

DOI: 10.24850/j-tyca-2021-01-03

Artículos

Variabilidad espacial del rendimiento hídrico ante el cambio de uso del suelo y escenarios pluviales en la cuenca alta del río Sauce Chico, Argentina

Spatial variability of water yield under land use and cover change and rainfall scenarios in the upper basin of the Sauce Chico River, Argentina

Fernanda Julia Gaspari¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0676-9107>

Andrea Romina Díaz-Gómez², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8919-554X>

Fabio Alejandro Montealegre-Medina³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6242-3813>

¹Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, fgaspari@agro.unlp.edu.ar

²Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, rominadiazgomez@gmail.com

³Becario doctoral CICIPBA-CEIDE, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, fabalmon@gmail.com

Autora para correspondencia: Fernanda Julia Gaspari, fgaspari@agro.unlp.edu.ar

Resumen

El análisis de cambios en la cobertura de suelo es importante y necesario, porque proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de degradación, desertificación, y pérdida de la biodiversidad y servicios ecosistémicos de una región. La evaluación del servicio ecosistémico de provisión hídrica debido al cambio de uso del suelo es primordial en sistemas con alta vulnerabilidad hidrológica. El objetivo de este trabajo fue analizar la distribución espacial del rendimiento hídrico con relación al cambio de uso del suelo (para los años 1997 y 2017) y escenarios de precipitación en la cuenca alta del río Sauce Chico, Tornquist, Argentina, a partir del módulo WY de InVest®, como una herramienta para comprender la variabilidad geoespacial del servicio ecosistémico hidrológico en la cuenca. La agricultura ocupa el 49 % de la cuenca (185

km²) desarrollada sobre áreas de pastoreo y pastizales (64 km²); las zonas urbanas y bosque de ribera ocupan < 1 % del área total de la cuenca para el año 2017. Los resultados sugieren que el rendimiento hídrico total anual para la cuenca es de 224 943 mm. Durante el escenario seco (-30% de la precipitación anual) el rendimiento hídrico disminuyó a 150 495 mm (39.78%). Por el contrario, durante escenario húmedo (+30 de la precipitación anual), el rendimiento hídrico incrementó a 349 940 mm (28.57%). Las áreas rocosas y urbanas presentan máximo rendimiento hídrico seguido por las áreas agrícolas. Las áreas de mayor regulación hídrica corresponden a los pastizales. Los resultados contribuyen al entendimiento de la respuesta hidrológica y proporcionan información base para la toma de decisión y manejo de los recursos hídricos.

Palabras clave: cambio de uso del suelo, precipitación, rendimiento hídrico, InVest, cuenca hidrográfica.

Abstract

Land cover changes analysis is important and necessary, it provides the basis for understanding the trends in the processes of degradation, desertification and loss of biodiversity and ecosystem services in a region. The evaluation of the water provisioning ecosystem service due to land use change is crucial in systems with high hydrological vulnerability. The objective of this paper was analyzing the spatial distribution of water yield in relation to land use change (for the years 1997 and 2017) and rainfall

scenarios in the upper basin of the Sauce Chico River, Tornquist, Argentina. Using the WY module of InVest®, based on GIS and remote sensing information. We found that agriculture areas occupy 49 % of the basin (185 km²) developed on grazing areas and pastures (64 km²), urban areas and riparian forest occupy < 1 % of the total area of the basin by 2017. The model suggests that the total annual water yield for the basin is 224 943 mm. During the dry scenario (-30% of annual precipitation) water yield decreased to 150 495 mm (39.78%). On the contrary, during the wet scenario (+30% of annual precipitation) water yield increased to 349 940 mm (28.57%). Rocky and urban areas show the highest water yield, followed by agricultural areas. The areas with the highest water regulation correspond to grasslands. The results contribute to the understanding of the hydrological response and provide basic information for decision making and water resource management

Keywords: Land use change, precipitation, water yield, InVest, watershed.

Recibido: 31/10/2018

Aceptado: 14/05/2020

Introducción

Los estudios sobre los procesos dinámicos de los cambios en la cobertura de suelo son importantes y necesarios porque proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región determinada (Van Lynden & Oldeman, 1997). El cambio de uso y cobertura del suelo (LULC) altera el ciclo hidrológico, afectando los patrones de evapotranspiración, escurrimiento, infiltración y retención de agua, y cambiando el tiempo y el volumen de agua disponible.

En las últimas décadas, dada la capacidad productiva de los suelos de la zona serrana de la provincia de Buenos Aires, Argentina, los pastizales pampeanos han sido sustituidos por agroecosistemas y evidencian un importante nivel de degradación y un escaso grado de conservación (Vázquez & Zulaica, 2011; Modernel *et al.*, 2016). Este cambio provoca erosión hídrica superficial como consecuencia del actual manejo del suelo, generando la pérdida del horizonte superficial y modificando la disponibilidad de agua superficial y subterránea.

La cuantificación de las funciones ecosistémicas hidrológicas, el uso del suelo y la dinámica del recurso hídrico son clave para el desarrollo de un manejo integral del recurso hídrico a escala de cuencas hídricas (Cotler & Priego, 2004; Barkmann *et al.*, 2008). Conocer e identificar los patrones espaciales de esta interacción es fundamental para generar un análisis de

la alteración de los procesos ambientales, como consecuencia de las decisiones sobre el uso y manejo del suelo en el nivel de cuenca hidrográfica.

El rendimiento hídrico es un servicio ecosistémico que contribuye al bienestar de la sociedad a través de la provisión de agua para consumo, irrigación, recreación e incluso a través de la producción de energía hidroeléctrica. El servicio ecosistémico de provisión hídrica depende de las características biofísicas de la cuenca hídrica (vegetación, topografía, suelo), al igual que de procesos dinámicos, como el cambio de uso y cobertura del suelo y clima (Brauman, Daily, Duarte, & Mooney, 2007; Jackson, Jobbágy, & Noretto, 2009; Noretto, Jobbágy, Brizuela, & Jackson, 2012; Jobbágy, Acosta, & Noretto, 2013).

Para comprender la variabilidad espacial de las funciones ecosistémicas y las potenciales consecuencias del impacto del cambio del uso del suelo y el cambio climático, en la actualidad se implementa el uso de modelos espacialmente explícitos, otorgando una valiosa herramienta para el procesamiento geoespacial por medio de mapas y análisis espacio-temporal. Estos modelos generan escenarios de servicios de provisión hídrica en función del LULC y variabilidad climática (Bangash *et al.*, 2013; Redhead *et al.*, 2016; Zarandian *et al.*, 2017; Trisurat, Aekakkararungroj, Ma, & Johnston, 2018), conformando una plataforma de simulación para la toma de decisiones a nivel productivo en una cuenca hidrográfica. Una herramienta de modelamiento espacial que permite cuantificar, mapear y valorar servicios ambientales es el modelo denominado *Integrated*

Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVest ®). Básicamente, proporciona información sobre la probabilidad de que los cambios en los ecosistemas modifiquen los flujos de beneficios para las personas (Tallis *et al.*, 2013).

El InVest dispone del módulo *Water Yield* (WY) (rendimiento hídrico) para cuantificar el rendimiento hídrico en el paisaje a escala temporal anual, basándose en los principios del balance hídrico. Además, el WY permite la simulación del rendimiento hídrico ante diferentes escenarios climáticos (Hoyer & Chang, 2014; Hamel & Guswa, 2015; Vigerstol & Aukema, 2011; Lang, Song, & Zhang, 2017; Terrado, Ennaanay, Tallis & Sabater, 2014) y la evaluación de la influencia del cambio de uso del suelo a escala de cuenca hidrográfica. Se procesa bajo un entorno Sistema de Información Geográfico (SIG), lo cual favorece el fácil acceso y aplicación por los usuarios.

