

Evaluación del Servicio Ambiental de provisión hídrica en cuencas hidrográficas del sudeste bonaerense. Argentina

Gaspari, Fernanda J.¹; A. Romina Diaz Gomez²; María Isabel Delgado^{1,2}; Gabriela E. Senisterra¹

¹Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata. Diagonal 113 N° 469, La Plata. CP 1900; ²CONICET; cuencas@agro.unlp.edu.ar

Gaspari, Fernanda J.; A. Romina Diaz Gomez; María Isabel Delgado; Gabriela E. Senisterra (2015). Evaluación del Servicio Ambiental de provisión hídrica en cuencas hidrográficas del sudeste bonaerense. Argentina. Rev. Fac. Agron. Vol 114 (Núm. Esp.1): 214-221

La regulación del ciclo hidrológico es uno de los servicios tangibles de mayor impacto en el mundo entero y su perturbación ha modificado la disponibilidad y vulnerabilidad sobre la población rural, incidiendo principalmente en la obtención de agua potable y para uso de riego agropecuario. El objetivo del trabajo fue analizar la distribución espacial del servicio ecosistémico de provisión hídrica en relación a los cambios de uso del suelo, en la cuenca del Arroyo Napaleofú, en el sudeste bonaerense, Argentina. Se utilizó el modelo InVEST, basado en una objetividad biofísica que considera el uso y cobertura del suelo, características edáficas, topográficas y climáticas. El estudio abarcó tres escenarios de uso del suelo: 1986, 1996 y 2011, por lo tanto el resultado alcanzado permitió realizar una evaluación diagnóstico sobre la evolución del servicio de provisión hídrica en la cuenca, convirtiéndose en una valiosa herramienta de apoyo a la toma de decisiones para la selección de planes de ordenamiento territorial.

Palabras clave: cambio de uso del suelo, recurso hídrico, InVEST

Gaspari, Fernanda J.; A. Romina Diaz Gomez; María Isabel Delgado; Gabriela E. Senisterra (2015). Evaluation of Environmental Service of water supply in watersheds of the Southeast of Buenos Aires. Argentina. Rev. Fac. Agron. Vol 114 (Núm. Esp.1): 214-221

Regulation of hydrologic cycle is one of the ecosystem services of mayor impact around the world and its disturbance has modified availability and vulnerability of rural population to obtain drinking water and water for irrigation. The aim of this work was to analyze the spatial distribution of the ecosystem service of water supply related to changes in land use, in the watershed of the Napaleofu Creek, in the South East of Buenos Aires, Argentina. The InVEST model was used, based on a biophysical objectivity that considers land use, soil, topographic and climatic characteristics. The study included three land use scenarios: 1986, 1996 and 2011, results allowed us to evaluate the evolution of water supply service in the watershed, becoming a helpful tool for decision holders in order to select future plans for territorial management.

Keywords: land use change, water resource, InVEST

Recibido: 03/05/2015

Aceptado: 04/09/2015

Disponible on line: 01/10/2015

ISSN 0041-8676 - ISSN (on line) 1669-9513, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina

INTRODUCCIÓN

Las condiciones ambientales de las cuencas hidrográficas son el producto final de una interacción compleja entre variables físicas, biológicas y socioculturales. Esa interacción permite establecer un estudio interdisciplinario para aportar soluciones integrales que admitan desarrollar, en forma sustentable, esos ámbitos geográficos: los territorios (Mintegui Aguirre y López Unzu, 1990). Las interacciones entre la hidrología, el uso del suelo y el manejo del territorio han recibido mayor atención en los últimos años.

En un territorio, la multifuncionalidad de la agricultura (MFA) se reconoce como una actividad con múltiples productos, no solo básicos (alimentos, forraje, fibra, biocombustibles, productos medicinales y ornamentales), sino también de otras índoles, como los servicios de los ecosistemas, los valores paisajísticos, el patrimonio cultural y la viabilidad socioeconómica de las áreas rurales (Renting et al. 2009).

La agricultura utiliza más del 70 % del agua dulce disponible, intensificando la competencia que existe por el uso del recurso hídrico con otros sectores de la economía como industrias y consumo humano generando posibles déficits. Ante escenarios de déficit hídrico surge la necesidad de incrementar la eficiencia en el uso del recurso, por ejemplo por medio de mejores tecnologías aplicables al riego (Abrisqueta et al., 2008) y/o estableciendo nuevas estrategias para generar información que permita hacer un uso más eficiente del agua (Martínez et al., 2007).

Conocer y abordar la temática de provisión hídrica, como un servicio ambiental, y las estrategias para su uso eficiente, constituyen 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.

La provisión hídrica es un servicio ambiental que contribuye al bienestar de la sociedad, garantizando el desarrollo de la agricultura bajo riego, industria y consumo de la población (Cudennec et al., 2007). No sólo depende del clima y de la configuración topográfica y geológica, sino también de la vegetación que ocupa las cuencas hidrográficas (Jobbágy et al., 2013) y de su forma de uso y conservación.

