

Aportes al estudio de la disponibilidad y uso del agua en la cuenca del río Colorado, Argentina.

Carolina Aumassanne¹, María Eugenia Beget², Paolo Sartor¹, Dardo Fontanella¹, Carlos Di Bella², Patricio Oricchio² y Fernanda Gaspari³

¹Agencia de Extensión Rural de INTA 25 de Mayo, La Pampa, Argentina; ²Instituto de Clima y Agua, INTA, Buenos Aires, Argentina; ³Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, Argentina.

E-mail: aumassanne.carolina@inta.gob.ar

RESUMEN

La cuenca del río Colorado está atravesando cambios en el uso y la cobertura del suelo a partir de la expansión de la agricultura bajo riego. Esto cobra particular importancia en sistemas áridos y semiáridos donde la evapotranspiración constituye uno de los principales componentes del balance de agua. A su vez, en un contexto de variabilidad climática, donde el agua se destina también para uso urbano e industrial. Resulta primordial conocer los impactos potenciales que estos cambios tendrían sobre la hidrología regional. Además, al ser una cuenca de régimen nival, es sumamente importante conocer la variabilidad espacial y temporal de la cobertura de nieve. Se aborda este sistema aplicando diversas herramientas como sensores manuales, datos satelitales y modelos de simulación de cultivos de manera de cuantificar la dinámica del agua y su relación con el uso, la cobertura del suelo y el clima. A escala de cuenca, se caracterizó el terreno de la cuenca alta, que corresponde a las subcuencas del Barrancas y el Grande, y se estudió la relación de la cobertura de nieve con la disponibilidad de agua. Además, se analizó la relación entre la disponibilidad de agua y su calidad. Se evaluó una metodología para cuantificar el patrón espacial de la evapotranspiración media anual en la cuenca media. A escala de lote, en establecimientos con maíz bajo riego, se estimaron variables biofísicas del cultivo, se determinaron propiedades del suelo, y se cuantificó la evapotranspiración y la eficiencia del uso del agua. A partir de dichos estudios se espera caracterizar algunos aspectos relativos a la disponibilidad y al uso del agua en la cuenca del río Colorado. Esto aportará una visión integradora de la gestión del agua en la cuenca, útil para técnicos, responsables políticos y tomadores de decisión, a modo de sentar bases para el ordenamiento territorial.

INTRODUCCIÓN

La agricultura se expande sobre nuevos territorios incluyendo regiones semiáridas y áridas previamente destinadas a la ganadería (Solbrig, 1999). En particular, la agricultura bajo riego de los países en desarrollo se ha expandido 4 veces, pasando de 47,3 millones de hectáreas en 1900 a 276,3 millones de hectáreas en el 2000 (Scanlon *et al.*, 2007). Debido a los mayores rendimientos de la agricultura de regadío, en comparación con la de secano, y a la expansión de los cultivos hacia zonas marginales, se predice que el área de las zonas de regadío seguirá aumentando en el futuro (Abrahamo *et al.*, 2011), un 20% hasta el 2030 (Scanlon *et al.*, 2007). La agricultura bajo riego avanza sobre los sistemas naturales, a través de la eliminación y/o el reemplazo de la vegetación natural, implicando importantes CUCT, y en consecuencia, en el funcionamiento del ecosistema.

Los cambios en el uso y la cobertura de la tierra (CUCT) son los resultados más visibles de las modificaciones del hombre sobre los ecosistemas terrestres (Weng y Wei, 2003). Los CUCT cobran particular importancia en ecosistemas áridos y semiáridos debido a su vulnerabilidad en términos de balance de agua (Reynolds *et al.*, 2007). En estas regiones la mayor parte de las pérdidas del agua precipitada en superficie se deben a la evapotranspiración (ET) (e.g. Tweed *et al.*, 2011). Contreras *et al.* (2011), particularmente, evaluaron el balance de agua en la región del Monte Central en Argentina, donde concluyeron que grandes volúmenes de agua están siendo extraídos de los ríos andinos para alimentar a los sistemas bajo riego, contribuyendo con el 62% de la ET. Zhang *et al.* (2012) evaluaron los efectos del cambio de la cubierta vegetal sobre la escorrentía, la ET y la humedad del suelo, en una cuenca de China, y concluyeron que la ET es el componente hidrológico más sensible a dichos cambios. En la cuenca de Lerma, en España, Abrahamo *et al.* (2011) registraron aumentos en la ET por expansión del regadío. Por otro lado, un estudio realizado en el norte de China muestra que el exceso de riego ha llevado a elevar los niveles freáticos, provocando problemas de salinidad en la región (Xu *et al.*, 2013). La cuenca del río Colorado, en el norte de la Patagonia Argentina, está atravesando CUCT a partir de la expansión de la agricultura bajo riego, generando posibles cambios en la dinámica hídrica superficial.