El conocimiento de la distribución y disponibilidad del rendimiento hídrico como un servicio ambiental y las posibles estrategias para su uso eficiente constituye una nueva oportunidad para el desarrollo de la agricultura local y familiar debido a que sus usuarios cuentan con conocimientos adaptados a la ecología local y pautas de manejo tradicionales, complejas y/o innovadoras de sus tierras (Gaspari, Diaz-Gómez, Delgado, & Senisterra, 2015). El estudio sobre servicios ecosistémicos hidrológicos a escala local es escaso en la región serrana del sudoeste bonaerense, Argentina. El tramo superior de la cuenca del río Sauce Chico constituye una unidad de interés actual y potencial para

el abastecimiento de agua a la región (Navarro & Cano, 2017), la cual presenta un elevado grado de vulnerabilidad hídrica (Torrero, Campo, & Uboldi, 2010). Asimismo, esta zona presenta un tendencia positiva en las precipitaciones de verano desde 1960 (Gentili & Gil, 2013) y un desfase hídrico estacional, cuya demanda de agua para irrigación es coincidente con los caudales de estiaje, originando problemas de abastecimiento hídrico, donde el cauce principal es la única fuente de abastecimiento, dado que el recurso hídrico subterráneo casi no es explotado (Espósito, Fernández, Sequeira, & Paoloni, 2016).

En este contexto, el objetivo del trabajo fue analizar la distribución espacial del rendimiento hídrico en relación con el cambio de uso del suelo y escenarios de precipitación en la cuenca alta del río Sauce Chico, Tornquist, Argentina.

Para su cumplimiento se propuso implementar el uso del módulo WY de InVest® como una herramienta para comprender la variabilidad del servicio ecosistémico hidrológico en la cuenca.

Área de estudio

El área de estudio es la cuenca alta del río Sauce Chico (CARSCH) ubicada sobre el sistema orográfico Sierra de la Ventana, al suroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 1). Abarca una superficie de 373.25 km², que presenta una topografía muy marcada, cuyo gradiente climático y procesos geomorfológicos regulan la existencia de diferentes suelos, condiciones hídricas, vegetación y uso del suelo, e influyen sobre la dinámica biofísica, social y económica regional. La red de drenaje es del tipo subdendrítica, con marcado control estructural (Torrero & Campo, 2008). La altitud varía entre 450 y 1 200 msnm, cuya pendiente supera el 8 % en las zonas con máxima altitud, con un máximo grado de erosión hídrica (Torrero *et al.*, 2010). La dinámica hídrica, el escurrimiento medio, supera al módulo anual de 2.02 m³/s (derrame anual de 63.70 hm³) durante los meses de marzo a mayo y septiembre a noviembre. Los caudales mensuales medios mínimos ocurren en el verano durante el mes de enero (1.30 m³/s) y los máximos en el mes de abril (2.85 m³/s), que corresponde a la estación climática de otoño (Espósito *et al.*, 2016).

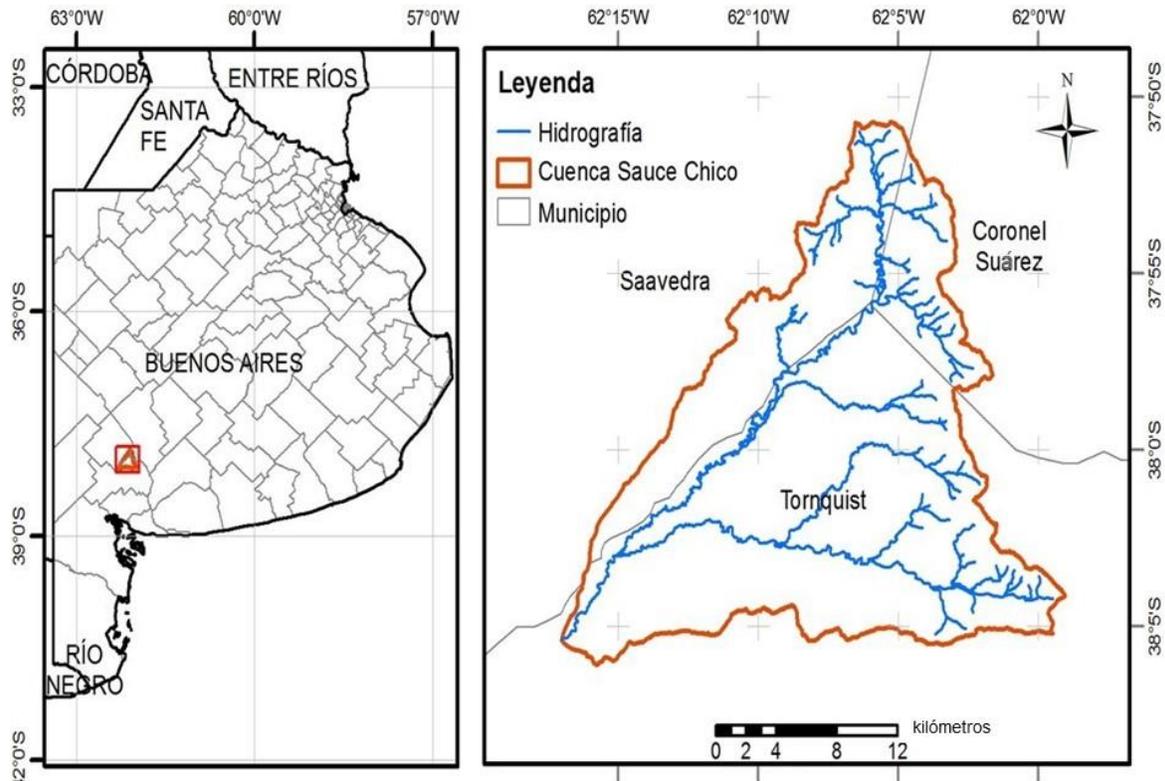


Figura 1. Ubicación del área en estudio.

En general, presenta suelos bien drenados, sin embargo, en determinados sectores elevados con presencia de tosca a poca profundidad, el desarrollo de los suelos es muy somero (< 25 cm). En la planicie y en espacios de poca pendiente, el desarrollo de los suelos se encuentra entre 25 y 50 cm (Torrero & Campo, 2008; Torrero, 2009). El principal uso del suelo actual es agropecuario, cuya componente agrícola se basa en el cultivo de avena, trigo y maíz; las zonas altas se aprovechan sobre todo para uso ganadero (Torrero *et al.*, 2010). La vegetación

natural en la cuenca se caracteriza por la presencia de estepa xerófila, típica de condiciones semiáridas (Galizzi, Peinemann, & Lamberto, 1998). El área tiene una densidad poblacional baja de cinco habitantes por km² (Casado & Campo, 2019).

Materiales y métodos

Para analizar el cambio de uso del suelo en la CARSCH se generaron dos mapas, uno para el año 1997 (Gaspari, 2002) y otro para el año 2017. El primero se obtuvo por interpretación de fotografías aéreas y análisis de cartografía antecedente, mientras que el segundo se realizó mediante la interpretación de imágenes satelitales Landsat 8 (2017), obtenidas del Servicio Geológico de Estados Unidos o USGS, con el método de clasificación supervisada.

