

PRODUCCIÓN DE AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO LIMAY: MODELADO Y CALIBRACIÓN

Natalia Pessacg¹, Silvia Flaherty¹, Laura Brandizi^{2,3}, Magalí Rechencq⁴, Martín García Asorey¹, Leandro Castiñeira⁵, Silvina Solman⁶ y Miguel Pascual¹

¹Instituto Patagónico para el Estudio de los Ecosistemas Continentales, CCT CENPAT-CONICET, Puerto Madryn, Argentina

²Universidad Tecnológica Nacional, Puerto Madryn, Argentina

³Universidad de la Patagonia San Juan Bosco, Trelew, Argentina

⁴Instituto de Investigaciones en Biodiversidad y Medioambiente, CONICET-Universidad Nacional del Comahue, CCT Patagonia Norte, Bariloche, Argentina

⁵Centro de Ecología Aplicada de Neuquén, CEAN, Junín de los Andes, Argentina

⁶Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera CONICET-UBA, DCAO/FCEN, UMI IFAECI/CNRS, Ciudad de Buenos Aires, Argentina

(Manuscrito recibido el 20 de marzo de 2017, en su versión final el 28 de junio de 2017)

RESUMEN

En este trabajo se realizó un análisis de sensibilidad, calibración y evaluación del desempeño del modelo InVEST para simular la producción de agua media anual en la Cuenca del Río Limay. La producción de agua es un servicio ecosistémico hidrológico fundamental que resulta del balance entre la evapotranspiración y la precipitación, dependiendo de las características del suelo y de la cobertura. Las simulaciones permitieron determinar el orden de subcuencas productoras de agua, mostrando que la subcuenca que más produce es la de Aluminé, seguida de la subcuenca Nahuel Huapi. El análisis de sensibilidad a las bases de datos de precipitación evidenció la necesidad de utilizar bases de datos de precipitación con alta resolución espacial y alta densidad de estaciones meteorológicas para este tipo de estudio de modelado a escala de cuenca. La base de datos de precipitación NPCG, generada para Patagonia Norte con alta densidad de estaciones meteorológicas, dio resultados muy satisfactorios y permitió una buena calibración del modelo. Las simulaciones realizadas con diferentes bases de datos globales o cuasi-globales de precipitación mostraron una marcada dispersión en los resultados.

La sensibilidad al uso de diferentes bases de datos de uso/cobertura de suelo fue menor que al uso de diferentes bases de precipitación. Sin embargo, se registraron cambios relevantes en la producción de agua en algunas subcuencas cuando las diferencias de uso/cobertura se localizaban en la cabecera de la cuenca.

La mejor calibración del modelo (errores menores al 10 %) se obtuvo con la base de datos de uso/cobertura de suelo SERENA, con la base de precipitación NPCG y con un valor del parámetro ecohidrológico $Z=15$.

Palabras clave: Producción de agua, Cuenca del Río Limay, Modelo InVEST, Precipitación, Uso/cobertura de suelo

WATER YIELD IN THE LIMAY RIVER BASIN: MODELLING AND CALIBRATION

ABSTRACT

In this study, we carried out a sensitivity analysis and calibration of the InVEST model and we tested its performance to simulate annual water yield for the Limay River Basin. Water yield is an important hydrological ecosystem service which results from the evaporation-precipitation budget, and also depends on land cover and soil characteristics. We evaluated the sensitivity of water yield to different precipitation and land use/ land cover databases. These simulations allowed us to rank the Limay River sub-basins according to their annual water yield. This ranking, showed that Aluminé is the subbasin with the largest water yield, followed by Nahuel Huapi subbasin. The sensitivity analysis to the precipitation databases demonstrates the need for using precipitation databases with high spatial resolution and high density of meteorological stations when modelling studies at the basin scale are performed. The NPCG precipitation database, generated for North Patagonia with high meteorological station density, produced the best results and allowed for a good model calibration. The simulations performed using different global or quasi-global precipitation databases showed an important dispersion in the results. Results also suggest that water yield sensitivity to land use/land cover is lower than to precipitation. However, when relevant mismatches among land use/land cover databases were located in the headwater subbasins, simulated water yield showed important differences.

The best model performance (error less than 10% in annual water yield) was obtained using the SERENA land use/land cover database together with the NPCG precipitation database and a value of 15 for the eco-hydrological parameter Z.

Keywords: Water Yield, Limay River Basin, InVEST Model, Precipitation, Land use/land cover

1. INTRODUCCIÓN

La utilización del paradigma de servicios ecosistémicos (SE) (beneficios que el hombre obtiene de la naturaleza, Millenium Ecosystem Assessment 2005) se ha intensificado notablemente en los últimos años, asociado a que permite estudiar los impactos de cambios en el medio ambiente en términos sociales y económicos y provee un mecanismo para abordar el manejo y conservación del ambiente (Redhed y otros 2016). En particular, los servicios ecosistémicos hidrológicos (SEH), como calidad y cantidad de agua, son los de mayor relevancia en cuencas fluviales, ya que en general son la base para el resto de los SE (Sánchez-Brito y otros 2013).

Para abordar de forma integral los SEH es necesario realizar un mapeo de los mismos a nivel de cuenca y utilizar modelos biofísicos que permitan explicar la dinámica de los sistemas. Entre los más utilizados, se encuentran modelos como InVEST (Integrated Valuation Ecosystem Services and Tradeoffs), ARIES (Artificial Intelligence for Ecosystem Services), EVT (Ecosystem Services and Tradeoffs), TESSA (Toolkit for Ecosystem Service Site based Assesment), SOVES (Social Values for Ecosystem Services), ECO-SER (Evaluación y Mapeo de Servicios Eosistémicos y vulnerabilidad socio-ecológica para el ordenamiento territorial), WaSSI (Water Supply Stress Index Model) y modelos hidrológicos como SWAT (Soil Water and Assessment Tool) o VIC (Variable

Infiltration Capacity Model). Una descripción detallada de las herramientas disponibles en modelado de SEH se puede encontrar en Vigerstol y Aukema (2011).

El principal forzante en el modelado de los SEH es naturalmente la precipitación debido a su rol conducente en el ciclo del agua. Sin embargo, la precipitación es una de las variables meteorológicas más difíciles de medir regionalmente, asociado a la marcada variabilidad espacial y temporal que presenta (Junzhi y otros 2012).

Además de la precipitación, la cobertura/uso del suelo (LULC, por sus siglas provenientes del inglés: land use/land cover) típicamente constituye un importante forzante en el modelado de SEH. La categorías de LULC se derivan en general a partir de imágenes satelitales y reflejan el tipo de cobertura vegetal, tipo de suelo y actividades humanas. No obstante, las bases de datos de LULC suelen ser globales, generadas con diferentes algoritmos, y para diferentes usos (análisis de diferentes servicios ecosistémicos, modelado, etc), y necesitan constatación a campo de la identidad de distintos tipos de cobertura, lo que genera diferencias importantes en las clasificaciones realizadas por diferentes bases de datos para una misma región (Kaptué Tchnuenté y otros 2011).

Las incertezas en estas fuentes de información pueden propagarse a grandes errores en la predicción del SEH per sé. Por ejemplo, en la Cuenca del Río Chubut se encontró que errores en la precipitación del orden del 30% conducen a errores en la producción de agua simulada entre el 50-150% en las diferentes subcuencas (Pessacg y otros 2015). Sin embargo, hay aún pocos estudios que realicen este tipo de análisis de incertezas, sensibilidad del modelo y calibración del mismo (Redhed y otros 2016).

Este trabajo está focalizado en la Cuenca del Río Limay (CRL), que abarca parte de las provincias patagónicas de Río Negro y de Neuquén y que por sus características es una cuenca sumamente

interesante para realizar estudios ecosistémicos hidrológicos. La CRL tiene una gran relevancia socio-económica ya que da sustento a distintas actividades con relevancia regional y nacional, incluyendo la producción del 25% de la energía hidráulica del país (Documentos Subsecretaría de Recursos Hídricos Nación); el principal aporte de agua al Valle del Río Negro, donde se produce el 90% de la producción nacional de manzana y pera; y el desarrollo del 40% de la actividad turística de la Patagonia Continental (García Asorey y otros 2015). Para la mayoría de estas actividades socio-económicas el agua dulce es esencial como así también para los ecosistemas donde se desarrollan. A pesar de la importancia de esta cuenca en términos hidrológicos, no hay aún estudios de SEH en la región. En Argentina, los estudios sobre SE están mayormente focalizados en la región pampeana y la zona de bosques templados asociados principalmente a los cambios de uso/cobertura de suelo (Balvanera y otros 2012; Laterra y otros 2011a, b; Carreño y otros 2012; Paruelo y otros 2015), mientras que en Patagonia aún son muy pocos los estudios que aborden la temática (Pessacg y otros 2015; Blanco y otros 2015; Paruelo y otros 2004).

Teniendo en cuenta los resultados previos, en la CRL es necesario abordar un estudio de SEH considerando la sensibilidad del modelo biofísico utilizado a los datos de precipitación y de uso/cobertura de suelo. Además es fundamental realizar un análisis de calibración del modelo y evaluación de desempeño en la cuenca.

En este contexto, los objetivos de este trabajo son: 1) Modelar y caracterizar la producción de agua media anual en la Cuenca del Río Limay e identificar las regiones más relevantes dentro de la cuenca en términos de provisión de agua; 2) Evaluar la sensibilidad del modelo a diferentes bases de datos de uso/cobertura de suelo, precipitación y parámetros; 3) Calibrar el modelo y evaluar su desempeño para la región. Los resultados además sirven de base para futuros estudios de impacto antropogénico en la región.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

2.1. Características de la Cuenca

La Cuenca del Río Limay, con un área aproximada de 58.800km², está situada en el noroeste de la región patagónica comprendiendo parte de las provincias de Río Negro y Neuquén (Figura 1). El Río Limay nace en el lago Nahuel Huapi y atraviesa la cuenca hasta la unión con el Río Neuquén donde nace el Río Negro con un módulo de 650 m³s⁻¹. Los afluentes más importantes del Río Limay son los ríos Traful y Collon Cura (Martínez S. 2002) los cuales drenan las áreas boscosas de montañas ubicadas al oeste del área de estudio. Otros afluentes que involucran importantes áreas pero que están ubicadas más al este, drenan a subcuencas de la estepa patagónica. El Río Limay en conjunto con la cuenca del Río Neuquén y del Río Negro forman el sistema hidrográfico más importante de la Patagonia (Documentos AIC, Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro; www.aic.gov.ar).