Los agricultores familiares son los custodios de una experiencia ancestral, muy bien adaptada a la capacidad intrínseca de la tierra, sosteniendo su productividad, a menudo en tierras marginales. Estos agricultores, como resultado de la capacidad de gestionar en forma sostenible los diversos paisajes, son capaces de controlar y mejorar sus servicios ambientales.

En Argentina, fue promulgada, el 20 de enero de 2015, por el Poder Ejecutivo Nacional, la Ley N° 27.118 de Agricultura Familiar, la cual declara de interés público la agricultura familiar, campesina e indígena y la creación del Régimen de Reparación Histórica de la Agricultura Familiar destinada al agricultor y a la agricultura familiar y empresas familiares agropecuarias que desarrollen actividad agropecuaria en el medio rural. Entre los

instrumentos de promoción vinculados se menciona la generación de beneficios impositivos, donde la agricultura familiar, campesina e indígena y sus actores serán beneficiarios de descuentos impositivos progresivos cuando la autoridad de aplicación certifique prácticas que impliquen agregado de valor en origen y servicios ambientales en sus diversas manifestaciones.

Esta legislación es una nueva oportunidad para el desarrollo de la agricultura local y familiar, reconociendo la provisión de servicios ambientales, considerando que entre ellos se destacan: el secuestro y almacenamiento de carbono; la protección a la biodiversidad y la belleza de paisaje, y protección de cuencas hidrográficas y su rendimiento hídrico.

La modelización geoespacial del rendimiento hídrico y su distribución en el territorio, es una herramienta muy útil que permite definir un marco práctico y objetivo para la planificación y gestión integral del recurso hídrico. Se basa en una objetividad biofísica (el uso y cobertura del suelo, características edáficas, topográficas y climáticas), procurando lograr estimaciones confiables que reflejen el valor funcional de los ecosistemas. El modelo Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST®) es una herramienta geoespacial que permite evaluar los servicios ecosistémicos destinados a tomadores de decisiones. Es un modelo a escala espacio-temporal y se basa en los principios del balance hídrico, bajo un entorno SIG (Sistema de Información Geográfica), siendo de fácil acceso y uso por los usuarios (Vigerstol y Aukema, 2011). El módulo Water Yield (WY) (rendimiento hídrico), estima los cambios en la provisión hídrica en diferentes escenarios de uso de la tierra. Fue aplicado en diferentes partes del mundo: China (Chen et al., 2008; Zhou et al., 2010) Hawaii (Goldman et al., 2010), Oregón (EEUU) y Colombia (Daily et al., 2009; Tallis y Polasky, 2009). En Argentina, fue utilizado en el análisis espacial de servicios ecosistémicos en áreas de conservación en el Alto Paraná Bosque Atlántico de Misiones (Izquierdo y Clark, 2012).

En la región pampeana serrana del sudeste bonaerense, hay escasos estudios de los servicios ambientales que generan las cuencas hidrográficas. Considerando los cambios de uso del territorio observados en las últimas décadas y la aceptación de modelos para evaluar la provisión de los recursos hídricos a diferentes escalas, el objetivo del trabajo fue analizar la distribución espacial del servicio ambiental de provisión hídrica en la cuenca Alta del Arroyo Napaleofú, Argentina.

MATERIALES Y MÉTODOS

La cuenca Alta del Arroyo Napaleofú es un área experimental que se ubica en partido de Tandil, provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 1). Desde la década de 1980 ha manifestado cambios en el uso del suelo debido a las transformaciones en la estructura productiva regional derivadas de la introducción de tecnología y de la adquisición de capacidades técnicas de los productores agropecuarios locales. Esta transformación incidió en la dinámica hídrica superficial.

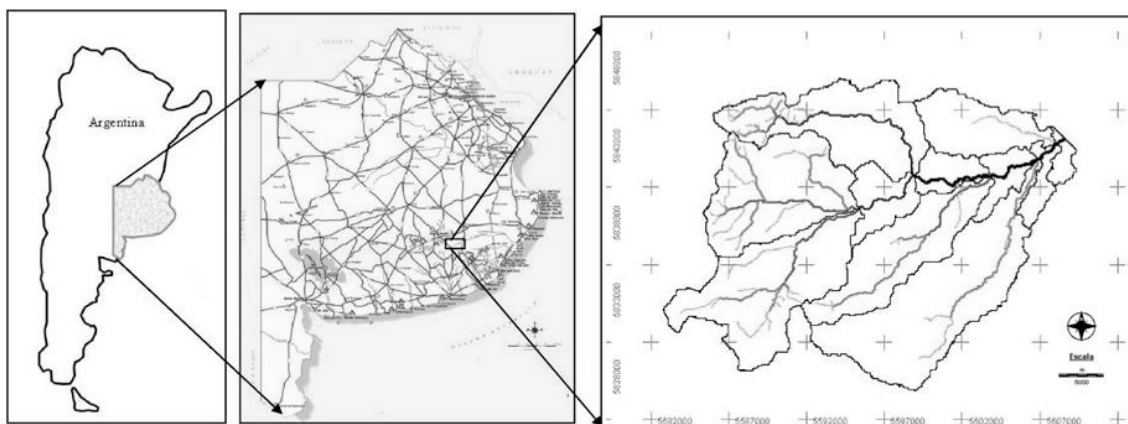


Figura 1. Ubicación de la Cuenca alta del arroyo Napaleofú, Argentina.