Las categorías de uso del suelo y vegetación definidas fueron las siguientes: roca en superficie (pastizal muy degradado), bosque, pastizal (en buen estado), zona de ribera, agropecuario y urbano, cuya zonificación actual se visualiza en la Figura 2 (izquierda). La superficie de

ocupación de cada uso del suelo se determinó con un sistema de información geográfica.

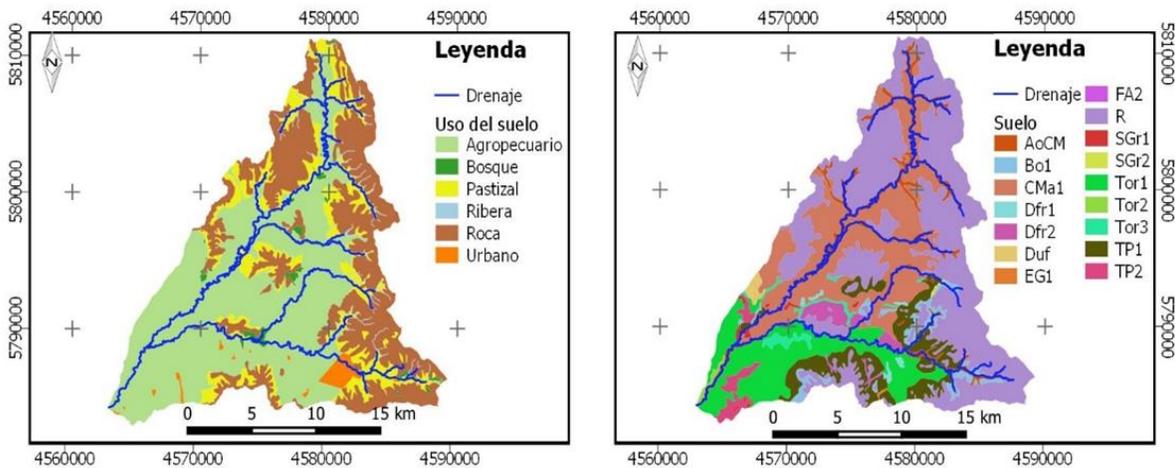


Figura 2. Mapas de usos del suelo actual (izquierda) y tipos de suelo (derecha).

La modelización del cambio de uso del suelo se realizó con el Módulo *Land Change Modeler* (LCM) del programa *Idrisi Taiga*®, que es un innovador sistema de planificación de tierras y apoyo a la toma de decisiones que está completamente integrado. Gracias a él se pudo determinar las tendencias del cambio de uso del suelo y modelar empíricamente las relaciones con variables explicativas.

La zonificación de los tipos de suelo en la CARSCH se obtuvo del Atlas de Suelos (INTA, 1995) (Figura 2, derecha), definiendo 16 unidades cartográficas. Particularmente, se trabajó con datos de profundidad del

horizonte del suelo (mm) (*soildepth*) y con la textura edáfica (Saxton & Rawls, 2006).

El cálculo del rendimiento hídrico se hizo con SIG, por medio de la aplicación del módulo *Water Yield* (WY) del modelo InVest® versión 3.4.2, el cual se basa en los principios del balance hídrico en una escala espacio-temporal, considerando la curva de Budyko (Zhang, Dawes, & Walker, 2001) y la precipitación anual.

El módulo WY, en entorno SIG, requiere la disponibilidad de las siguientes capas temáticas, cuya información debe estar especializada en formato ráster, respetando el mismo tamaño de píxel, de 30 metros. La base de datos necesaria para la aplicación del modelo en la CARSCH fue:

- El mapa de uso y cobertura del suelo para los dos momentos, 1997 y 2017 (Figura 2, izquierda).
- El mapa de tipos de suelo (Figura 2, derecha).
- Datos geoespaciales de distribución de la precipitación media anual (PMA) (mm) obtenidos a partir del *Atlas Climático Digital de la República Argentina INTA* (Bianchi & Cravero, 2010), para el periodo 1961-2010 (Figura 3, izquierda).

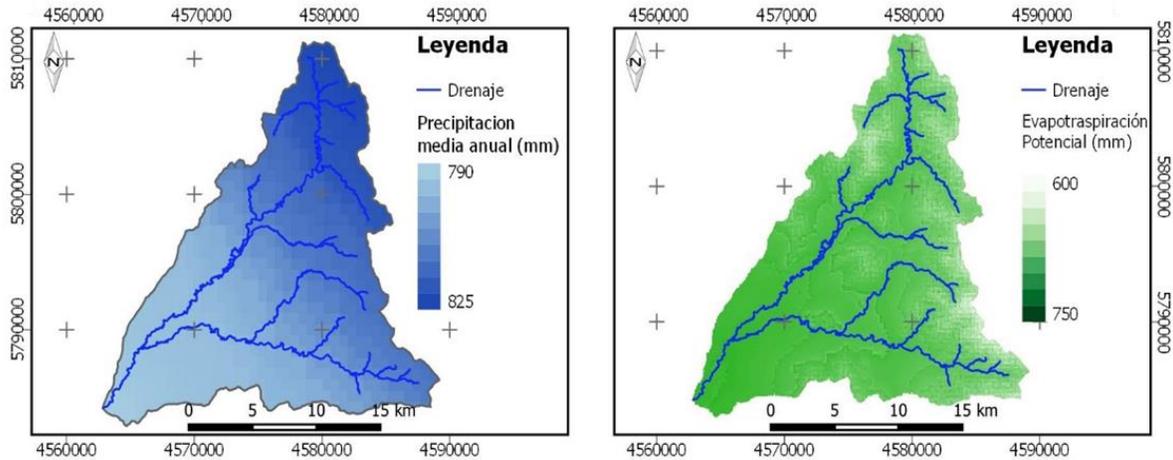


Figura 3. Mapa de precipitación (PMA) y evapotranspiración potencial media anual (PET).

- Zonificación de la evapotranspiración potencial media anual (PET) (mm) logrados del *Atlas Climático Digital de la República Argentina INTA* (Bianchi & Cravero, 2010), realizado para el período 1961-2010 (Figura 3 derecha).

El módulo WY de InVest® se basa en el procesamiento de datos de una tabla que contiene los atributos biofísicos para cada uso y cobertura del suelo, según códigos de uso del suelo preestablecidos; la profundidad de las raíces (mm), y el coeficiente de evapotranspiración (K_c) para cada uso y cobertura. El valor de K_c para la clase agrícola se estimó a partir de valores que contemplan la estacionalidad establecida por FAO (1998), así como también para pastizales naturales y bosques (Nosseto *et al.*, 2012).

Otro parámetro que requiere el módulo es la constante de Zhang (Z), que se define a partir de la estacionalidad de las precipitaciones en el área de estudio. Para calcular el valor de Z se analizó la cantidad de tormentas en un año; en función de los datos antecedentes se consideró el año 1971 como modal para esta cuantificación, alcanzando un valor de 46 los eventos de tormentas. Aplicando la ecuación de Donohue, Roderick y McVicar (2012), Z se estima como $(0.2 \times N)$, siendo N el número de tormentas, por lo cual $Z = 9.2$.

A continuación, se presenta la metodología que implementa el módulo WY para la determinación del rendimiento hídrico anual del paisaje $Y(x)$, que se definió a una escala espacial por píxel (30 x 30 m), para todas las capas de información. Se inicia aplicando la Ecuación (1):

$$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \cdot P(x) \quad (1)$$

Ecuación (1): rendimiento hídrico anual $Y(x)$ (mm).

