigation. In: Stewart BA, Nielsen DR (eds) *Irrigation of Agricultural Crops*, Madison, Wis., pp 391–434.

Kling, H., Fuchs, M., & Paulin, M. 2012. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424, 264-277.

Liang et. al., 1994. A Simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*. 99, 415-428.

Montecinos, A., Díaz, A. and Aceituno, P., 2000. Seasonal diagnostic and predictability of rainfall in subtropical South America based on tropical Pacific SST. *Journal of Climate*, 13(4), pp.746-758.

Montecinos, A. and Aceituno, P., 2003. Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies. *Journal of Climate*, 16(2), pp.281-296.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), pp.282-290.

Quintana, J.M. and Aceituno, P., 2012. Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30-43° S. *Atmósfera*, 25(1), pp.1-22.

Ramirez-Villegas, J. and Jarvis, A., 2010. Downscaling global circulation model outputs: the delta method decision and policy analysis Working Paper No. 1. *Policy Analysis*, 1, pp.1-18.

Rodell, M., Famiglietti, J.S., Chen, J., Seneviratne, S.I., Viterbo, P., Holl, S. and Wilson, C.R., 2004. Basin scale estimates of evapotranspiration using GRACE and other observations. *Geophysical Research Letters*, 31(20).