En la cuenca se manifiesta un clima con un régimen hídrico subhúmedo – húmedo. La temperatura media anual es de 13.8°C. La precipitación media anual es de 930 mm. El balance hídrico para el período 1900-2000, considerando una capacidad de retención específica de los suelos de 150 mm, expresa un valor medio de evapotranspiración real de 694 mm, con un déficit poco significativo (18 mm) correspondiente a los meses de enero, febrero y marzo. Los excesos hídricos suman 144 mm y se distribuyen entre los meses de mayo a noviembre (Ruiz de Galarreta y Banda Noriega, 2005). Litológicamente se desarrolla sobre las sierras del Sistema de Tandilla. Tchilinguirian et al. (2004) definen en el área de estudio, dos grandes unidades geológicas-geotectónicas: rocas metamórficas y plutónicas y sedimentos cuaternarios (loésicos y aluviales). En las últimas décadas, dada la capacidad productiva de los suelos de esta región, los pastizales pampeanos, han sido sustituidos por agroecosistemas y evidencian un importante nivel de degradación y un escaso grado de conservación (Vázquez y Zulaica, 2011). Los cambios de cobertura y usos del suelo están relacionados directamente con la generación de escurrimiento superficial y a su vez, tienen una consecuencia directa sobre la erosión de los suelos aumentando la fragilidad de los sistemas ambientales. Según Venacio (2007), en el partido de Tandil la actividad ganadera ocupa el 31% de la superficie y la agrícola representa el 39%.

La delimitación de la cuenca Alta del Arroyo Napaleofú fue definida a partir del modelo de elevación digital ASTER GDEM (de 30m) y con apoyo sobre la base de hidrografía y topografía de las cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar (IGM) a escala 1:50 000 de Estancia La Pacífica (Hoja 3760-29-4), Estancia La Esperanza (Hoja 3760-30-3), Almacén La Numancia (Hoja 3760-35-2) y San Manuel (Hoja 3760-36-1) (IGM, 1955).

Para analizar la distribución espacio-temporal del servicio ambiental de provisión hídrica en la cuenca se abarcaron tres escenarios temporales de uso del suelo (años 1986, 1996 y 2011), aplicándose el modelo InVEST®, particularmente el módulo Water Yield (WY) (rendimiento hídrico en entorno SIG). Se elaboró una

base de datos cartográfica con las siguientes capas temáticas: distribución de la precipitación anual (mm), de la evapotranspiración potencial anual (mm), de la profundidad del horizonte del suelo (mm), del agua disponible para la planta (mm), zonificación de uso y cobertura del suelo para cada escenario temporal, todas a nivel de cuenca hidrográfica. Además, la modelización demandó de una tabla con atributos biofísicos georreferenciados que reflejan los atributos para cada uso y cobertura del suelo.

Los datos de precipitación anual se obtuvieron a partir del Atlas Climático Digital de la República Argentina (INTA, 2012), realizando un análisis de tendencia pluvial para el período 1961-2010. Se zonificó la evapotranspiración para establecer los requerimientos hídricos. La profundidad del horizonte edáfico fue calculada a partir del procesamiento digital del Atlas de Suelos de la República Argentina (INTA, 1995) en la cuenca. El agua disponible para la planta (mm) (PAWC) fue obtenida de INTA (1995). El mapa de uso y cobertura del suelo para cada escenario temporal fue creado a partir de la clasificación supervisada no paramétrica (Support Vector Machine) (Wu et al., 2004) de Imágenes Satelitales Landsat 5 TM (Path 224 Row 86). Se realizó un análisis multi-temporal de uso de suelo, considerando como base cronológica el uso del suelo publicado por el INTA (1986), a partir del cual se tomaron dos ventanas de tiempo que abarcaron un lapso total de 25 años. Para ello, se seleccionaron las imágenes satelitales correspondientes a las fechas mencionadas, con igual estacionalidad climática, la cual correspondió a la estación seca.

El módulo WY de InVEST utiliza la tabla que contiene los atributos biofísicos para cada uso y cobertura del suelo, según códigos preestablecidos: profundidad de las raíces (mm) y coeficiente de evapotranspiración (Kc) para cada uso y cobertura. El valor de Kc para los cultivos principales se basó en valores de FAO (1998).

Otro parámetro que requiere el módulo es la constante de Zhang (Z), definida a partir de la estacionalidad de las precipitaciones.

Para calcular el rendimiento hídrico (Y(x)) se utilizó el módulo (WY) InVEST® versión 2.5.6, basado en los principios del balance hídrico en una escala espacio-

temporal, considerando la curva de Budyko (Zhang et al., 2001) y la precipitación anual. El $Y(x)$ anual a nivel geoespacial con SIG por píxel (10 m x 10 m) del paisaje $Y(x)$ se definió con la Ecuación 1.

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

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 en ese píxel.

El cálculo de la evapotranspiración se estableció a partir de una aproximación de la curva de Budyko, desarrollada por Zhang et al. (2001) (Ecuación 2).