Donde $AET(x)$ es la evapotranspiración actual anual por píxel para cada tipo de cobertura y uso del suelo y $P(x)$ es la precipitación anual (mm) en ese píxel.

El cálculo de la $AET(x)$ se estableció a partir de una aproximación de la curva de Budyko, desarrollada por Zhang *et al.* (2001), expresado en la Ecuación (2):

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = \frac{1 + \omega(x) * R(x)}{1 + \omega(x) * R(x) + \frac{1}{R(x)}} \quad (2)$$

Ecuación (2): relación de evapotranspiración.

Donde $R(x)$ es el índice de aridez de Budyko, basado en la relación entre la evapotranspiración potencial y la precipitación a nivel de píxel. En el índice de aridez de Budyko participan el factor $Kc(x)$, que es el coeficiente de evapotranspiración de cada tipo de cobertura y uso por píxel.

El valor de $R(x)$, mayores a 1 corresponde a pixeles que ocurren en áreas que son potencialmente áridas (Budyko, 1974), y se calcula por medio de la Ecuación (3):

$$R(x) = \frac{K_c(L_x) * ET_0(x)}{P(x)} \quad (3)$$

Ecuación (3): índice de aridez de Budyko.

Donde $ET_0(x)$ es la evapotranspiración en el píxel (x), que depende de la altura, humedad y orientación de la pendiente en el área.

El cálculo de $\omega(X)$ se establece con la Ecuación (4), que es un valor adimensional que relaciona el agua disponible para la planta (AWC) y la precipitación en un año. Es un parámetro biofísico que se utiliza para caracterizar las propiedades naturales del clima y el suelo (Zhang *et al.*, 2001):

$$\omega(x) = Z * \frac{AWC(x)}{P(x)} \quad (4)$$

Ecuación (4): relación agua disponible-precipitación.

Donde $AWC(x)$ (mm) se estima a partir de la textura del suelo y la profundidad efectiva de las raíces, y se calcula como la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente de la planta. El parámetro Z corresponde a la constante de Zhang y representa la estacionalidad de las precipitaciones.

La variabilidad del rendimiento hídrico está relacionada con la variabilidad espacio temporal de la precipitación debido a su alta sensibilidad en la modelización (Hamel & Guswa, 2015). Debido a ello, se integró a la metodología WY el análisis de diferentes escenarios pluviales, a partir de datos de la precipitación total anual, para establecer la respuesta hidrológica según el rendimiento hídrico. Estos escenarios aplicados en la CARSCH se elaboraron a partir de los datos pluviales de INTA mencionados, e incorporando también la base de datos mensuales

y anuales de una estación meteorológica ubicada en Tomquist, para el periodo 1908-1985. Con esta base de datos se realizó una estadística descriptiva básica, alcanzando una media de 663 mm anuales, con una desviación estándar de 193 mm. Considerando este desvío como +/-30 % del valor medio de PMA, se establecieron escenarios de exceso y déficit pluvial. A partir de este valor se procesó con SIG el mapa de precipitación media anual (PMA = escenario 0) para lograr cuatro escenarios, generando capas de precipitación de (- 15 %), (- 30 %), (+ 15 %) y (+ 30 %) de variación de la PMA.

Los resultados que aportó el modelo WY se representaron cartográficamente, y describen, en el nivel de cuenca y tabular, productos como *AET* (mm), que expresa la evapotranspiración media real; el *FRACTP* (mm), que representa la fracción media de precipitación que realmente evapotranspira, y el *WYIELD* que indica el rendimiento hídrico, expresados en las unidades de medida lineal, superficie y volumétrica (mm, ha, m³), respectivamente. Para completar el análisis del WY se realizó una tabulación cruzada con las clases de uso del suelo en ambos momentos por medio de una tabla de contingencia para registrar y analizar la asociación entre las dos variables desde la distribución de frecuencias multivariada de las variables estadísticas.

Resultados

El análisis de tendencia de cambio de usos del suelo, con SIG, se basó en el procesamiento de cada mapa según momento. A partir de estos datos, se definió la superficie de ocupación para los usos del suelo del pasado (1997) y de la actualidad (2017), siendo el área con presencia de roca de 54.61/116.46 km²; el bosque se presenta en 8.67/4.05 km²; el pastizal se distribuye sobre 114.58/50 km²; el pastoreo se realizaba en el pasado en 113.90 km²; el uso agropecuario se extiende en 81.47/184.81 km², y en la actualidad hay dos clases nuevas, que son la zona de ribera de 12.34 km² y el área urbana que se expande sobre 5.57 km². La modelización con LCM permitió evidenciar las ganancias y pérdidas, cambio neto, y persistencia de transiciones específicas del uso y cobertura del suelo en el periodo de 20 años. En 2017, la agricultura ocupó el 49 % de la cuenca (185 km²) desarrollada sobre áreas de pastoreo y pastizal en 1997; cambiaron su situación de uso, siendo ambas ocupadas por uso agropecuario mixto. En total se perdieron 64 km² de áreas de pastizales. La planificación de la zona urbana se inició en la década de 1990, pero apenas en la actualidad se visualiza su ocupación. La zona de ribera se identifica claramente hoy día debido al cambio de vegetación dado por el pobre acceso del ganado y el aumento del uso turístico-recreativo. Las zonas urbanas y bosque de ribera ocupan < 1 % del área de la cuenca en 2017. En la Figura 4 se muestran los resultados del análisis de ganancias y pérdidas de superficie por uso del suelo entre 1997 y 2017 en la cuenca.

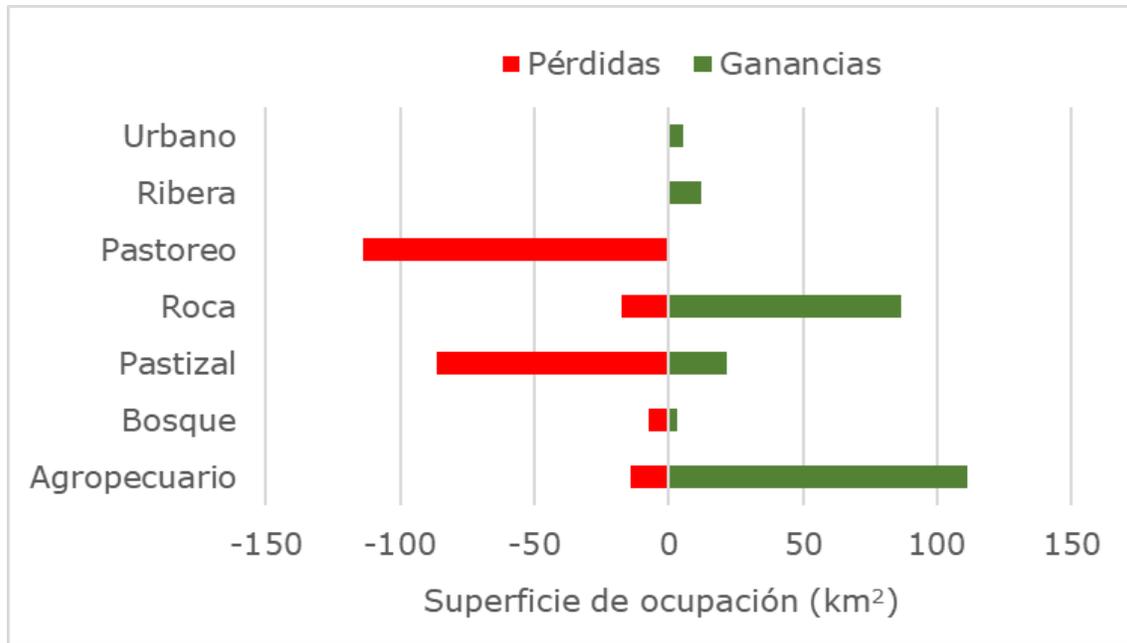


Figura 4. Distribución de ganancias y pérdidas de superficie de ocupación de uso del suelo (1997-2017).