El Río Limay y el Collon Cura tienen un régimen hidrológico pluvionival moderado por lagos naturales en la naciente de los tributarios, con doble onda de crecida: durante el invierno por las precipitaciones y en primavera por el deshielo (AIC, www.aic.gov.ar). Las subcuencas de Collon Cura y del Limay superior (ubicadas al sur de la cuenca) son las que tienen en promedio una frecuencia anual de nevadas mayor. Sin embargo, solo se produce acumulación de nieve en un área reducida (donde se superan los 1600m de altura). En esta región la nieve no tiene un rol hidrológico significativo ya que no ejerce una regulación destacable sobre los picos de crecida ni es un aporte significativo durante el caudal de primavera (Lascano 2007). La cabecera de cuenca de la CRL está ubicada sobre el fuerte gradiente de precipitación que se encuentra en la región de la Cordillera de los Andes, que va desde valores máximos mayores a los 2600 mm año⁻¹ en el límite entre Argentina y Chile a 200 mm año⁻¹ a 200 km de este límite del lado argentino. La cordillera bloquea las perturbaciones embebidas

en el flujo del oeste y produce precipitación sobre esa región (Insel y otros 2009). El ascenso de las masas de aire al oeste de la Cordillera genera condiciones híper-húmedas, mientras que a medida que las masas de aire descienden se secan y generan condiciones áridas y altamente evaporativas (Garreaud y otros 2013).

Esta cuenca soporta múltiples aprovechamientos, actividad agrícola con zonas bajo riego, actividad ganadera, explotación de hidrocarburos y minería, producción de energía eléctrica, turismo, y pesquerías deportivas reconocidas a nivel internacional. Además esta cuenca cuenta con dos grandes Parques Nacionales con fines de conservación, Parque Nacional Nahuel Huapi y Parque Nacional Lanín que cubren prácticamente todas las nacientes de la cuenca. El desarrollo de todas estas actividades depende del agua y la utilizan generando un impacto en el medio ambiente y en el recurso hídrico. Sumado a esto, se ha encontrado que el Río Limay tiene una tendencia decreciente en el caudal anual y en el caudal de verano (Vich y otros 2014).

2.2. Modelo de producción de agua anual y datos

En este trabajo se utilizó el modelo InVEST. Este modelo fue desarrollado por el Natural Capital Project (www.naturalcapitalproject.org) con el objetivo de analizar la distribución espacial de diferentes servicios ecosistémicos. InVEST es un modelo espacialmente explícito y permite mapear, cuantificar y asignarle un valor económico a diferentes bienes y servicios de la naturaleza que sustentan el bienestar humano. Este modelo cuenta con varios módulos específicos para diferentes servicios ecosistémicos, entre ellos el módulo de producción de agua (Reservoir Hydropower Production), versión 3.2.0, utilizado en este trabajo (Sharp y otros 2016). Uno de los resultados principales de este módulo es un mapa reticulado de producción de agua en la cuenca de interés. La producción de agua anual se calcula para cada pixel como la relación entre la precipitación y la evapotranspiración media anual basada en la

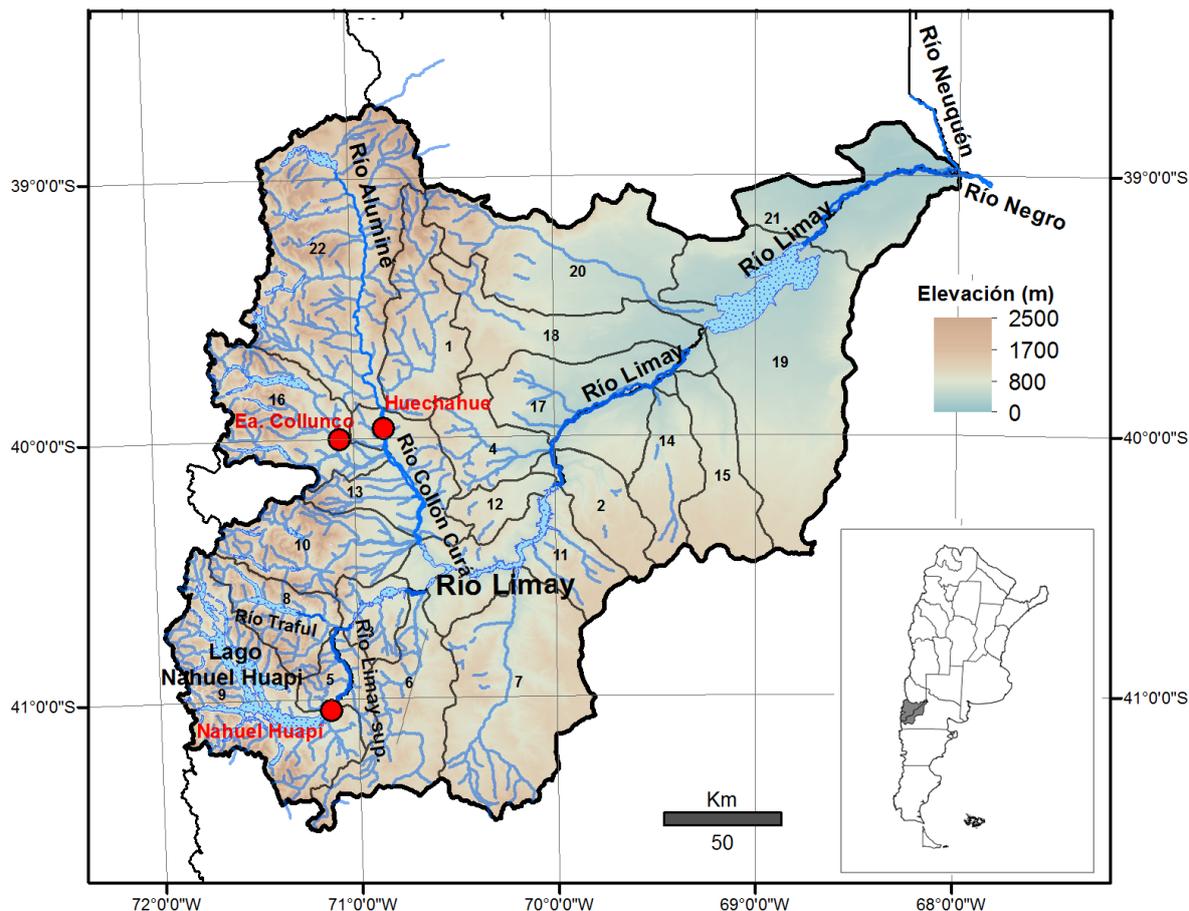


Figura 1: Ubicación y topografía (metros por encima del nivel del mar) de la cuenca del Río Limay y sus principales ríos. Los números identifican las 22 subcuencas que componen la cuenca. En rojo las estaciones hidrométricas utilizadas, Estación Huechahue (cierre de las subcuencas N° 1 y 22), Estación Estancia Collunco (cierre de subcuenca N° 16), y Estación Nahuel Huapi (cierre de subcuenca N°9).

curva de Budyko (Budyko 1974). La resolución de esta capa está determinada por la resolución de la capa de LULC (Tabla II). Para el análisis de los resultados se remuestrearon todas las bases de datos consideradas a la misma resolución espacial (500 m). La evapotranspiración potencial considerada en esta relación se calcula como función del mapa de LULC en cada pixel. Las propiedades naturales del clima y el suelo están asignadas en el modelo a través de un parámetro w dependiente del pixel y que considera además un parámetro ecohidrológico Z . El parámetro ecohidrológico Z es una constante empírica que captura los patrones de precipitación locales y las

características hidrogeológicas. En este modelo se utiliza también una capa que representa la fracción de agua disponible para las plantas que a su vez está asociada a tipos de suelo (textura y porosidad) (Tabla I). Además, se utiliza un mapa que representa la profundidad de suelo (donde la penetración de las raíces es inhibida) (Tabla I).

Es recomendable interpretar los resultados del modelo a nivel de subcuenca, que en el presente trabajo se computó como la suma de la producción de agua de los pixeles que conforman la subcuenca

La principal limitación de este módulo de

Datos de entrada	Fuente
Profundidad de suelo (donde la penetración de las raíces es inhibida)	INTA soil map http://geointa.inta.gov.ar
Fracción de agua disponible para las plantas	INTA y Ministerio de Agricultura, Alimentos y Pesca, British Columbia (Canadá)
Precipitación media anual	CRU, TRMMv6, TRMMv7, GPCC, NPCG (descriptas en el texto)
Contenido de agua disponible para las plantas	INTA & Ministerio de Agricultura, Alimentos, y Pesca, British Columbia, Canadá
Evapotranspiración media anual de referencia	FAO, www.fao.org
Uso/coertura de suelo (LULC)	SERENA, GLC, MODIS (descriptas en el texto)
Delimitación de la Cuenca y de las subcuencas	Generación propia basada en la delimitación de la Subsecretaría de Recursos Hídricos y la delimitación generada con la herramienta ArcHydro
Máxima profundidad de raíces para cada clase de LULC	Canadell y otros (1996)
Coefficiente de evapotranspiración de las plantas para cada clase de LULC (Kc)	FAO, www.fao.org
Parámetro ecohidrológico Z	Donohue y otros (2012) o estimado por calibración. Valor entre 1 y 30

Tabla I: Datos de entrada utilizados por el modelo de producción de agua InVEST (versión 3.2.0).

InVEST es que es de escala anual y que no contempla la interacción entre el agua superficial y el agua subterránea (Vigerstol y Aukema, 2011). Por otro lado, el módulo de producción de agua no cuenta con un modelo de nieve. Una descripción detallada del modelo se puede consultar en Pessacg y otros (2015) y en www.naturalcapitalproject.org/invest.