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

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 (Ecuación 3). En el índice de aridez de Budyko, participan el factor $K_c(x)$, que es el coeficiente de evapotranspiración de cada tipo de cobertura y uso por píxel; $ET_0(x)$, es la evapotranspiración en el píxel (x) , que depende de la altura, humedad y orientación de la pendiente en el área. Los valores de $R(x)$, mayores a 1, corresponden a píxeles que son potencialmente áridos (Budyko, 1974).

$$R(x) = \frac{K_c(I_x) \cdot ET_0(x)}{P(x)} \quad (\text{Ecuación 3})$$

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

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

Donde $AWC(x)$ (mm) es estimado a partir de la textura del suelo y la profundidad efectiva de las raíces. AWC 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.

RESULTADOS

A partir de los requerimientos de cartografía de base para la modelización hidrológica, se estableció que la

Precipitación media anual se distribuye geoespacialmente entre 955 - 971 mm, y la Evapotranspiración media anual toma valores entre 708 -741 mm. La distribución espacial de los Dominios edáficos en la cuenca Alta del Arroyo Napaleofú expresa que los suelos están representados particularmente por Hapludoles líticos, Argiudoles en el piedemonte y Natracuoles típicos hacia el NE (INTA, 1989; Barranquero et al., 2012). Los principales dominios edáficos son los 1 y 2, cuyas unidades cartográficas se distribuyen espacialmente, según la siguiente relación (porcentaje de superficie): 1a: 5,72%; 1b: 36,27%; 2a: 51,24%; 2b: 6,38% y 2d: 0,37 %. En relación al agua disponible para las plantas (PAWC) el valor fue obtenido a partir de la textura del suelo (Atlas de Suelo de INTA, 1995), definiendo que para el suelo Franco limoso el PAWC tomó un valor de 0,13; para el suelo Franco de 0,12 y para sitios con la presencia de roca en superficie, fue de 0,21.

En relación a los usos del suelo en los tres escenarios temporales, se realizó un análisis de ocupación de territorio (Figura 2). Se identificaron 5 clases de cobertura considerando la clasificación de INTA (1986) como eje de base temporal, siendo estas: agrícola (A), ganadero-agrícola (GA), agrícola-ganadero (AG), ganadero (G3b) y monte (M). En esta etapa se visualizó el predominio del uso Ganadero Agrícola (GA), sobre la producción pecuaria, destacándose la ganadería de cría e invernada, considerando predios agropecuarios familiares. Las limitaciones productivas para agricultura (A) se centraron en la presencia de gramíneas y los fuertes déficit hídricos de verano que condicionaron la explotación de los cultivos estivales, en décadas pasadas. En este período la ganadería se concentra en los campos de mayor superficie y de menor aptitud agrícola. La cobertura forestal (M) se refleja en montes de reparo para uso ganadero y/o cortinas, de uso familiar recreativo - conservacionista.

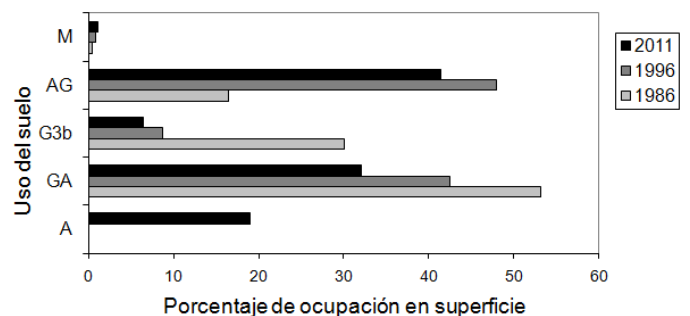


Figura 2. Porcentaje de ocupación en superficie por uso del suelo según escenario

En relación a los atributos biofísicos para cada uso y cobertura del suelo, la profundidad de las raíces (mm) y coeficiente de evapotranspiración (K_c) se expone en la Tabla 1.

El rendimiento hídrico depende del valor de la constante Z que tiene implícito la estacionalidad de las

precipitaciones En la cuenca Alta del A° Napaleofú el Z alcanza un valor de 9, que se corresponde a cuencas templadas, caracterizado por coincidir la estación más cálida con la más lluviosa.

La modelización con InVEST permitió reconocer la distribución geoespacial del rendimiento hídrico en el área de estudio, como se visualiza en la Figura 3.

Tabla1. Atributos biofísicos según el uso del suelo.

Usos y coberturas del suelo	Kc	Profundidad de raíz (mm)
A	650	2000
GA	850	1000
G3b	650	700
AG	600	1500
M	1000	7000

Los mapas presentados en la Figura 3 revelan que el rendimiento hídrico expresó valores entre 389 hasta 645 $\text{m}^3 \cdot \text{pixel}^{-1}$. En los tres escenarios existe un predominio de valores mayores a 500 $\text{m}^3 \cdot \text{pixel}^{-1}$, con un porcentaje de ocupación en superficie de 49,83 % para 1986; 60,64 % en el año 1996; alcanzando un valor de 68,86 % en 2011. Este cambio se refleja en la disminución del uso G3b y GA en reemplazo de AG y A. Además, este cambio se identifica sobre un aumento de participación de G (ambos usos) sobre $Y(x) < a 400 \text{ m}^3 \cdot \text{pixel}^{-1}$ y el aumento de la presencia del monte (Figura 4). El aumento de superficie de M incidió directamente en la provisión del rendimiento hídrico en forma aislada, generando leves impactos sobre la dinámica del agua.