También se establecieron las tendencias subyacentes del cambio complejo de tierras con la herramienta de abstracción del cambio, cuyos resultados se presentan en la Tabla 1. Las contribuciones al cambio neto expresaron un cambio porcentual muy alto en relación con la degradación del pastizal, generando áreas con cambio de categoría a rocosidad en superficie, uso agropecuario, bosque, área urbana y zonas ribereñas. Además, el cambio de pastoreo a implementación de actividades combinadas (agropecuarias) contribuyó a una modificación en todas las

clases de uso. La incorporación de la zona ribereña se identificó sobre la mayoría de los márgenes de los arroyos, beneficiando la dinámica hídrica superficial, al contener mayor infiltración y contención hídrica edáfico-vegetal. En cambio, la urbanización generó un aumento de pérdida hídrica en el ciclo debido al aumento del escurrimiento superficial.

Tabla 1. LCM de uso del suelo. Contribuciones al cambio neto entre 1997 y 2017.

	Contribuciones al cambio neto (% superficie)							Cambio neto por categoría
	Agropecuario	Bosque	Pastizal	Roca	Pastoreo	Ribera	Urbano	
Agropecuario	0	-0.7	-1.4	-0.39	-10.89	0.21	0.26	
Bosque	0.7	0	-0.02	-0.04	-0.17	0.14	0.01	
Pastizal	1.4	0.02	0	7.71	-1.26	0.61	0.17	
Roca	0.39	0.04	-7.71	0	-2.16	0.18	0.09	
Pastoreo	10.89	0.17	1.26	2.16	0	0.51	0.19	
Ribera	-0.21	-0.14	-0.61	-0.18	-0.51	0	0	
Urbano	-0.26	-0.01	-0.17	-0.09	-0.19	0	0	

El rendimiento hídrico reflejó la variabilidad de los escenarios de precipitación, como se observa en la Tabla 2, que muestra los resultados logrados en la modelización WY del InVest, por píxel y/o para la cuenca, según los escenarios pluviales.

Tabla 2. Resultados del módulo WY para los cinco escenarios de precipitación.

		Escenarios de precipitación (%)				
		-30	-15	0	15	30
Por píxel	<i>wyield</i> (mm)					
	Rendimiento hídrico promedio	362.89	482.49	602.69	723.18	843.82
En la cuenca	<i>wyield</i> (x-1000 m ³)					
	Volumen de rendimiento hídrico	135 445	180 083	224 948	269 919	314 946
En la cuenca	<i>wyield_ha</i> (m ³)					
	Volumen de rendimiento hídrico por hectárea	3.63	4.82	6.03	7.23	8.44

La modelización con InVest permitió reconocer la distribución geoespacial del rendimiento hídrico en el área de estudio en los cinco escenarios pluviales estudiados, como se visualiza en la Figura 5. Se identificó que la mayor amplitud de valores de WY se presentó en el escenario +30 con 206.9 mm, con un WY medio de +40 %, considerando que la amplitud en condiciones media anual fue de 196.1 mm y en déficit de -30 alcanzó a valores de 176.8 mm, con un WY medio de -39 %.

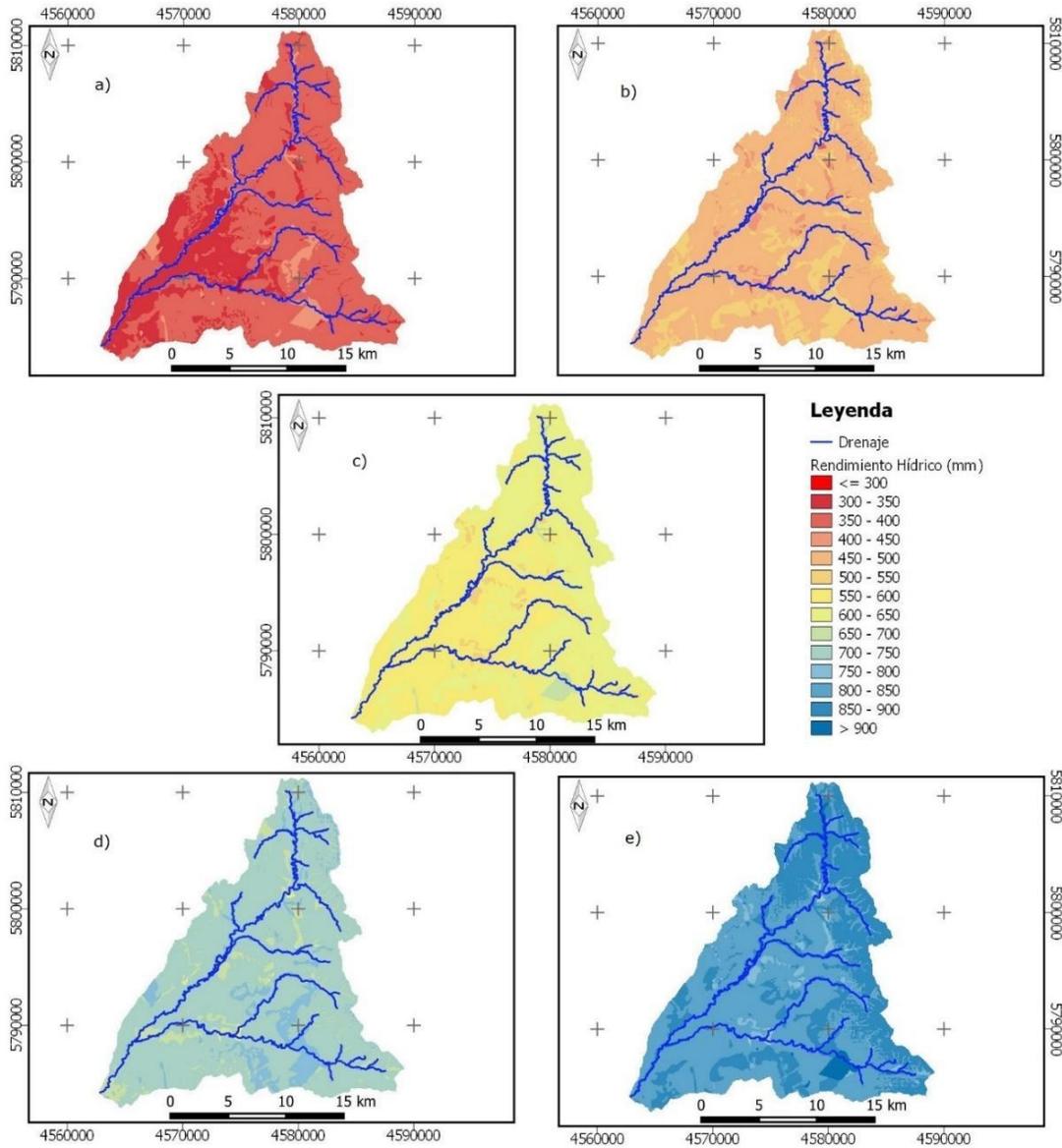


Figura 5. Mapas de resultados de WY según los escenarios: a) -30; b) -15; c) 0; d) 15; e) 30.