El módulo de producción de agua requiere de diferentes fuentes de datos que son descriptos en la Tabla I. El periodo de estudio considerado es 1998-2010, común a todas las bases de datos de precipitación utilizadas. La delimitación de la cuenca y las sub-cuencas se realizó utilizando como base las delimitaciones de la Subsecretaría de Recursos Hídricos (SSRH 2011) y la delimitación generada con las herramientas de Análisis Espacial del paquete de hidrología de ArcGIS 10.1. Para obtener esta información, sobre un modelo digital de elevación (DEM) se estableció el flujo acumulado a partir de un punto de salida para cada subcuenca la cual se convirtió en una capa vectorial de polígono. Las subcuencas aguas abajo fueron recortadas por las subcuencas aguas arriba, de manera de

eliminar la superposición de las áreas de las cuencas anidadas. Luego se realizó una unión de todas las subcuencas para obtener la capa vectorial requerida como insumo por el módulo.

La calibración y la evaluación del desempeño del modelo se realizó con datos de caudal recopilados durante el período de estudio (1998-2010) por la Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas Limay, Neuquén y Negro (AIC), para tres estaciones de aforo (puntos rojos en la Figura 1): Estación Nahuel Huapi (punto de cierre de la subcuenca 9), Estación Estancia Collunco (punto de cierre de la subcuenca 16); Estación Huechahue (punto de cierre de las subcuencas 1 y 22).

Los valores de escorrentía anuales se calcularon con los datos observados de caudales anuales considerando las áreas de aporte de cada estación hidrométrica. A este valor de escorrentía se le descontó el caudal base, que representa la reserva permanente de agua del sistema. La producción de agua anual se cuantificó sumando los valores de producción de agua de las subcuencas aguas arriba de cada estación hidrométrica. De esta

	Base de datos	Referencia	Cob. Espacial	Res. temporal	Res. espacial	Fuente
Base de datos de precipitación	CRU University of East Anglia Climate Research Unit	Mitchell and Jones, 2005	Global	1901-2009	0.5°x0.5°	Estaciones meteorológicas CRU TS3.1
	GPCC Global Precipitation Climatology Centre	Schneider et al., 2011	Global	1901-2014	0.5°x0.5°	Estaciones meteorológicas
	TRMM v6 Tropical Rainfall Measuring Mission	Huffman et al., 2007	50°N-50°S	1998-2010	0.25°x0.25°	Satélite (Algoritmo 3B42)
	TRMM v7 Tropical Rainfall Measuring Mission	Huffman et al., 2007	50°N-50°S	1998-2010	0.25°x0.25°	Satélite + estaciones meteorológicas (Algoritmo 3B43)
	NPCG Northern Patagonian Climate Grid	Bianchi et al., 2016	Patagonia norte	1997-2010	0.2°x0.2°	Estaciones meteorológicas de distintas fuentes y co-kriging con modelo de elevación digital.
Base de datos de LULC	MODIS	Broxton et al, 2014	Global	2001-2010	500 m	http://landcover.usgs.gov/global_climatology.php
	SERENA	Blanco et al, 2013	Sud América y el Caribe	2008	500 m	http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/cobertura_suelo/br/serena/index.html
	GLC	Eva et al, 2003	Sud América	2000	1000 m	http://landcover.usgs.gov/landcoverdata.php

Tabla II: Bases de datos de precipitación y land use/landcover (LULC) utilizadas como datos de entrada en el modelo InVEST.

manera se puede comparar la escorrentía anual observada con la producción de agua simulada con InVEST, para los puntos de cierre descriptos en la Figura 1.

La dispersión entre las diferentes simulaciones realizadas se cuantificó como la desviación estándar de cada simulación respecto de la simulación de referencia. Estudios previos indican que la mayor sensibilidad de este modelo está asociada a los datos de precipitación, a las categorías de uso/cobertura de suelo consideradas y al parámetro ecohidrológico Z seleccionado (Pessacg y otros 2015; Hamel y Guswa 2015; Redhead y otros 2016). Teniendo en cuenta estos resultados, en este trabajo se analizó la sensibilidad a diferentes bases de datos

de precipitación, de uso/cobertura de suelo y a diferentes valores del parámetro ecohidrológico Z.

2.2.1. Bases de datos de precipitación

Se utilizaron 5 bases de datos reticulados de precipitación: Climate ResearchUnit (CRU), Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) versión 6 y versión 7, Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) y la base de datos de precipitación de NPCG (Northern Patagonian Climate Grid, Bianchi y otros 2016) (Tabla II). Se consideró la media anual de precipitación del período común entre bases de datos, 1998-2010.

Las bases de datos de precipitación reticuladas

globales o cuasi-globales, en general, no representan adecuadamente la magnitud y la ubicación del estrecho gradiente de precipitación que se localiza en la Cordillera de los Andes y que afecta a la cabecera de la CRL, asociado en gran medida a la escasa cantidad de estaciones meteorológicas disponibles en la regiones de altura. Las bases de datos de precipitación reticuladas CRU y GPCC tienen una resolución espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, y cuentan en la CRL con datos de únicamente dos estaciones meteorológicas. Las dos versiones de TRMM tienen una resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, la versión v6 considera datos satelitales, mientras que la versión v7 combina el algoritmo utilizado en la versión v6 con datos de precipitación de estaciones meteorológicas (Huffman y otros 2007 y 2012). Sin embargo, se ha comprobado que las estimaciones satelitales de precipitación tienen un pobre desempeño en zonas con terreno complejo como la Cordillera de los Andes. Los errores en la estimación de la precipitación en este tipo de regiones están asociados a las dificultades de los algoritmos para capturar la presencia de nieve (Salio y otros 2015). La base de datos NPCG fue generada específicamente para la región Patagonia Norte, y utiliza 218 estaciones meteorológicas con datos de precipitación de las cuales aproximadamente el 20 % corresponden a la CRL. Por lo tanto, esta base de datos representa de forma más robusta el gradiente de precipitación en esta zona (Bianchi y otros 2016). La base NPCG fue considerada como la base de referencia para los análisis realizados.

2.2.2. Bases de datos de uso/cobertura de suelo (LULC)

Para evaluar la sensibilidad del modelo al LULC se utilizaron 3 bases de datos (Tabla II): 1-SERENA (Red Latinoamericana de Seguimiento y Estudio de los Recursos Naturales); 2-Global Land Cover (GLC, United States Geological Survey Land Cover Institute); y 3-MODIS (MODIS-based Global Land Cover Climatology, USGS).

La base de datos MODIS se utilizó como

referencia para los experimentos de sensibilidad a la precipitación y al parámetro Z realizados (Tabla III).

Las diferentes bases de datos de cobertura implican cambios en la evapotranspiración que a su vez impactan en la producción de agua simulada. Uno de los insumos que utiliza el modelo InVEST es una tabla biofísica que asigna a cada categoría del mapa de LULC un valor específico de coeficiente de evapotranspiración (K_c). K_c es un coeficiente que permite ajustar los valores de la evapotranspiración de referencia y adecuarlos en cada caso al tipo de cobertura vegetal. De esta manera, al multiplicar el valor de K_c por el valor de la evapotranspiración de referencia se obtiene la evapotranspiración potencial a escala de pixel.

Tanto la base de datos de evapotranspiración de referencia como el valor de K_c se obtienen de los datos de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). La evapotranspiración de referencia de la FAO se estima usando el método de Penman-Monteith (Allen y otros 1998) y los valores de K_c corresponden a promedios obtenidos de mediciones de campo en distintos cultivos y coberturas vegetales. Las categorías de LULC para cada una de las bases de datos están descritas en la Figura 2.

En la tabla biofísica se parametriza también la profundidad máxima de las raíces representativa de cada categoría de LULC vegetada. Los valores de este parámetro son empíricos y se obtuvieron a partir de las mediciones realizadas por Canadell y otros (1996) (Tabla I). La profundidad máxima de las raíces junto con la capas de fracción de agua disponible para las plantas y de profundidad de suelo (Sección 2.2.) determinan la capacidad del suelo para almacenar agua.

En los resultados, además de evaluar las diferencias en la producción de agua a escala de cuenca para simulaciones con diferentes coberturas, se analizaron en particular las tres subcuencas que presentaron mayores diferencias

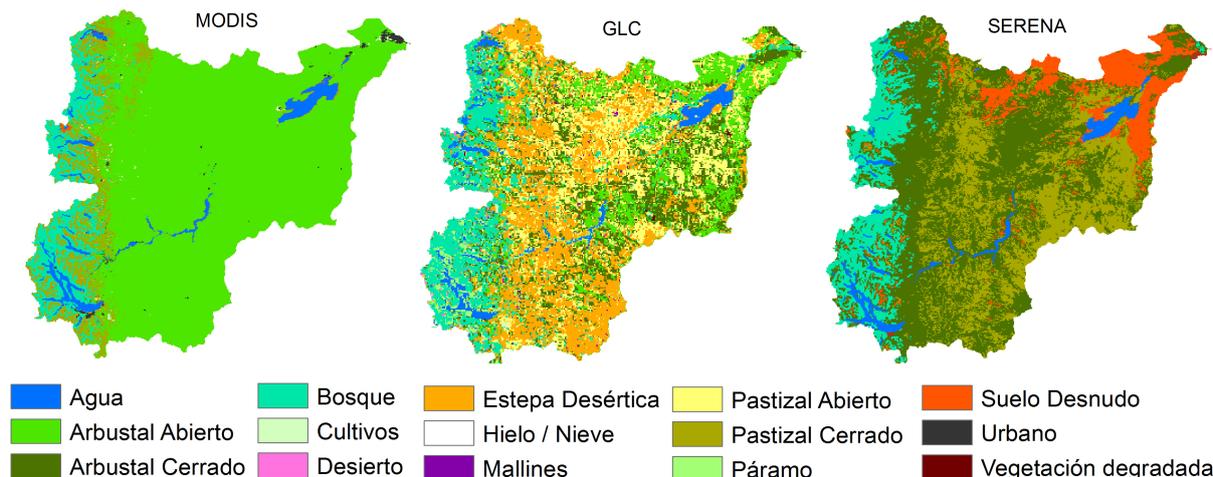


Figura 2: Categorías de uso/cobertura del suelo (LULC) para la Cuenca del Río Limay para cada una de las bases de datos consideradas: MODIS, GLC, SERENA (Tabla II).

en la producción de agua simulada (subcuencas Nahuel Huapi, Aluminé y Picheleufú) En cada una de estas subcuencas se calculó el porcentaje de cada cobertura de LULC para cada base de datos y el valor de K_c ponderado por el área correspondiente a cada cobertura. Este análisis permite evaluar la sensibilidad de la producción de agua simulada a la capa de cobertura, a través de la evapotranspiración característica de diferentes categorías de LULC.