Las zonas de vegetación natural con uso G3b están en un equilibrio morfo-dinámico frágil. Este equilibrio está siendo disturbado, en algunas ocasiones, por la introducción de la agricultura en la transición de GA hacia AG. La implementación de prácticas agrícolas (cultivo y/o ganadería sin medidas de conservación del

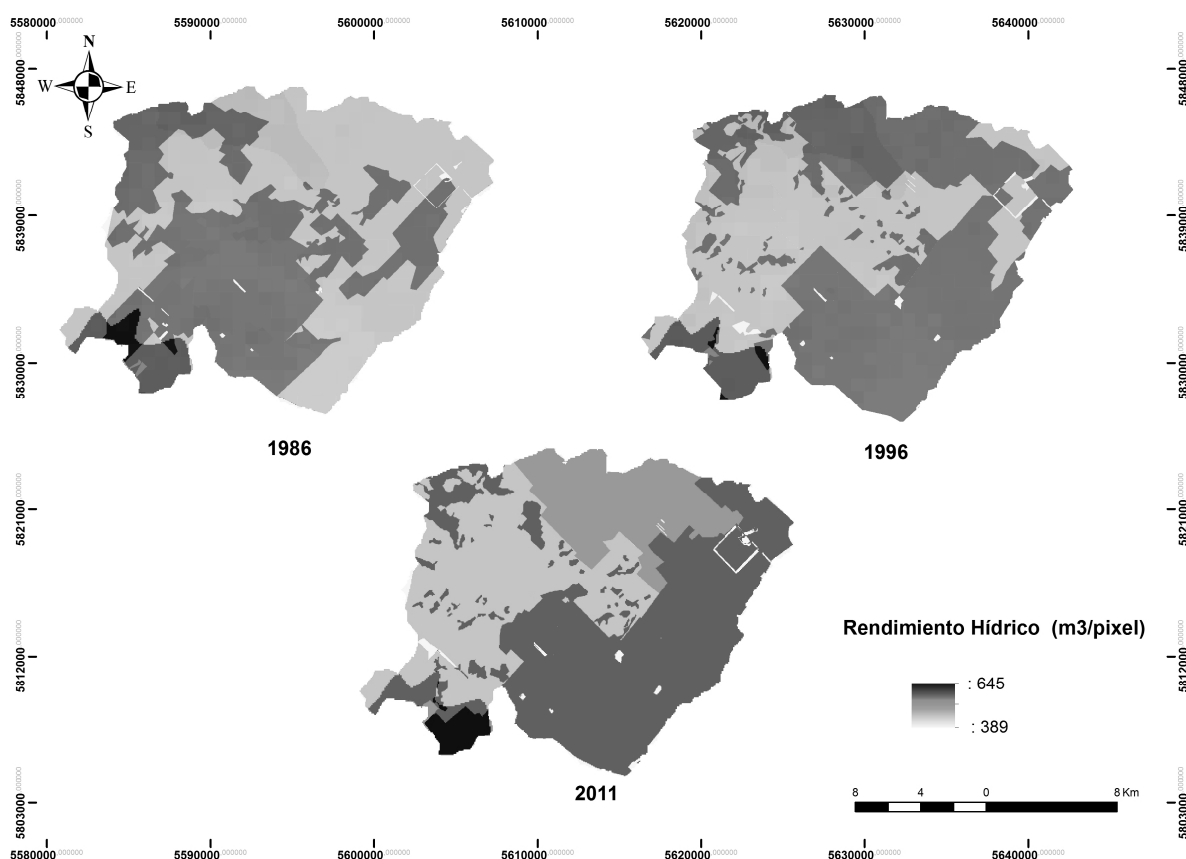


Figura 3. Distribución espacial del rendimiento hídrico según escenarios temporales en la cuenca Alta del Arroyo Napaleofú.

suelo) repetitivas, sin períodos de descanso, favoreció la pérdida de suelo superficial y la disminución de materia orgánica, aumentando el riesgo de escorrentía superficial y erosión hídrica asociada.

La Figura 4 indica en cada escenario temporal, la zonificación en cuatro rangos de rendimiento hídrico ($\text{m}^3.\text{píxel}^{-1}$) para definir la incidencia de cada uso del suelo para la provisión hídrica. Se visualiza un predominio del uso GA en el segundo rango entre valores de $400 - 500 \text{ m}^3.\text{píxel}^{-1}$, el cual fue disminuyendo hacia la actualidad, con la aparición de superficie con uso agropecuario. Este último se distribuye predominantemente en la clase de $500 - 600 \text{ m}^3.\text{píxel}^{-1}$, logrando valores mayores en el último escenario estudiado. La actividad de M presenta valores menores a $500 \text{ m}^3.\text{píxel}^{-1}$.