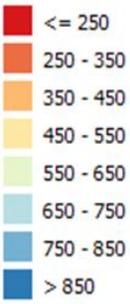
En todos los escenarios, los usos del suelo con menor cobertura, por ejemplo, el urbano y la roca, es donde se observa el mayor rendimiento hídrico promedio. En este sentido, un paisaje con menor cobertura vegetal exporta más agua en un periodo anual. Si esta situación se extrapola al pasado (1997) con los resultados alcanzados en el cambio del uso del suelo, donde predominaba la cobertura vegetal en mejor estado de conservación, estructura y distribución geoespacial, se establece una ganancia de WY del 35 % en la CARSCH, el área que no ha tenido cambio de uso del suelo, manteniendo el servicio hidrológico.

La Tabla 3 presenta un análisis de contingencia logrado a partir de interrelacionar los resultados del WY medio con los usos del suelo para la cuenca. Se visualizan colores cuyos rangos de valor coinciden con los colores de la leyenda de la Figura 5, reordenando los usos del suelo según WY. En ella se interpreta que el uso bosque, en los cinco escenarios modelados, es el que, en condiciones medias, siempre se mantuvo en la clase mínima de WY. En el otro extremo se presenta el uso urbano y roca, que tanto en situaciones de déficit como de exceso pluvial presentan los valores máximos.

Tabla 3. Tabla de contingencia entre rendimiento hídrico medio y usos del suelo en el año 2017 por escenario pluvial.

Rendimiento hídrico medio (WY) (mm)
Escenarios de precipitación (%)

Uso del suelo	-30	-15	0	15	30
Bosque	312.01	424.89	540.07	656.56	773.88
Ribera	342.58	455.29	569.83	685.54	802.04
Pastizal	355.24	472.54	591.09	710.32	829.96
Agropecuario	364.63	484.04	604.15	724.55	845.07
Roca	365.20	487.24	609.27	731.30	853.34
Urbano	422.69	543.57	664.46	785.34	906.23



Considerando el LCM, en el pasado, con la ausencia de la urbanización y la mejor cobertura sobre la zona rocosa compuesta por el pastizal (18.42%), con el uso pastoril menos agresivo (30,52%) y la mayor presencia de bosques (1.24%), se infiere que el WY se comportaría en todos los escenarios de precipitación con valores menores a 250 mm, alcanzando el valor de 257.89 mm sólo en el caso de uso agropecuario.

La Figura 6 muestra la variabilidad del WY en la CARSCH, en respuesta de los escenarios estudiados, indicando los valores máximos y mínimos logrados, y los resultados del análisis estadístico básico con SIG de los mapas de Figura 5. Se presenta la ecuación de regresión lineal y R^2 (porcentaje de variación de la variable de respuesta) en cada caso, que demuestra un buen ajuste del modelo a sus datos; de esta manera se establece que la cuenca reacciona de una forma ante cada escenario. Se incorporó al gráfico estadístico, el símbolo de las barras de error (al +/- 5%), que indica que la concentración de valores es elevada.

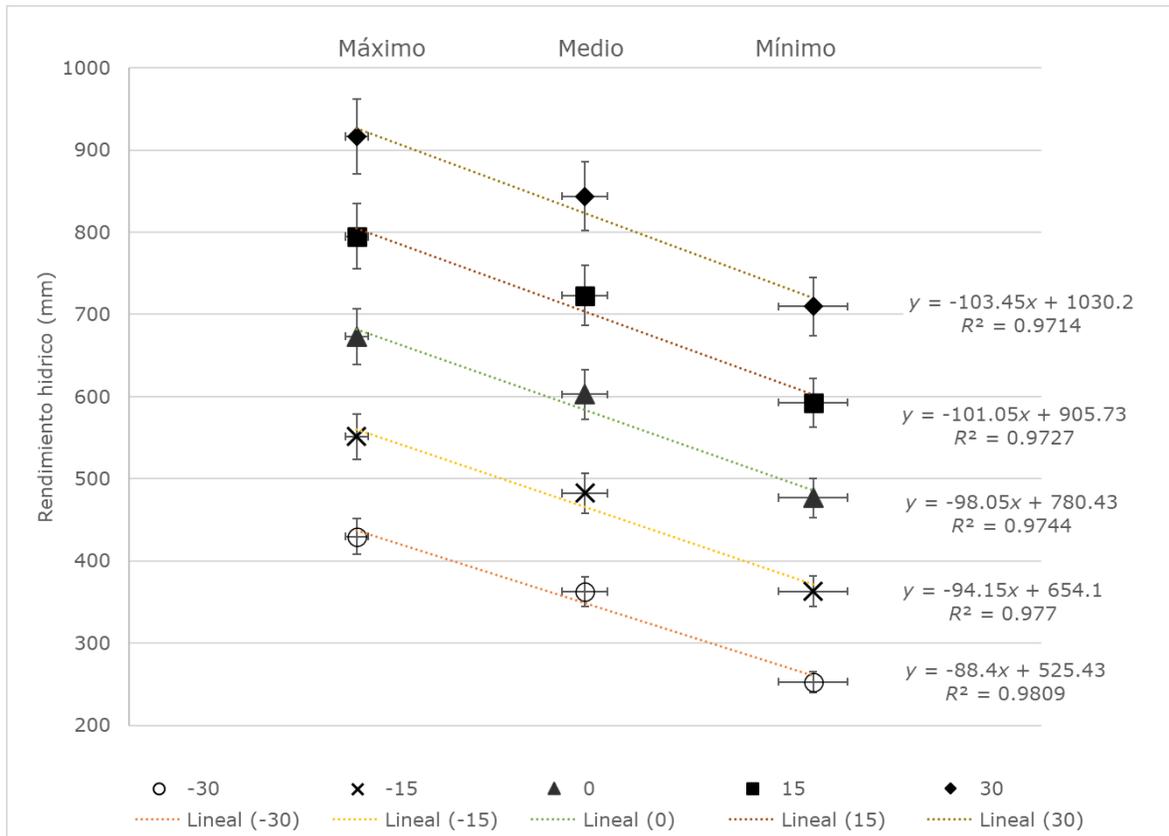


Figura 6. Rendimiento hídrico y análisis estadístico para los escenarios:
a) -30; b) -15; c) 0; d) 15; e) 30.

Como menciona Gaspari (2002), cuando el análisis se lleva a cabo en cuencas altamente intervenidas, durante los periodos de exceso hídrico/pluvial (p. ej., en el escenario +30), el agua no es contenida por la cuenca, lo que provoca riesgo de inundaciones; y ante escasos eventos

de precipitación y en presencia de sequía (p. ej., en el escenario -30), se expresa la escasez hídrica como se interpreta en la CARSCH.

En relación con la fracción media de precipitación que realmente evapotranspira a nivel de cuenca (FRACTP), se analizó geoespacialmente su distribución en un mapa agrupado en cinco rangos de valores, donde se corroboró el resultado ya mencionado en relación con el uso del suelo urbano, manteniendo el mismo los valores más bajos. En particular, los usos del suelo con presencia de cobertura vegetal reflejan los valores más altos en todos los escenarios; el uso de bosque es el más favorecido en la relación FRACTP.

El servicio ecosistémico que brinda la cobertura vegetal en la CARSCH es un beneficio con respecto al rendimiento hídrico, pero no es la producción sino la regulación y conservación. Por ello, una cuenca con una buena cobertura de vegetación anual presenta una balanceada provisión del recurso hídrico, otorgando una oferta suficiente durante los meses secos, y regulando la crecida de ríos y/o inundaciones.