2.2.3. Parámetro ecohidrológico Z

El parámetro ecohidrológico Z es una constante empírica que por definición captura la estacionalidad climática, la intensidad de la precipitación y las características topográficas de la cuenca (Milly 1994; Mendoza y otros 2011). El parámetro Z puede calcularse principalmente por dos métodos diferentes. El método de Donohue y otros (2012) estima Z a partir de una función lineal del número de eventos de precipitación por año (n) como $Z=0.2*n$. Esto implica que Z captura los patrones de precipitación, distinguiendo entre subcuencas con precipitación anual similar pero con diferente intensidad. El segundo método utiliza el parámetro Z como una constante de calibración, lo que permite corregir procesos que este módulo de InVEST no captura.

Siguiendo el primer método, se calculó el valor de Z en dos estaciones meteorológicas en la cuenca, Bariloche ($Z=26$), Los Coihues ($Z=12$) y en tres estaciones cercanas a la cuenca donde se contaba con datos diarios, Neuquén ($Z=14$), Chapelco ($Z=25$) y Maquinchao ($Z=8$). Los cálculos se realizaron para el período de estudio 1998-2010. Se consideró un valor medio de $Z=15$ para toda la cuenca como valor de referencia.

A partir del segundo método, el parámetro ecohidrológico Z se estimó por calibración usando datos observados de caudal y comparando con los resultados del modelo. Se consideraron 5 valores diferentes de Z: 1, 10, 15, 20, 30, donde 1 y 30 son los valores mínimo y máximo, respectivamente, que puede tomar este parámetro en el modelo.

La Tabla III resume los 27 experimentos de sensibilidad realizados en base a combinaciones de los diferentes forzantes analizados: bases de datos de precipitación, bases de datos de LULC y valores del parámetro ecohidrológico Z, lo que permitió generar una matriz amplia a partir de la cual se puede evaluar la sensibilidad a los diferentes forzantes analizados. La simulación de producción de agua realizada con la base de precipitación NPCG, con la base de LULC MODIS y con el valor de $Z=15$ fue considerada como el experimento de referencia.

EXPERIMENTO	Base de datos de	Base de datos	Parámetro
CRU Z1	CRU	MODIS	1
CRU Z10	CRU	MODIS	10
CRU Z15	CRU	MODIS	15
CRU Z20	CRU	MODIS	20
CRU Z30	CRU	MODIS	30
GPCC Z1	GPCC	MODIS	1
GPCC Z10	GPCC	MODIS	10
GPCC Z15	GPCC	MODIS	15
GPCC Z20	GPCC	MODIS	20
GPCC Z30	GPCC	MODIS	30
TRMMv6 Z1	TRMMv6	MODIS	1
TRMMv6 Z10	TRMMv6	MODIS	10
TRMMv6 Z15	TRMMv6	MODIS	15
TRMMv6 Z20	TRMMv6	MODIS	20
TRMMv6 Z30	TRMMv6	MODIS	30
TRMMv7 Z1	TRMMv7	MODIS	1
TRMMv7 Z10	TRMMv7	MODIS	10
TRMMv7 Z15	TRMMv7	MODIS	15
TRMMv7 Z20	TRMMv7	MODIS	20
TRMMv7 Z30	TRMMv7	MODIS	30
NPCG Z1	NPCG	MODIS	1
NPCG Z10	NPCG	MODIS	10
NPCG Z15	NPCG	MODIS	15
NPCG Z20	NPCG	MODIS	20
NPCG Z30	NPCG	MODIS	30
GLC	NPCG	GLC	15
SERENA	NPCG	SERENA	15

Tabla III: Los 27 experimentos realizados con el modelo InVEST modificando la base de datos de precipitación anual y de uso/cobertura de suelo (LULC) utilizadas y el valor del parámetro ec hidrológico Z. En el recuadro se señala el experimento de referencia (experimento NPCG Z15).

3. RESULTADOS

3.1. Producción de agua en la Cuenca del Río Limay

La producción de agua simulada con el modelo InVEST para el experimento de referencia NPCG Z15 (Figura 3, Tabla III), evidencia que la subcuenca Aluminé situada al noroeste de la cuenca (N° 22, Figura 1) es la que contribuye con una mayor producción de agua a la CRL con $58 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ (Figura 3). Las subcuencas que le siguen en relevancia son la subcuenca Nahuel Huapi (N° 9 Figura 1), la subcuenca del Río Chimehuin (N° 16 Fig.1); y la subcuenca del Río Caleufu (N° 10 Figura 1). Las subcuencas

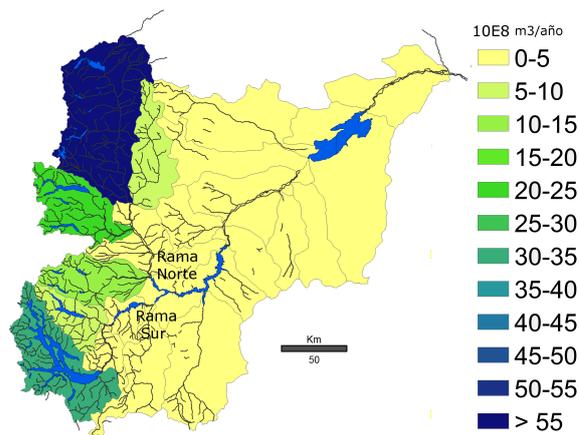


Figura 3: Producción de agua anual total por subcuenca (Unidad: $10^8 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$) modelada con InVEST para el experimento de referencia NPCG Z15 (Tabla III).

alejadas de la cabecera de cuenca y las ubicadas en la parte inferior de la cuenca producen menos de $5 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$.

El Río Limay tiene tributarios importantes en dos ramas, norte y sur (Fig.1). La rama norte, formada por los ríos Caleufu, Aluminé, Chimehuin que son tributarios del Collon Cura (involucra las subcuencas 1, 10, 13, 16 y 22, totalizando 15820 km², Figura 1), tiene una contribución relativa en la producción de agua total de la cuenca del 62% en el experimento de referencia. Esta rama tiene 10 lagos principales, con un área aproximada de 270 km², que atenúan el régimen pluvionival. Por otro lado, la rama sur, formada por los ríos Trafal y Limay Superior (involucra las subcuencas 3, 5, 6 y 8, totalizando 5650 km², Figura 1), tiene una contribución relativa en la producción de agua total del 13%. A pesar de las diferencias importantes entre las contribuciones de la rama norte y sur, es relevante destacar que la CRL es un sistema hidrográfico complejo con más de 40 lagos de origen glaciar, ubicados en las nacientes de los principales tributarios del Río Limay, que actúan como atenuadores del régimen pluvionival. De los 40 lagos más importantes, el Lago Nahuel Huapi y el Lago Trafal, ubicados en la rama sur, son los más grandes (70% de la superficie total

de los lagos de la cuenca) por lo que su efecto regulador es relevante en este sector de la cuenca.

Por otro lado, es interesante notar que el 40 % de esta cuenca está protegida por dos grandes Parques Nacionales, el Parque Nacional Nahuel Huapi y el Parque Nacional Lanin. Ambos parques, están situados en la cabecera de la cuenca, coincidente con las regiones donde se da la mayor producción de agua. Por lo que además del rol fundamental que cumplen los Parques Nacionales en conservar aéreas representativas de una región fitozogeográfica en su estado natural, en esta cuenca indirectamente están protegiendo el servicio ecosistémicos de producción de agua (cantidad y calidad de agua) y los bienes asociados (producción de energía hidroeléctrica, turismo y pesca recreativa, etc).

3.2. Sensibilidad a la precipitación y al parámetro ecohidrológico Z

Las simulaciones forzadas con la base de datos de precipitación CRU y las dos versiones de TRMM concuerdan con el experimento de referencia (forzado con la base de datos de precipitación NPCG) en la distribución de subcuencas que más agua producen en la cuenca (Figura 4), aunque varían en magnitud, subestimando en general la producción de agua respecto a NPCG en estas subcuencas (Figura 5). La subestimación de la producción de agua en las subcuencas de la cabecera como Aluminé está en el rango -25 a -65 % , asociado a diferencias en las bases de precipitación respecto a NPCG en el rango de -15 a -50 % (Figura 5). Las simulaciones forzadas con TRMMv7 son las que presentan los desvíos menores respecto de NPCG en la mayor parte de las subcuencas de la cabecera, en concordancia con los mapas de precipitación media y las diferencias en la precipitación (Figura 4 y Figura 5).

Las simulaciones forzadas con TRMMv6 son las que muestran los valores inferiores de producción de agua en la cuenca, debido a que esta base ubica el máximo de precipitación hacia el oeste de la cabecera de cuenca (con valores mayores a

1500 mm año⁻¹, no mostrado. Detalles en Figura 2 de Pessacg y otros 2015). La base de datos TRMMv6 muestra en la cabecera de cuenca de la CRL valores máximos entre 600-1000 mm año⁻¹ mientras que la versión TRMMv7 ubica valores medios anuales de precipitación del orden de 1500 mm año⁻¹ en la cabecera de la CRL (Figura 4).