DISCUSIÓN

Utilizar modelos hidrológicos espacialmente explícitos como Invest[®] permitió predecir patrones de distribución del rendimiento hídrico ante cambios en el uso y la cobertura del suelo. De acuerdo con Hamel y Guswa (2015) los efectos en la respuesta hidrológica son capturados adecuadamente por el modelo.

A partir de los resultados obtenidos se observó que el aumento de superficie ocupada por el Monte incidió directamente en la provisión del rendimiento hídrico en forma aislada, generando leves impactos sobre la dinámica hídrica, coincidiendo con lo revelado por Nosseto et al. (2011) en su estudio de la transformación de bosques a cultivo de soja en la región pampeana. Por su parte, las zonas de vegetación natural con uso G3b están en un equilibrio morfo-dinámico frágil. Este equilibrio es disturbado, en algunas ocasiones, por la introducción de la agricultura en la transición de GA hacia AG.

El incremento en los rangos de rendimiento hídrico superiores a $500 \text{ m}^3.\text{píxel}^{-1}$ en el año 2011, se concentraron en zonas donde el uso del suelo corresponde a agricultura ya que al haber menor infiltración y menor evapotranspiración, se exporta más agua en un período anual. Además las prácticas agrícolas (cultivo y/o ganadería) tienen como

consecuencia que la capa de vegetación se minimiza durante un determinado período, causando una mayor exposición del suelo y aumentando la evaporación superficial.

Kelliher et al. (1993) y Waterloo (1994) ratifican por estudios propios que en el caso de comparar plantaciones forestales y pastizales con relación al rendimiento hídrico de las cuencas, el efecto puede ser positivo, negativo o neutro dependiendo de las condiciones ambientales locales. También cambios sutiles en la evapotranspiración afectan significativamente la cantidad de agua líquida que circula en el ecosistema (Wilcox et al., 2003; Brauman et al., 2007).

La implementación de prácticas agrícolas repetitivas, sin largos períodos de descanso ni medidas conservacionistas, se inicia con la pérdida de suelo superficial y la disminución de materia orgánica, aumentando el riesgo de escorrentía superficial y erosión asociada.

El análisis geoespacial del servicio ambiental a escala de cuenca hidrográfica permite entender como las acciones de los agricultores sobre una parcela contribuye a generar cambios en la cantidad y calidad del agua de toda la cuenca a la cual pertenecen (Jobbágy, 2011). Por lo tanto, conocer cómo se distribuye el servicio de provisión hídrica en las zonas altas de la cuenca de Napaleoufú, brindó información de cómo podría comprometerse su disponibilidad hídrica en las zonas bajas y por lo tanto la productividad agrícola ante escenarios futuros, tanto climáticos como socio-económicos y uso del suelo.

Se consideró que el cambio en las condiciones de un territorio modifica este servicio ambiental y la disponibilidad y provisión hídrica, para lo cual se requiere que el territorio sea optimizado para un aprovechamiento sustentable de sus bienes y servicios. La conjugación de las distintas capacidades de brindar estos bienes y servicios ambientales, considerando los requerimientos de uso del suelo que demandan los actores económicos y actores sociales, conforma el escenario complejo del desarrollo sostenible. El ordenamiento territorial es una de las mejores herramientas para la utilización inteligente de los recursos ambientales, económicos, financieros y

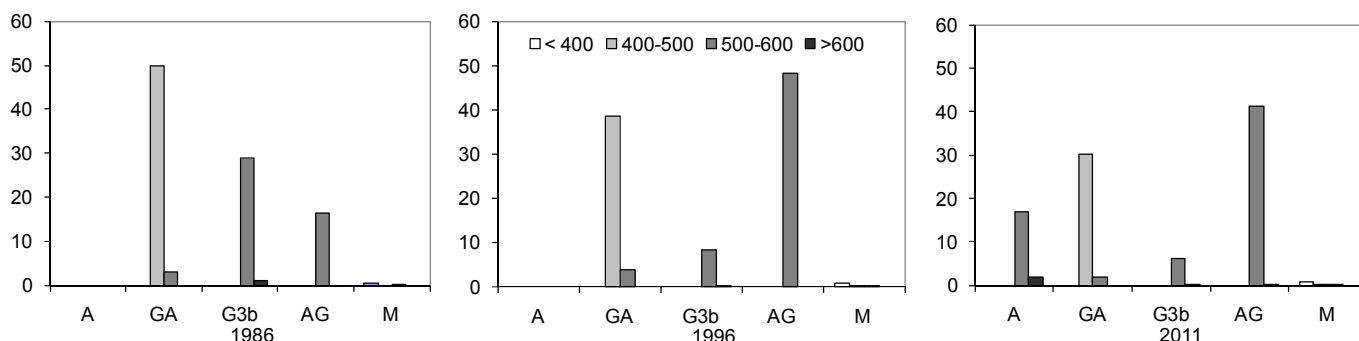


Figura 4. Clases de rendimiento hídrico ($\text{m}^3.\text{píxel}^{-1}$) en porcentaje de ocupación según escenarios de uso del suelo en la cuenca del Arroyo Napaleoufú.

humanos para propiciar al mejoramiento permanente y equitativo de la calidad de vida de toda la población. De esta manera, el servicio ambiental pone en evidencia la necesidad de realizar la articulación entre los actores sociales y las políticas públicas.