Discusión

El estudio del cambio del uso del suelo integrado a escenarios pluviales facilitó el entendimiento geoespacial del WY. El uso actual (2017) del suelo en la CARSCH presenta una vegetación dominada por pastizal y uso productivo agropecuario, y mantiene una descarga hídrica base de ~200 mm/año, considerando que la amplitud en condiciones media anual fue de 196.1 mm y, aproximadamente, un cuarto de los aportes de la precipitación. Los restantes tres cuartos de la precipitación de esta cuenca se perderían por evapotranspiración y picos de creciente. Esta situación se generó debido al cambio del uso del suelo en los últimos 40 años.

El uso del módulo WY de InVest permitió cuantificar la influencia en la distribución espacial del rendimiento hídrico ante el cambio en el uso y cobertura del suelo en la cuenca. Se observó que las zonas con la cobertura de pastizal y bosque, en la cabecera de la cuenca, son áreas de suministro hídrico; mientras que las áreas con agricultura, en las zonas medias a bajas, representan áreas de menor regulación del recurso hídrico y alta demanda de agua. Este esquema expresa el patrón espacial del servicio ecosistémico hidrológico constituido por áreas fuente y sumidero (Brauman *et al.*, 2007). Es importante mencionar que áreas de máximo rendimiento hídrico pueden considerarse como áreas prioritarias para dirigir esfuerzos de conservación (Zarandian *et al.*, 2017). Así, este análisis facilita la identificación de las áreas de provisión hídrica en la cuenca. Tal situación evidencia e incrementa la necesidad del manejo integral del recurso hídrico entre los beneficiarios de la cuenca (principalmente productores agrícolas).

El servicio ecosistémico hidrológico que brinda la cobertura vegetal natural en una cuenca hidrográfica (beneficio) con respecto al rendimiento hídrico no es la producción sino la regulación hídrica. Por ello se infiere que en esta cuenca la provisión del recurso hídrico no se encontraría balanceada debido a la pérdida de cobertura natural (pastizales) durante el periodo estudiado, pues una buena cobertura de vegetación presentaría una balanceada provisión del recurso hídrico en un periodo anual, otorgando una oferta suficiente durante el verano, y ausencia de inundaciones o crecidas de ríos.

El análisis de la tasa de cambio de uso del suelo reflejó las transformaciones en la estructura productiva regional, derivadas de la introducción de tecnología y de la adquisición de capacidades técnicas de los productores agropecuarios; favoreció la sustentabilidad del sistema, al aumentar la productividad y que la aptitud de los suelos no fuera subutilizada, considerando el reemplazo del uso del suelo para pastoreo del 1997 por agricultura en 2017. El uso del suelo para pastoreo implica una reducción en las tasas de infiltración y percolación, dada por la compactación del suelo, producto del pisoteo de los animales; de esta forma se incrementa el rendimiento hídrico, reduciendo los niveles de regulación hídrica en la cuenca (Park, Ale, Teague, & Dowhower, 2017). Por tal razón, la conversión de este uso del suelo por agricultura mejoraría la respuesta hidrológica de la cuenca en 2017. Sin embargo, son clave las estrategias de manejo del suelo en la producción agrícola.

Según Torrero *et al.* (2010), el aumento de FRACT en zonas con presencia de roca y cabecera de cuenca tendría una relación directa en los procesos de erosión hídrica, como es el caso de la CARSCH, que ante un escenario de escasez hídrica (reducción de 30% de precipitación), el modelo WY sugiere un 60 % menos de rendimiento hídrico total en la cuenca, indicando a las áreas de uso agrícola con menor regulación hídrica; mientras que un escenario de incremento de precipitación de 30 % aumentaría el rendimiento hídrico total en un 140 %, lo cual sugiere que esta cuenca es vulnerable ante los extremos hídricos.

En coincidencia con Hamel y Guswa (2015), quienes señalaron que, a partir de un análisis de incertidumbre, que el modelo es más sensible a la precipitación que al cambio en los valores de evapotranspiración potencial, en una cuenca de North Carolina, Estados Unidos, en la CARSCH, la respuesta del modelo WY sugiere que el rendimiento hídrico es sensible a los cambios en las precipitaciones.

La aplicación del WY del InVest requiere de un entendimiento integral del sistema, considerando factores intrínsecos del área en estudio y refinando la generación de los requerimientos necesarios (Scordo *et al.*, 2018).

El análisis del funcionamiento hidrológico y funcional de una cuenca conlleva a comprender la estructura, funcionamiento y distribución de los ecosistemas que la conforman, donde la implementación de un enfoque físico-geográfico conforma una visión integradora de todos los componentes naturales, como mencionan Cotler y Priego (2004).

La zonificación y análisis espacio temporal del uso del suelo conforman el estudio de los servicios ecosistémicos, y colaboran con la toma de decisiones en un potencial ordenamiento territorial, e incorporan un estudio sobre su rendimiento hídrico para una producción sustentable, que equilibra la conservación y protección del ambiente.

Conclusiones

El modelo hidrológico InVest WY estimó la variabilidad espacial del rendimiento hídrico en la cuenca CARSH ante el cambio de uso y cobertura del suelo, y considerando escenarios pluviales. La capacidad de regulación hídrica en esta cuenca disminuyó en los últimos 40 años debido a la pérdida de cobertura natural a expensas de la expansión del uso del suelo agrícola. A su vez, la cuenca CARSH presenta mayor vulnerabilidad hídrica ante escenarios extremos de sequía e inundación.

El aporte logrado en este trabajo se hizo con base en el conocimiento geoespacial y temporal de la distribución del servicio ambiental de provisión hídrica en una cuenca hidrográfica. De esta manera, por medio de una herramienta técnica SIG de fácil aplicación y

libre acceso, se pueden plantear nuevas pautas de ordenamiento territorial, racionalizando el uso del suelo y la actividad antrópica, promoviendo el desarrollo de información geoespacial, a fin de mejorar la productividad del territorio para el uso sustentable de agua y suelo.

Además, se sugiere incorporar al uso del modelo InVest© de funciones ecosistémicas hidrológicas un enfoque socioeconómico que potenciaría las metodologías para encontrar estrategias de adaptación al cambio global (Trisurat *et al.*, 2018), e incorporar la identificación de los beneficiarios directos del servicio de provisión hídrica (agricultores), y la influencia de las pautas de manejo del suelo y producción que emplean.

Por último, es recomendable concretar un esfuerzo en el sistema de monitoreo de variables ambientales continuo en el tiempo y en el espacio en la cuenca (estaciones meteorológicas, hidrométricas).

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Proyecto N° 11/A286, denominado "Estudio de los servicios hidrológico-ambientales para aportar a la sustentabilidad de la Región Serrana Bonaerense" de la Universidad Nacional de La Plata, del Programa de Incentivos a la Investigación del Ministerio de Educación de la Nación Argentina.