Las simulaciones forzadas con la base de datos GPCC son las que presentan mayores diferencias respecto al resto. Estas simulaciones muestran que la subcuenca más productora de agua es la del Nahuel Huapi (N° 9, Figura 1) y simulan mayor producción de agua en las subcuencas internas de la CRL, en concordancia con el campo de precipitación media para esta base de datos (Figura 4) y las diferencias en la precipitación respecto a NPCG (Figura 5). En la subcuenca Aluminé, GPCC subestima en un 45 % la producción de agua respecto a NPCG, asociado con una subestimación de la precipitación del 35 %, y sobreestima en un 35 % la producción de agua en la subcuenca Nahuel Huapi (N°9, Figura 1), asociado con una sobrestimación de la precipitación del 20 % (Figura 5) La dispersión entre la producción de agua simulada con las diferentes bases de datos de precipitación es mayor a $10 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ en las dos subcuencas que mayor agua producen (Figura 6a). Estos valores de dispersión tienen el mismo orden de magnitud que los valores de producción de agua en esta zona (Figura 4), evidenciando la disparidad que hay entre bases de datos de precipitación en la cabecera de esta cuenca (Figura 4, primera columna). Esto es similar a lo que ocurre en otra regiones de Patagonia como la Cuenca del Río Chubut (Pessacg y otros 2015).

Por otro lado, los cambios en el parámetro ecohidrológico Z también conducen a cambios en la magnitud de la producción de agua. Para todas las bases de datos de precipitación la sensibilidad es mayor para los valores de Z chicos (de 1 a 10) que para Z mayores. Sin embargo, el orden de las subcuencas más productoras es invariante a los cambios de Z (Figura 4). La sensibilidad al Z es mayor en las dos

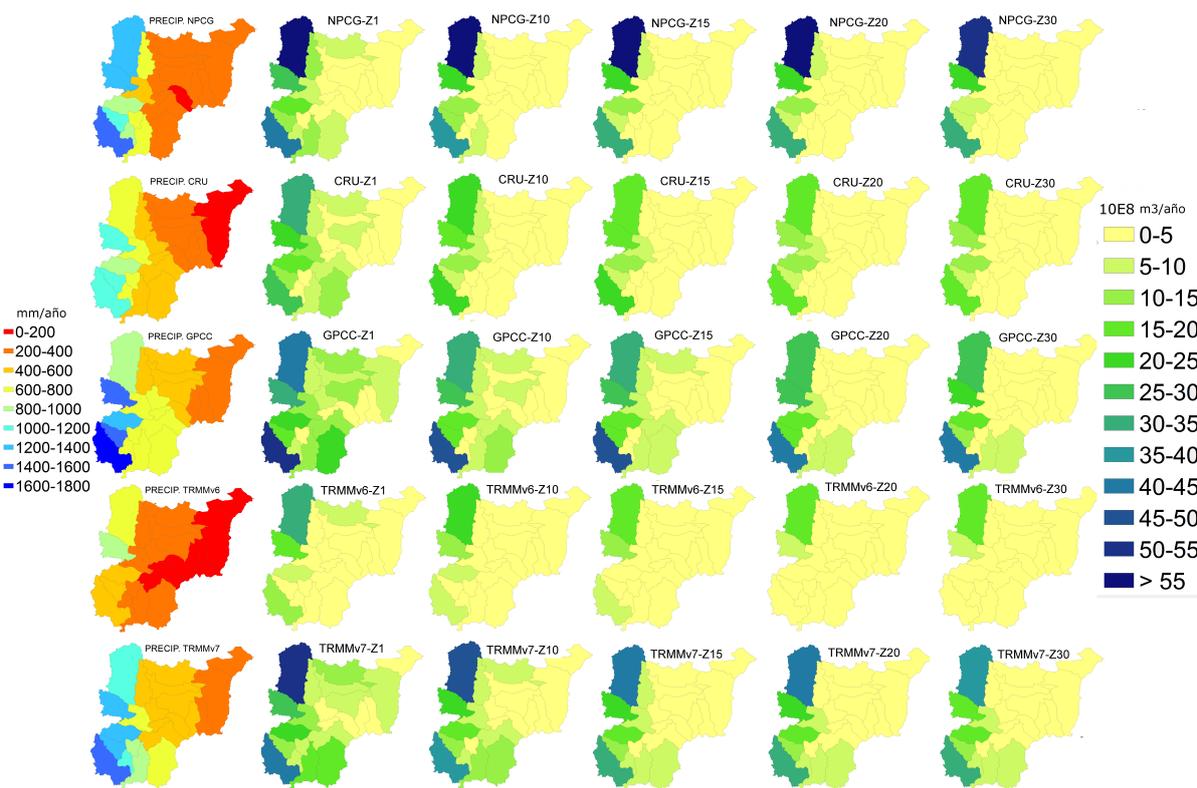


Figura 4: Precipitación de cada base de datos reticulada utilizada (primer columna). Producción de agua anual por subcuenca (Unidad: $10^8 \text{m}^3 \text{año}^{-1}$) modelada con InVEST para diferentes bases de datos de precipitación (filas) y con diferentes valores del parámetro ecohidrológico Z (columnas).

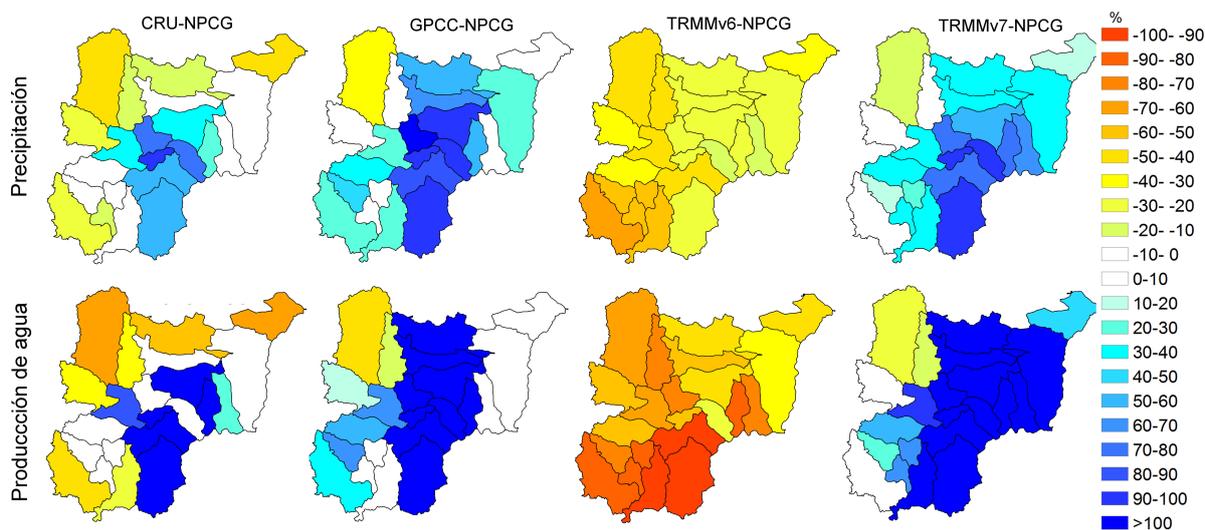


Figura 5: Diferencia relativa (%): entre la precipitación de cada una de las bases de datos respecto a la base de datos NPCG (panel superior) y entre la producción de agua simulada con la base de datos NPCG y el resto, considerando el valor de $Z = 15$ (panel inferior).

subcuencas más productoras, Aluminé y Nahuel Huapi, alcanzando valores de dispersión de $50 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ (Figura 6b), lo que demuestra la relevancia de calibrar adecuadamente el modelo utilizando este parámetro. La mayor sensibilidad a valores chicos de Z como a las subcuencas más productoras, está asociada a la forma logarítmica de la curva teórica de Budyko en la que se basa este modelo para relacionar la evapotranspiración con la precipitación. La sensibilidad de la relación evapotranspiración/precipitación al parámetro Z es muy grande cuando los valores de Z son chicos (Zhang y otros 2004).

En el caso de condiciones muy secas (regiones con baja producción de agua -índice de aridez cercano a 0-) la evapotranspiración está limitada por el agua disponible (precipitación) y no depende del parámetro Z (de las características de la cuenca). Mientras que para los casos en los que el índice de aridez es cercano a 1, la disponibilidad de agua y energía (precipitación y evapotranspiración potencial, respectivamente) tienen el mismo control sobre la evapotranspiración y en este caso sí son sensibles al valor del parámetro Z (Zhang y otros 2004). Además, en trabajos previos (Pessacg y otros 2015; Hamel y Guswa 2015) se ha encontrado que la producción de agua simulada con el modelo InVEST es mucho más sensible a sobreestimaciones de precipitación que a subestimaciones, asociado de la misma manera con la forma de la ecuación de Budyko.

3.3. Sensibilidad a la base de datos de LULC

Las simulaciones realizadas con las tres bases de datos de LULC muestran el mismo orden de cuencas productoras de agua, pero varían en la magnitud (Figura 7). Las simulaciones realizadas con la base de LULC GLC presentan más producción de agua en la mayor parte de las subcuencas. Las diferencias entre GLC y MODIS son mayores a $10 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ en la subcuenca Nahuel Huapi (N° 9, Figura 1) y en la subcuenca del río Pichileufú (N° 6, Figura 1), representando un aumento de la producción de agua del 4 % y 34 % respectivamente. Esta sobrestimación de la

producción de agua está vinculada con la fuerte subestimación de la evapotranspiración estimada a partir de las categorías de la base de datos GLC respecto a MODIS en las subcuencas Nahuel Huapi y Pichileufú del orden de 60 y 80 mm año⁻¹ que representan un 7 y 15 % respectivamente (Figura 7).

Por su parte, las simulaciones con la base de LULC SERENA presentan diferencias mayores a $8 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ con la simulación de referencia en las subcuencas 22 y 9 asociadas a diferencias en la evapotranspiración del orden de 25 mm año⁻¹ (aproximadamente el 4 % respecto a MODIS). La producción de agua se subestima en la subcuenca Aluminé (N°22, Figura 1) y sobrestima en la subcuenca Nahuel Huapi en menos del 5 % respecto de la base de LULC MODIS (Figura 7).