Por último, es importante mencionar que en la cuenca en estudio la producción familiar está presente. Se destacó su rol en la ocupación del territorio, en la producción y provisión de cereales y ganado para el mercado interno, en el resguardo y producción de semillas, en la generación de empleo local genuino y como proveedora y protectora de sus servicios ambientales.

La relación entre la agricultura familiar y el servicio de provisión hídrica es reconocida a nivel internacional. La Asociación Internacional de las Ciencias Hidrológicas (IAHS) ha manifestado la importancia de la dinámica cambiante del ciclo hidrológico en conexión con los sistemas antrópicos (Montanari et al., 2013).

CONCLUSION

El uso del módulo Water Yield de InVEST® permitió cuantificar el rendimiento hídrico y analizar la distribución espacial del servicio ambiental de provisión hídrica en una cuenca templada del sudeste bonaerense de Argentina. El resultado alcanzado proporcionó la posibilidad de realizar una evaluación diagnóstico sobre la evolución del servicio de provisión hídrica en la cuenca, convirtiéndose en una valiosa herramienta de apoyo para la toma de decisiones, para la selección de planes de ordenamiento territorial. El modelo capturó la respuesta hidrológica ante los cambios del uso del suelo para el período 1986-2011, durante el cual se incrementó el rendimiento hídrico debido a la expansión de la agricultura como principal uso del suelo en la cuenca.

El conocimiento de la distribución del servicio ambiental de provisión hídrica es una herramienta técnica orientada a la gestión y ordenamiento territorial, debido a que el manejo del agua, suelo y vegetación en forma coordinada y adaptada a la situación local de uso del suelo, racionalizará la actividad humana, mejorando la productividad del territorio y la obtención de nuevas alternativas de producción, junto con el planteo de indicadores para el monitoreo y control para el uso sustentable del agua y suelo.

Reconocer y zonificar la distribución del rendimiento hídrico, a escala de cuenca y a partir del modelo InVEST®, permitió identificar zonas de provisión hídrica prioritarias en conservación. De esta manera se pueden establecer pautas para la planificación y el manejo de las cuencas hidrológicas generando posibles estrategias en el manejo del servicio ambiental de provisión hídrica y la producción agrícola. En función de las necesidades y de la información disponible, se considera factible la futura aplicación de este tipo de modelo en otras cuencas templadas del sudeste bonaerense, como base para el estudio de los servicios ambientales.

Agradecimiento

Este trabajo fue elaborado para el desarrollo del Proyecto N° 11/A223 denominado "Servicios Ambientales de Agroecosistemas para el Ordenamiento

Territorial en el sur de la provincia de Buenos Aires" financiado por el Programa de Incentivos a la Investigación, del Ministerio de Educación de la Nación Argentina.

BIBLIOGRAFÍA

- Abrisqueta, J. M., Mounzer, O., Álvarez, S., Conejero, W., García, Y., Tapia, L. M., Vera, J., I Abrisqueta y Ruiz, M. C. 2008. Root dynamics of peach trees submitted to partial rootzone drying and continuous deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 95: 959–967.
- Aster Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEM V2) the release of the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, the Ministry of Economy, Trade, and Industry (METI) of Japan and the United States National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2011. <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>.
- Barranquero, R. S., Varni, M., Ruiz de Galarreta, A. y Banda Noriega, R. 2012. Aporte de la hidroquímica al modelo conceptual del sistema hídrico subterráneo, Tandil. Argentina. *Geoacta* 37: 130-146.
- Brauman, K. A., Daily G. C., Duarte, T. K. y Mooney, H. A., 2007. The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environmental Resources*, 32: 67–98.
- Budyko, M.I., 1974. *Climate and Life*, Academic, San Diego, California.
- Chen, S. X., Xie, L. & Zhang, J.C. 2008. Root system distribution characteristics of main vegetation types in Anji County of Zhejiang Province. *Subtropical Soil and Water Conservation* 20:1-4.
- Cudennec, C., Leduc, C. y D. Koutsoyiannis. 2007. Dryland hydrological in Mediterranean regions-a review. *Hydrological Sciences Journal*, 52:1077-1087.
- Daily, G.C., Polasky, S., Goldstein, J., Kareiva, P.M., Mooney, H.A., Pejchar, L., Ricketts, T.H., Salzman, J. & Shallenberger, R., 2009. Ecosystem services in decision making: time to deliver. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7: 21-28.
- FAO, 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Natural Resources Management and Environment Department (FAO) Rome, Italy. www.fao.org.
- Goldman, R. L., Benítez, S. y Calvache, A., 2010. TEEB case: Water Funds for conservation of ecosystem services in watersheds, Colombia, available at: TEEBweb.org.
- Hamel, P., y Guswa, A. J. 2015. Uncertainty analysis of a spatially explicit annual water-balance model: case study of the Cape Fear basin, North Carolina. *Hydrology and Earth System Sciences* 19: 839-853.
- INTA, 1986. Aptitud y uso actual de las tierras argentinas. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Proyecto PNUD. Argentina 85/019 Área Edafología.
- INTA, 1995. Atlas de Suelos de la República Argentina. Escala 1:500.000. Versión Digital
- INTA, 2012. Atlas Climático Digital de la República Argentina www.geointa.inta.gov.ar
- INTA - SAGyP. 1989. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires.