Referencias

- Barkmann, J., Glenk, K., Keil, A., Leemhuis, C., Dietrich, N., Gerold, G., & Marggraf, R. (2008). Confronting unfamiliarity with ecosystem functions: The case for an ecosystem service approach to environmental valuation with stated preference methods. *Ecological economics*, 65(1), 48-62.
- Bangash, R. F., Passuello, A., Sanchez-Canales, M., Terrado, M., López, A., Elorza, F. J., Ziv, G., Acuña, V., & Schuhmacher, M. (2013). Ecosystem services in Mediterranean river basin: Climate change impact on water provisioning and erosion control. *Science of the Total Environment*, 458, 246-255.
- Bianchi, A., & Cravero, S. (2010). *Atlas Climático Digital de la República Argentina*. Salta, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Brauman, K. A., Daily, G. C., Duarte, T. K., & Mooney, H. A. (2007). The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environment and Resources*, 32, 67-98.
- Budyko, M. I. (1974). *Climate and Life*. San Diego, USA: Academic.
- Casado, A., & Campo, A. M. (2019). Extremos hidroclimáticos y recursos hídricos: estado de conocimiento en el suroeste bonaerense, Argentina. *Cuadernos Geográficos*, 58(1), 6-26.
- Cotler, H., & Priego, A. (2004). El análisis del paisaje como base para el manejo integrado de cuencas: caso de la cuenca Lerma-Chapala.

México, DF, México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología.

Donohue, R. J., Roderick, M. L., & McVicar, T. R. (2012). Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model. *Journal of Hydrology*, (436), 35-50. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.02.033

Espósito, M., Fernández, S., Sequeira, M., & Paoloni, J. (2016). Relación entre la oferta calculada del recurso hídrico superficial y la demanda de agua de los cultivos en una cuenca del sur de la región pampeana. *Revista de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNR* (28), 007-016.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1998). *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. Rome, Italy: Natural Resources Management and Environment Department. Recuperado de www.fao.org

Galizzi, F., Peinemann, N., & Lamberto, S. (1998). Relación suelo-vegetación en áreas de transición entre condiciones de estepa y halomorfismo en el Sur de la Provincia de Buenos Aires. *Revista Quebracho*, 8, 30-39.

Gaspari, F. J. (2002). *Ordenamiento territorial en cuencas serranas. Aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG)*. Buenos Aires, Argentina: Ediciones Cooperativas.

- Gaspari, F. J., Diaz-Gómez, A. R., Delgado, M. I., & Senisterra, G. E. (2015). Evaluación del servicio ambiental de provisión hídrica en cuencas hidrográficas del sudeste bonaerense. Argentina. *Revista Facultad de Agronomía*, 114 (núm. esp. 1), 214-221.
- Gentili, J. O., & Gil, V. (2013). *Variabilidad temporal de las precipitaciones en vertientes opuestas del Sistema de Ventania, Buenos Aires, Argentina*. *Revista Universitaria de Geografía*, 22, 147-166.
- Hamel, P., & Guswa, A. J. (2015). Uncertainty analysis of a spatially explicit annual water-balance model: Case study of the Cape Fear basin, North Carolina, 19, 839-853. DOI: doi:10.5194/hess-19-839-2015
- Hoyer, R., & Chang, H. (2014). Assessment of freshwater ecosystem services in the Tualatin and Yamhill basins under climate change and urbanization. *Applied Geography*, 53, 402-416. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.06.023>.
- INTA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (1995). *Atlas de Suelos de la República Argentina. Escala 1:500.000. Versión Digital*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Jackson, R. B., Jobbágy, E. G., & Noretto, M. D. (2009). Ecohydrology in a human-dominated landscape. *Ecohydrology*, 2, 383-389.
- Jobbágy, E., Acosta, A. M., & Noretto, M. D. (2013). Rendimiento hídrico en cuencas primarias bajo pastizales y plantaciones de pino de las

- sierras de Córdoba (Argentina). *Asociación Argentina de Ecología. Ecología Austral*, 23, 87-96.
- Lang, Y., Song, W., & Zhang, Y. (2017). SC. *Physics and Chemistry of the Earth*, 101, 102-111.
- Modernel, P., Rossing, W. A., Corbeels, M., Dogliotti, S., Picasso, V., & Tiftonell, P. (2016). Land use change and ecosystem service provision in Pampas and Campos grasslands of southern South America. *Environmental Research Letters*, (11), 113002.
- Navarro, E. L., & Cano, D. (2017). *Análisis morfométrico comparativo de los tramos superiores de las cuencas de los arroyos Sauce Chico, Napostá y Sauce Grande, Sierras Australes: uso de técnicas digitales*. IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico-CONCYT 2017, Bernal, Provincia de Buenos Aires, Argentina.
- Nosetto, M. D., Jobbágy, E. G., Brizuela, A. B., & Jackson, R. B. (2012). The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 154, 2-11.
- Park, J. Y., Ale, S., Teague, W. R., & Dowhower, S. L. (2017). Simulating hydrologic responses to alternate grazing management practices at the ranch and watershed scales. *Journal of Soil and Water Conservation*, 72(2), 102-121.
- Redhead, J. W., Stratford, C., Sharps, K., Jones, L., Ziv, G., Clarke, D., Oliver, T. H., & Bullock, J. M. (2016). Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national

scale. *Science of the Total Environment*, (569-570), 1418-1426.
DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.227

Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 1578, 1569–1578.
<http://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>

Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A. D., Wood, S. A., Sharp, R., & Nelson, E. (2013). *InVest 2.5.3 user's guide*. Stanford, USA: The Natural Capital Project. Recuperado de <http://www.naturalcapitalproject.org>

Terrado, M., Ennaanay, D., Tallis, H., & Sabater, S. (2014). Impact of climate extremes on hydrological ecosystem services in a heavily humanized Mediterranean basin. *Ecological Indicators*, 37, 199-209. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.01.016>

Trisurat, Y., Aekakkararungroj, A., Ma, H. O., & Johnston, J. M. (2018). Basin-wide impacts of climate change on ecosystem services in the Lower Mekong Basin. *Ecological Research*, 33(1), 73-86.

Torrero, M. P. (2009). *Río Sauce Chico: estudio hidrográfico para un Desarrollo Sustentable* (tesis de Doctorado en Geografía). Bahía Blanca, Argentina: Editorial Universidad Nacional del Sur.

Torrero, M. P. & Campo, A. M. (2008). Hidrogeomorfología de la cuenca en el Río Sauce Chico, Argentina. *Revista Geográfica de Valparaíso*, 41, 1-13.

- Torrero, M. P., Campo, A. M., & Uboldi, J. (2010). Environmental assessment of the Sauce Chico river basin, Argentina derived from satellital images and use of geographic information systems. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (10), 18-53.
- Van Lynden, G. W. J., & Oldeman, L. R. (1997). *The assessment of the human-induced soil degradation in South and Southeast Asia*. Wageningen, The Netherlands: International Soil Reference and Information Centre.
- Vázquez, P., & Zulaica, L. (2011). Cambios en el uso de la tierra del partido de Tandil y principales impactos ambientales. *Revista Párrafos Geográficos*, 10(2), 242-267.
- Vigerstol, K. L., & Aukema, J. E. (2011). A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2403-2409. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.040>
- Scordo, F., Lavender, T. M., Seitz, C., Perillo, V. L., Rusak, J. A., Piccolo, M., & Perillo, G. M. (2018). Modeling water yield: Assessing the role of site and region-specific attributes in determining model performance of the InVEST seasonal water yield model. *Water*, 10(11), 1496.
- Zarandian, A., Baral, H., Stork, N. E., Ling, M. A., Yavari, A. R., Jafari, H. R., & Amirnejad, H. (2017). Modeling of ecosystem services informs

spatial planning in lands adjacent to the Sarvelat and Javaherdasht protected area in northern Iran. *Land Use Policy*, 61, 487-500.

Zhang, L., Dawes, W. R., & Walker, G. R. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 37, 701-708.