En Pichileufú la mayor parte de la subcuenca es arbustal abierto en MODIS mientras que en GLC más del 50 % de la superficie es estepa patagónica (Tabla IV y Figura 2). La estepa patagónica tiene un valor de K_c menor que el arbustal (Tabla IV) por lo que el valor de evapotranspiración es menor (Figura 7) y consecuentemente el balance entre precipitación y evapotranspiración del que resulta la producción de agua es mayor que en las regiones con arbustal. En el caso de la subcuenca Nahuel Huapi (N° 9, Figura 1), las tres bases de datos consideran más del 43 % de la superficie como bosque, pero MODIS presenta un 27 % de pastizal cerrado, mientras que GLC considera un 18 % de páramo y SERENA un 34 % de arbustal cerrado (Tabla IV y Figura 2). Estas diferencias generan una disminución del K_c total de la subcuenca (K_c ponderado, Tabla IV) en las simulaciones realizadas con SERENA y GLC respecto de MODIS, disminuyendo a su vez la evapotranspiración y consecuentemente incrementando la producción de agua (Figura 7).

Como es esperable el signo de las diferencias en la producción de agua simulada con las diferentes bases de LULC tiene una correlación directa con los mapas de evapotranspiración estimados para cada base de datos LULC. Sin embargo, la magnitud de los cambios

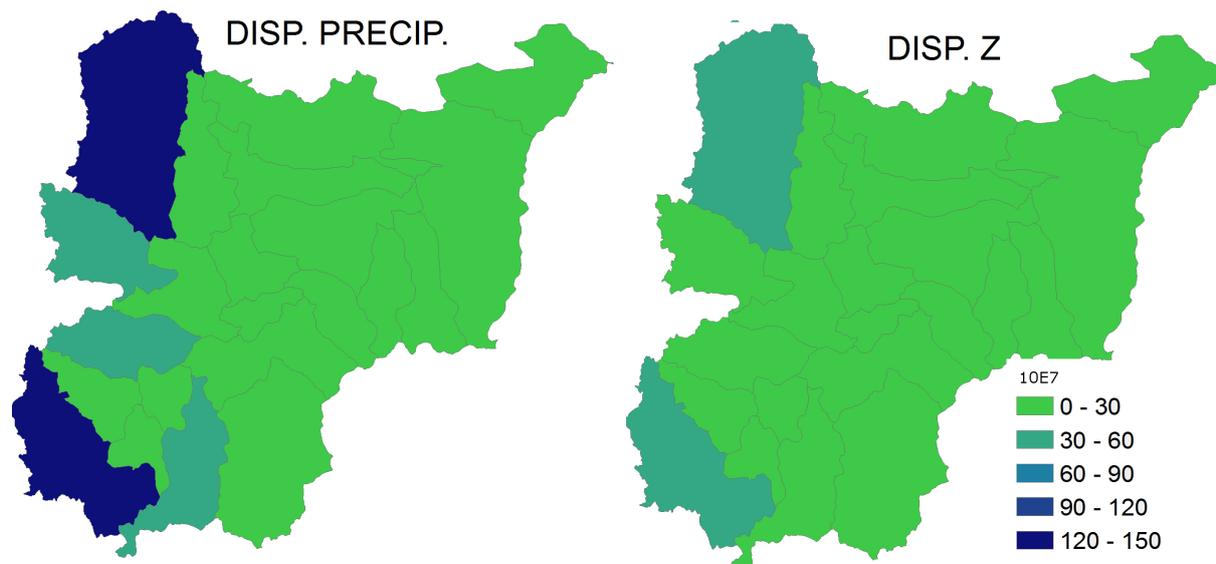


Figura 6: Dispersión entre la producción de agua simulada con InVEST para (a) las distintas bases de datos de precipitación (considerando los experimentos con $Z=15$) y (b) para los distintos valores del parámetro ecohidrológico Z (considerando los experimentos realizados con la base de datos de precipitación NPCG), respecto de la media (Unidades $10^7 \text{m}^3 \text{año}^{-1}$).

no se correlaciona linealmente ya que utilizar diferentes bases de LULC implica no sólo cambios en la evapotranspiración sino también en la profundidad de las raíces, que a su vez impacta en la capacidad del suelo de almacenar agua (Figura 7).

Es importante destacar, que hay cambios importantes en el LULC que representan las diferentes bases de datos en las subcuencas del norte y noreste de la CRL (N° 19-20-21, Figura 1), donde SERENA categoriza amplias regiones como suelo desnudo y las otras dos bases de datos consideran arbustal abierto a esta zona (Figura 2). Además, fuera de la cuenca alta la base MODIS categoriza toda la región como arbustal abierto, mientras que GLC y SERENA presentan una combinación de pastizal abierto y cerrado, estepa desértica y arbustal cerrado (Figura 2). Estas subcuencas, si bien presentan diferencias importantes en la evapotranspiración (Figura 7) no son grandes productoras de agua debido a las escasas precipitaciones que se registran, por lo que el impacto en la estimación de la producción de agua de estos cambios no es significativo en términos absolutos.

3.4. Calibración y desempeño del modelo

La comparación con datos en la Estación Huechahue (cierre de las subcuencas 1 y 22) (Figura 1), región donde se produce la mayor cantidad de agua, muestra que los resultados más satisfactorios se obtienen utilizando la base de datos de precipitación NPCG (Figura 8). En estas subcuencas la combinación de NPCG con valores de $Z \geq 15$ permite reducir el error a valores inferiores al 10%. Los experimentos realizados con el resto de las bases de datos de precipitación subestiman fuertemente la producción de agua en esta subcuenca, con valores mayores al 50%. Para algunas bases de datos, como TRMMv7 el modelo se puede calibrar en esta región utilizando un valor de $Z=1$, sin embargo para el resto de las simulaciones, forzadas con otras bases de datos de precipitación como GPCC, CRU o TRMMv6, no hay valor del parámetro Z que permita calibrar el modelo en las subcuencas 1 y 22 (Figura 8).

En la Estación Estancia Collunco (cierre de la subcuenca 16, Figura 1) se obtienen muy buenos resultados con NPCG, TRMMv7 y GPCC. Con

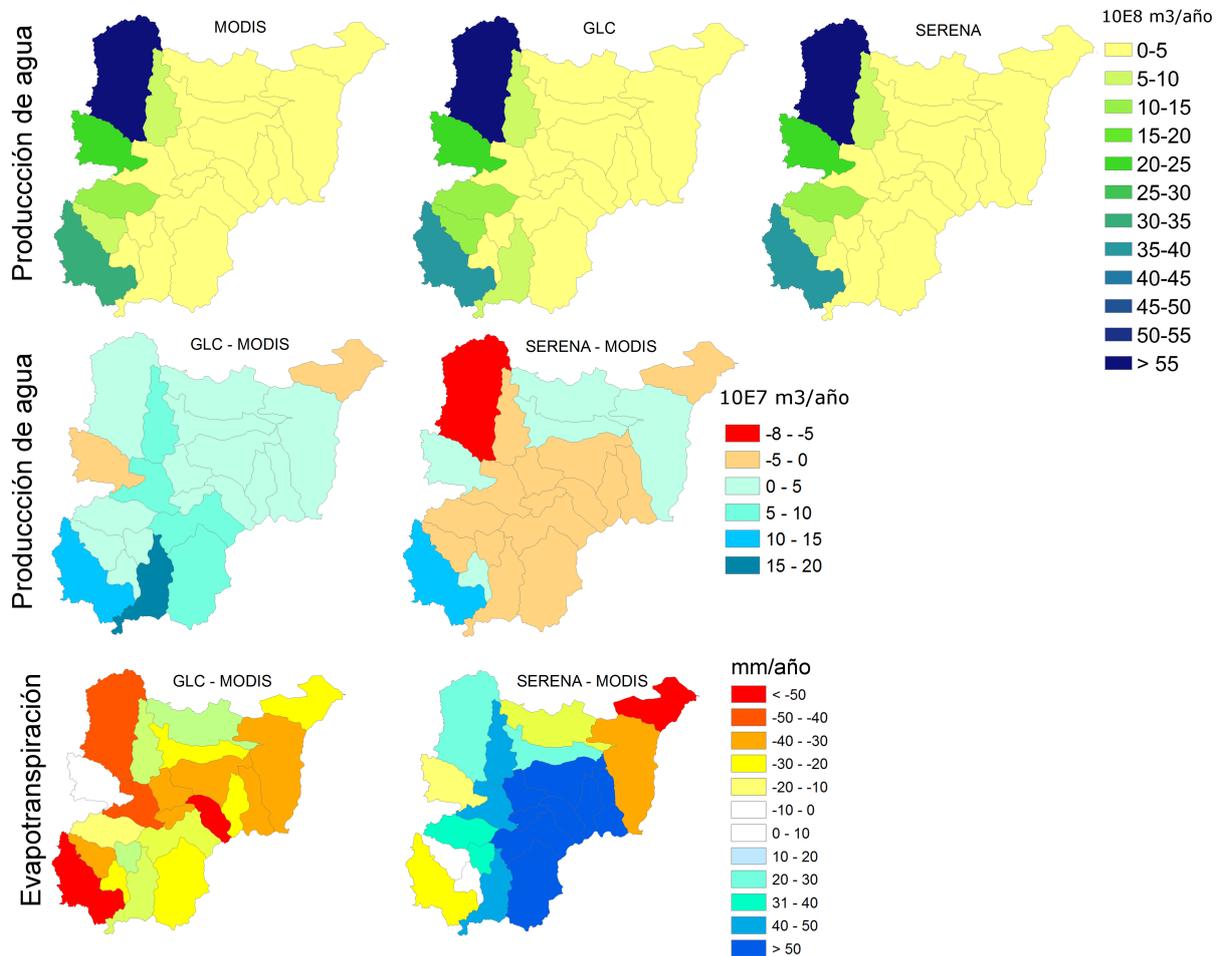


Figura 7: La producción de agua (Unidad: $10^8 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$) modelada con InVEST para diferentes bases de LULC (panel superior). Sensibilidad de la producción de agua a la base de LULC utilizada expresada como diferencia en volumen por subcuenca respecto a la base de datos MODIS (panel medio) En este caso MODIS se refiere al experimento NPCG Z15 de la Tabla III. El panel inferior muestra la sensibilidad de la evapotranspiración a la base de LULC expresada como la diferencia media para cada subcuenca con respecto a la base de datos MODIS (panel inferior).