- Izquierdo, A. E., y Clark, M. L.** 2012. Spatial Analysis of Conservation Priorities Based on Ecosystem Services in the Atlantic Forest Region of Misiones, Argentina. *Forest* 3: 764-786.
- Jobbágy E.G.** 2011. Servicios hídricos de los ecosistemas y su relación con el uso de la tierra en la llanura chaco-pampeana. Capítulo 7. En *Valoración de Servicios Ecosistémicos. Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial*. Laterra P., Jobbágy E.G. y J.M. Paruelo (Editores). Ediciones INTA. Buenos Aires 2011. 720 pp.
- Jobbágy, E. G., Acosta, A. M. y Nosseto, M. D.**, 2013. Rendimiento hídrico en cuencas primarias bajo pastizales y plantaciones de pino de las sierras de Córdoba (Argentina). *Ecología Austral*, 23:87-96.
- Kelliher, F. M., Leuning, R. y Schultze, E. D.**, 1993. Evaporation and canopy characteristics of coniferous forests and grasslands. *Oecologia*, 95: 153-163.
- Martínez, C. A., Romero, P. y Fernández, J. I.**, 2007. Técnicas de riego deficitario en el cultivo de la vid. *Vida Rural*, 444:17-21.
- Mintegui Aguirre, J. A. y López Unzu, F.** 1990. La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 306 pp.
- Montanari, A., Young, G., Savenjie, H. H. G., Hughes, D., Wagener, T., Ren, L. L., Koutsoyiannis, D., Cudennec, C., Toth, E., Grimaldi, S., Blöschl, G., Sivapalan, M., Beven, K., Gupta, H., Hipsey, M., Schaeffli, B., Arheimer, B., Boegh, E., Schymanski, S. J., Di Baldassarre, G., Yu, B., Hubert, P., Huang, Y., Schumann, A., Post, D., Srinivasan, V., Harman, C., Thompson, S., Rogger, M., Viglione, A., McMillan, H., Characklis, G., Pang, Z., & Beylaev, V.** 2013. "Panta Rhei – Everything Flows": Change in hydrology and society – The IAHS Scientific Decade 2013–2022. *Hydrological Sciences Journal*, 58: 1256–1275.
- Nosseto, M. D., Jobbágy, E. G., Brizuela, A. B. y Jackson, R.B.** 2011. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems and environment*, 154: 2-11.
- Renting, H., Rossing, W. A. H., Groot, J. C. J., Ploeg, J. D., Van der Laurent, C., Perraud, D., Stobbelaar, D. J., Van Ittersum, M.K.** (2009). «Exploring multifunctional agriculture. A review of conceptual approaches and prospects for an integrative transitional framework». *Journal of Environmental Management* 90(2): 112-123
- Ruiz de Galarreta, A. y Banda Noriega, R.**, 2005. Geohidrología y evaluación de nitratos del Partido de Tandil, Buenos Aires, Argentina. IV Congreso Argentino de Hidrogeología y II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea. UNCR. Río Cuarto, Córdoba. 99-108.
- Tallis, H., Polasky, S.**, 2009. Mapping and valuing ecosystem services as an approach for conservation and natural-resource management. *The year in Ecology and conservation Biology: Annual New York Academy of Sciences* 1162: 265-283
- Tchilinguirian, P., Tello, N., Cavallaro, S. y Fratolocchi, C.** 2004. Carta de Línea de Base Ambiental 3760-IV.Tandil. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Dirección de Geología Ambiental Aplicada, Boletín N° 341.
- Vázquez, P. y L. Zulaica.** 2011 Cambios en el uso de la tierra del partido de Tandil y principales impactos ambientales. *Revista Párrafos Geográficos*, 10: 242-267.
- Venacio, L.** 2007 Globalización, Desarrollo Local y Sociedad Civil. Edición electrónica gratuita. Texto completo en: www.eumed.net/libros/2007a/222/
- Vigerstol, K. y Aukema, J. E.**, 2011. Comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 92: 2403-2409.
- Waterloo, M. J.**, 1994. Water and nutrient dynamics of Pinus caribaea plantation forest on former grassland soils in southwest. Viti Levu, Fidji. *Febodruk B. V.*, Enschede. 478 pp.
- Wilcox, B. P., Seyfried, M. S. y Breshears D. D.**, 2003. The water balance on rangelands. *Encyclopedia of Water Science*. En: Stewart, B. A. y T. A. Howell (Eds) Marcel Dekker, New York. 791-794.
- Wu, T. F., Lin, C. J. y Weng, R. C.**, 2004. Probability estimates for multi-class classification by pairwise coupling. *Journal of Machine Learning Research*, 5: 975-1005.
- Zhang, L., Dawes, W.R. y Walker, G.R.**, 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources*, 37: 701–708.
- Zhou B., Yu, X. X., Chen, L. H.**, 2010. Soil erosion simulation in mountain areas of Beijing based on InVEST Model. *Research of Soil and Water Conservation*, 17: 9–13.