LULC	Kc	NAHUEL HUAPI (N° 9)			ALUMINE (N°22)		PICHILEUFÚ (N° 6)	
		MODIS	GLC	SERENA	MODIS	GLC	MODIS	GLC
Cultivos	0,65	0,5	2,0	-	0,6	2,0	0,5	0,3
Pastizal Cerrado	0,65	27,8	0,1	0,4	22,3	0,1	27,8	-
Arbustal Cerrado	0,5	0,3	5,7	34,3	0,1	5,7	0,3	13,2
Desierto	0,1	-	2,2	-	-	2,2	-	0,0
Bosque	1	43,6	43,1	45,0	22,1	43,1	43,6	7,2
Páramo	0,6	-	18,6	-	-	18,6	-	1,8
Vegetación degradada	0,35	-	-	-	-	-	-	0,1
Pastizal Abierto	0,55	-	3,1	-	-	3,1	-	15,1
Arbustal Abierto	0,4	10,1	2,5	-	51,4	2,5	10,1	2,3
Mallines	1	0,5	0,2	-	0,5	0,2	0,5	0,5
Hielo / Nieve	0,4	0,3	0,2	0,1	-	0,2	0,3	-
Estepa Desértica	0,3	-	9,4	-	-	9,4	-	57,9
Urbano	0,1	1,5	0,1	0,5	0,1	0,1	1,5	
Agua	1	14,0	12,4	16,6	1,6	12,4	14,0	0,4
Suelo Desnudo	0,2	0,3	-	2,5	0,2	-	0,3	-
Sabana	0,7	0,4	-	-	0,6	-	0,4	-
KC PONDERADO		0,82	0,77	0,8	0,65	0,62	0,51	0,43

Tabla IV: Porcentaje de la superficie que ocupa cada categoría de LULC de cada base de datos considerada (MODIS, GLC, SERENA), en las tres subcuencas que presentan mayor sensibilidad. Kc es el coeficiente de evapotranspiración de la planta relacionada a cada categoría de LULC. El Kc ponderado fue calculado a partir del área que considera cada base de datos de cada categoría de LULC.

la base de datos de precipitación NPCG y $Z=15$ el error es inferior al 10 %.

En la Estación Nahuel Huapi, (cierre de la subcuenca N°9, Figura 1) los errores son inferiores al 10 % para las bases de datos de precipitación TRMMv7 y NPCG en combinación con valores de $Z \leq 15$. Para el resto de las bases de datos de precipitación no hay valores del parámetro Z que permitan calibrar el modelo con errores inferiores al 20 %.

En los tres puntos de cierre evaluados, las simulaciones realizadas con la base de datos SERENA, en combinación con $Z = 15$ y la base de precipitación NPCG, son las que presentan los desvíos más bajos (Figura 8), reduciendo el error en comparación con MODIS.

En síntesis, con la base de LULC SERENA, la base de precipitación NPCG, y el valor del parámetro ecohidrológico $Z = 15$, se obtiene un buen desempeño del modelo, con errores inferiores al 10 % en los tres puntos de cierre evaluados.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Considerando la producción de agua como uno de los servicios ecosistémicos hidrológicos más relevantes, se buscó en este trabajo evaluar la capacidad del modelo InVEST para simular dicho servicio en la Cuenca del Río Limay. En particular, se estudió la sensibilidad a los insumos del modelo que mayor incerteza

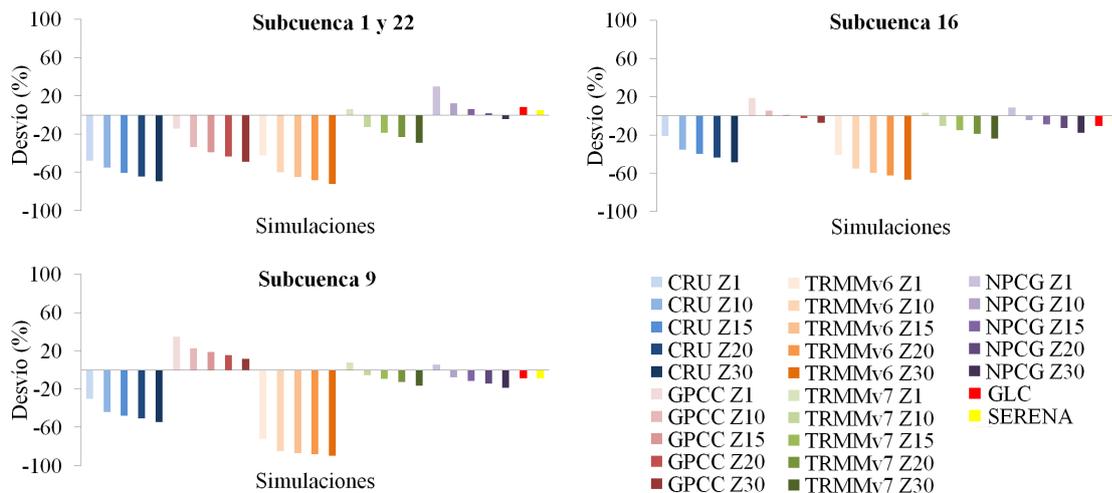


Figura 8: Desvío (%) entre la producción de agua anual modelada y los datos de caudal en los tres puntos de cierre para los diferentes experimentos. La comparación fue realizada como se explica en la metodología.

introducen en la simulación de la producción de agua: bases de datos de precipitación, bases de datos de uso/cobertura del suelo y; parámetro ecohidrológico Z. Posteriormente se realizó un análisis de calibración con datos de caudal medidos in situ.

Las simulaciones realizadas con las diferentes bases de datos de precipitación exhiben en general el mismo patrón espacial de producción de agua, evidenciando que las subcuencas que mayor agua producen son Aluminé y la subcuenca Nahuel Huapi. La rama norte de la cuenca del Río Limay es la que aporta más del 60% de la producción de agua total de la cuenca.

Sin embargo, la magnitud de la producción de agua simulada con InVEST tiene una importante incerteza asociada a las diferencias entre las bases de datos de precipitación. Las bases de datos globales o cuasi-globales de precipitación presentan baja resolución espacial y muestran errores muy marcados en regiones con fuerte gradiente de precipitación y con baja densidad de datos meteorológicos, como ocurre en la cabecera de cuenca del Río Limay. En esta cuenca, cada una de las bases de precipitación utilizadas posiciona el gradiente y el máximo

de precipitación en diferentes zonas de la cabecera de cuenca, lo que se traduce en errores relevantes en la producción de agua simulada. Resultados similares se encontraron en la Cuenca del Río Chubut (Pessacg y otros 2015), evidenciando las fuertes limitaciones asociadas al uso, sin evaluación previa, de bases de datos de precipitación globales en estudios de modelado de servicios ecosistémicos hidrológicos en las cuencas patagónicas.

Con la base de datos de precipitación NPCG, generada para la región Patagonia norte con una mayor densidad de datos de precipitación, se obtuvieron resultados muy satisfactorios, calibrados con datos de caudal en tres puntos de cierre dentro de la cuenca.

El análisis de sensibilidad al parámetro Z mostró que la producción de agua es más sensible a cambios en los valores de Z pequeños que a cambios en los valores de Z mayores, asociado a la forma de la ecuación de Budyko en la que se basa este modelo y que permite relacionar la evapotranspiración con la precipitación (Zhang y otros 2004).

Las bases de datos de LULC consideradas

presentan diferencias importantes entre sí en algunas regiones, pero sólo las diferencias ubicadas en la cabecera de cuenca impactan en la simulación de la producción de agua. En los tres puntos de cierre, la simulación realizada con la base de datos SERENA reduce el desvío respecto a MODIS.

El valor de $Z=15$ calculado con la ecuación de Donohue, en combinación con la base de datos de precipitación NPCG, y la base de LULC SERENA permite un buen desempeño del modelo y calibración en los tres puntos de cierre considerados con errores en la producción de agua simulada inferiores al 10 %.

Estos resultados evidencian la importancia de contar con bases de datos regionales, en este caso particular de precipitación y uso/cobertura de suelo, con mayor resolución espacial, densidad de datos, y categorías más representativas de la zona a estudiar que permitan simular procesos hidrológicos con mayor precisión.

En su conjunto, los resultados muestran que el rango de errores introducido en la simulación de producción de agua en los tres puntos de cierre considerados debido a las bases de precipitación está en el orden de -90 % a 20 % (en combinación con $Z=15$); el rango de errores a las bases de LULC está en el orden de -12 % a 8 %, y el rango de errores al parámetro Z está en el orden de -20 % a 30 % (en combinación con la base de datos de precipitación NPCG).

El impacto en la simulación de la producción de agua de las diferencias en evapotranspiración (asociadas al uso de diferentes bases de LULC) es menor que el impacto de las diferencias en precipitación. Sin embargo, en las cabeceras de cuenca los cambios en la evapotranspiración generan impactos relevantes en la producción de agua simulada. Esto es importante ya que en estas regiones, posibles escenarios de cambio en la cobertura de suelo (como deforestación o reforestación) podrían modificar fuertemente la producción de agua de toda la cuenca.

Otro aspecto a destacar es que los rangos de errores que se pueden introducir al modelar SEH demuestran la necesidad de realizar análisis de sensibilidad y calibración para su aplicación en cada región y previo a su utilización en la toma de decisiones.

Finalmente, es interesante notar que el 40 % de esta cuenca está protegida por dos grandes Parques Nacionales, el Parque Nacional Nahuel Huapi y el Parque Nacional Lanín. Ambos parques, están situados en la cabecera de la cuenca, coincidente con las regiones donde se da la mayor producción de agua. Por lo que además del rol fundamental que cumplen los Parques Nacionales en conservar áreas representativas de una región fitozogeográfica en su estado natural, en esta cuenca indirectamente están protegiendo el servicio ecosistémico de producción de agua (cantidad y calidad de agua) y los bienes asociados (producción de energía hidroeléctrica, turismo y pesca recreativa, etc).

Agradecimientos: Este trabajo fue financiado por la Red para la Conservación de los Ecosistemas Fluviales de la Patagonia (CONICET y The Nature Conservancy), Resolución 3213/2, y por el Proyecto PICT-2014-1890

REFERENCIAS

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998: Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. Available at: <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>
- Balvanera, P., Uriarte, M., Almeida-Leñero, L., Altesor, A., DeClerck, F., Gardner, T., Hall, J., Lara, A., Lateral, P., Peña-Claros, M., Silva Matos, D.M., Vogl, A.L., Romero-Duque, L.P., Arreola, L.F., Caro-Borrero, Á.P., Gallego, F., Jain, M., Little, C., de Oliveira, X. R., Paruelo, J.M., Peinado, J.E., Poorter, L., Ascarrunz,

- N., Correa, F., Cunha-Santino, M.B., Hernández-Sánchez, A.P. y Vallejos, M., 2012: Ecosystemservicesresearch in LatinAmerica: Thestate of the art. *Ecosyst. Serv.* 2, 56–70.
- Bianchi, E., Villalba, R., Viale, M. Couvreur FyMarticorena R., 2016: New precipitation and temperature grids for northern Patagonia: Advances in relation to global climate grids. *J Meteorol Res*, 30: 38. doi:10.1007/s13351-015-5058-y
- Blanco, P.D., Colditz, R.R., López, G., et al, 2013: Remote Sensing of Environment A land cover map of Latin America and the Caribbean in the framework of the SERENA project. *Remote Sensing of Environment* 132:13-31
- Blanco, P.D., Metternicht, G.I., Del Valle, H.F., Hardtke, L.A. y Bouza, P.J., 2015: A remote sensing and fuzzy multi-objective linear programming approach to model impact of land management decisions on ecosystems services of rangelands. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* 3369-3372
- Broxton, P.D., Zeng, X., Sulla-Menashe, D. y Troch, P.A., 2014: A Global Land Cover Climatology Using MODIS Data. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 53, 1593–1605. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-13-0270.1>
- Budyko, M.I., 1974: *Climate and Life*. Academic, San Diego, CA, USA, pp. 321–330 (translated from Russian by: Miller, D. H.)
- Carreño, L., Frank, L.C. y Viglizzo, E.F., 2012: Tradeoffs between economic and ecosystem services in Argentina during 50 years of land-use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 154, 68–77. Donohue, R.J., Roderick, M.L. yMcVicar, T.R., 2012: Roots, storms and soil pores: incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model. *J. Hydrol.* 436–437, 35–50.
- Eva, H.D, de Miranda E.E., Di Bella C.M., Gond, V., Huber, O., Sgrenzaroli, M., Jones, S., Coutinho, A., Dorado, A., Guimares M., Elvidge C., Achard F., Belward A.S., Bartholom E., Baraldi A., De Grandi G., Vogt P., Fritz S. y Hartley A., 2003: The Land Cover Map for South America in the Year 2000. GLC2000 database, European Commision Joint Research Centre. <http://www-gem.jrc.it/glc2000>.
- García Asorey, M., Flaherty, S., Liberoff, A., Aigo, J.; Pascual, M., 2015: Validación del Uso de la Red Social “flickr” para la caracterización del Turismo y Recreación en Patagonia. IV Congreso Internacional de Servicios Ecosistémicos en los Neotrópicos: de la investigación a la acción. 30 de septiembre al 3 de octubre 2015. Mar del Plata, Argentina. Garreaud, R., Lopez, P., Minvielle, M., Rojas, M., 2013: Large-scale control on the Patagonian climate
- Hamel, P. y Guswa, A. J., 2015: Uncertainty analysis of a spatially-explicit annual waterbalance model: case study of the Cape Fear catchment, NC. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 19, 839–853.
- Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., Gu, G., Nelkin, E.J., Bowman, K.P., Hong, Y., Stocker, E.F. y Wolff, D.B., 2007: The TRMM multi-satellite precipitation analysis: quasi-global, multi-year, combined-sensor precipitation estimates at fine scale. *J. Hydrometeorol.* 8 (1), 38–55.
- Huffman, G.J., 2012: Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 3.0 for the NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (I-MERG). GPM Project (Greenbelt, MD, 29 pp.) (Available at http://pmmdev.pps.eosdis.nasa.gov/sites/default/files/document_files/).
- Insel, N., Poulsen, C. y Ehlers, T., 2009: Influence of the Andes Mountains on South American moisture transport, convection, and precipitation. *Clim. Dyn.* <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-009-0637-1>.
- Junzhi, L., A-Xing, Z. y Duan, Z., 2012: Evaluation of TRMM 3B42 Precipitation product using rain gauge data in Meichuan Waterhshed, Poyang Lake Basin, China. *J. Resour. Ecol.* 3 (4), 359–366.
- Kaptué Tchuenté A.T., Roujean J.L., De Jong S.M., 2011: Comparison and relative quality assessment of the GLC2000, GLOBCOVER,

- MODIS and ECOCLIMAP land cover data sets at the African continental scale, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(22) 207-219, doi.org/10.1016/j.jag.2010.11.005.
- Lascano M, 2007: Dónde y cómo se mide la nieve en los Andes. *Contribuciones Científicas GAEA (Sociedad Argentina de Estudios Geográficos)* 19,267-279
- Lattera, P., Jobbágy, E. y Paruelo, J., 2011: Valoración de Servicios Ecosistémicos. Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. Lattera P, Castellarini F, Orúe ME ECOSER: Un protocolo para la evaluación biofísica de servicios ecosistémicos y la integración con su valor social. *Valorac. Serv. Ecosistémicos Conceptos Herram. Apl. Para El Ordenamiento Territ.* Ediciones INTA 359–390
- Martínez, S., 2002: Cuenca del río Limay. Cuenca N° 63. Atlas digital de los recursos hídricos superficiales de la República Argentina. Disponible en www.hidricosargentina.gov.ar
- Mendoza, G., Ennaanay, D., Conte, M., Walter, M.T., Freyberg, D., Wolny, S., Hay, L., White, S., Nelson, E. y Solorzano, L. 2011: Water supply as an ecosystem service for hydropower and irrigation. En: Kareiva, P., Tallis, H., Ricketts, T., Daily, G. y Polasky, S. (Eds.), 2011: *Natural capital, theory and practice of mapping ecosystem services* Biology. Oxford University Press. Millennium Ecosystem Assessment, 2005: *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Milly, P., 1994: Climate, soil-water storage, and the average annual water-balance. *Water Resour. Res.* 30 (7), 2143–2156. <http://dx.doi.org/10.1029/94WR00586>.
- Mitchell, T.D. y Jones P. D., 2005: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int J Climatology* vol. 25. Royal Meteorological Society, pp. 693–712. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1181>.
- Paruelo, J.M., Golluscio, R.A., Guerschman, J.P., Cesa, A., Jouve, V.V. y Garbulsky, M.F., 2004: Regional scale relationships between ecosystem structure and functioning: the case of the Patagonian steppes. *Global Ecol. Biogeogr.* 13,385-395
- Paruelo, J., Jobbágy, E.G., Lattera, P., Dieguez, H., García Collazo, A. y Panizza, A., (Eds), 2015: *Ordenamiento Territorial Rural. Conceptos, métodos y experiencias*. FAO – MINAGRI – FAUBA, <http://www.fao.org/3/a-i4195s.pdf>.
- Pessacg, N., Flaherty, S., Brandizi, L., Solman, S. y Pascual, M., 2015: Getting water right: a case study in water yield modelling based on precipitation data. *Science of the Total environment* 537, 225–234
- Redhead, J.W., Stratford, C., Sharps, K., Jones, L., Ziv, G., Clarke, D., Oliver, T.H. y Bullock, J.M., 2016: Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale. *Sci Total Environ.*
- Salio, P., Hobouchian, M.P., GarcíaSkabar, Y. y Vila, D., 2015: Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over southern South America using a dense rain gauge network. *Atmospheric Research*, 163:146-161
- Sánchez Brito, I., Almendarez Hernández, M.A., Morales Zárate, M.V. y Salinas Zavala, C.A., 2013: Valor de existencia del servicio ecosistémico hidrológico en la Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna, Baja California Sur, México. *Frontera Norte*, Vol 25, N° 50, 97-129
- Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Rudolf, B. y Ziese, M., 2011: GPCP Full Data Reanalysis Version 6.0 at 0.5°: Monthly Land Surface Precipitation From Rain-Gauges Built on GTS-based and Historic Data. http://dx.doi.org/10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V6_050.
- Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., Kennedy, C., Verutes, G., Kim, C.K., Guannel, G., Papenfus, M., Toft, J., Marsik,

- M., Bernhardt, J., Griffin, R., Glowinski, K., Chaumont, N., Perelman, A., Lacayo, M. Mandle, L., Hamel, P., Vogl, A.L., Rogers, L., and Bierbower, W. 2016. InVEST 3.2.0 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.
- SSRH (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación – Instituto Nacional del Agua). 2011. Atlas de Cuencas y Regiones Hídricas Superficiales de la República Argentina, Versión 2010. Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Buenos Aires.
- Vich, A.I.J., Norte, F.A. y Lauro, C., 2014: Análisis regional de frecuencias de caudales de ríos pertenecientes a cuencas con nacientes en la Cordillera de los Andes. *Meteorológica*, 39(1):3-26
- Vigerstol, K. y Aukema, J., 2011: A comparison of tools for modelling freshwater ecosystem services. *J Environmental Management*, 92:2403-2409.
- Zhang, L., Hickel, K., Dawes, W. R., Chiew, F. H. S., Western, A. W., Briggs, P. R., 2004: A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resources Research*. Vol. 40 (2)

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.