Las intervenciones humanas en los ecosistemas implican, por lo tanto, alteraciones en la prestación de sus servicios ecosistémicos (Jobbágy, 2008) tales como: provisión de agua para los distintos usos (e.g. consumo humano, riego, industria, esparcimiento), provisión de hábitat, y regulación de crecientes, de inundaciones y de salinización (MA, 2005; Paruelo *et al.*, 2006; Viglizzo y Frank, 2006; Jobbágy, 2011). A su vez, en un contexto de variabilidad climática en el que el agua escasa debe ser destinada también a otros usos (urbano, industrial), resulta primordial conocer los impactos potenciales que estos cambios tendrían sobre la hidrología regional. Además, al ser una cuenca de régimen nival, resulta sumamente importante aquí conocer la variabilidad espacial y temporal de la cobertura de nieve en la cuenca alta.

La teledetección, definida como la observación a distancia de los objetos, puede integrarse junto en un Sistema de Información sobre el Territorio (SIT) para estudiar los usos y coberturas de la tierra, como el tipo de vegetación (e.g. Noretto *et al.*, 2012), la cobertura de nieve (Salomonson y Appel, 2004; Cartes, 2009; Dahri *et al.*, 2011; Herms y Jorge, 2012) y cuantificar los componentes del balance de agua (Allen *et al.*,

2005; Bastiaanssen et al., 2005; Immerzeel et al., 2008), entre otras aplicaciones. Otra herramienta SIT es la interpretación de las formas del terreno que pueden ser descriptas y cuantificadas por parametrización del relieve a partir de un modelo digital de elevación (MDE), el cual se utiliza como base para la construcción de diversos modelos digitales. Actualmente los MDEs se generan con métodos basados en sensores remotos y existen diversos softwares para su procesamiento.

El objetivo de este trabajo es caracterizar algunos aspectos relativos a la disponibilidad y al uso del agua en la cuenca del río Colorado. El objetivo se abordó usando dos aproximaciones, la escala de cuenca y la escala de lote, a través de los siguientes objetivos específicos: 1) analizar de las características morfométricas del terreno (elevación, pendiente, orientación) de la cuenca alta del río Colorado; 2) evaluar el área cubierta por nieve y su variación espacio-temporal en la cuenca alta del río Colorado; 3) evaluar una metodología para cuantificar el patrón espacial de la ET media anual a partir de sensores remotos en un área piloto de la cuenca del río Colorado; y 4) estudiar el uso del agua por un cultivo de maíz bajo riego a partir del modelo AQUACROP.

Dicha caracterización aportará una visión integradora de la cuenca, útil para técnicos, responsables política y tomadora de decisión a modo de sentar bases para el ordenamiento territorial y la gestión de los recursos hídricos de la cuenca.

MATERIALES Y MÉTODOS

Escala de cuenca

El área de estudio comprende la cuenca alta del río Colorado. Éste nace por la confluencia de los ríos Grande y Barrancas, aproximadamente a los $36^{\circ}52'19''S$ y $69^{\circ}45'34''O$ y recorre alrededor de 1.200 km atravesando parte de las provincias de Mendoza, Neuquén, Río Negro, La Pampa y Buenos Aires (Figura 1). El río Colorado tiene un derrame anual de 4.600 Hm^3 y un caudal medio anual es de $138,8 \text{ m}^3/\text{seg}$, presentando una marcada estacionalidad primavero-estival. Es un río de régimen nival, alimentado por la fusión de la nieve acumulada en la Cordillera Principal (COIRCO, 2013). A lo largo de la cuenca el clima varía de árido a ústico. En la actualidad la agricultura bajo riego se ha desarrollado principalmente en la porción media y baja de la cuenca ocupando la mitad del área potencialmente regable. Los cultivos de cereales, forrajeros y hortícolas predominan en la cuenca (Sánchez, 2013). En el sector alto-medio prevalecen las producciones de alfalfa, maíz y sorgo, con riego gravitacional y riego por pivote central, mientras que en el sector distal predominan los cultivos de cebolla, alfalfa y maíz mediante riego gravitacional.

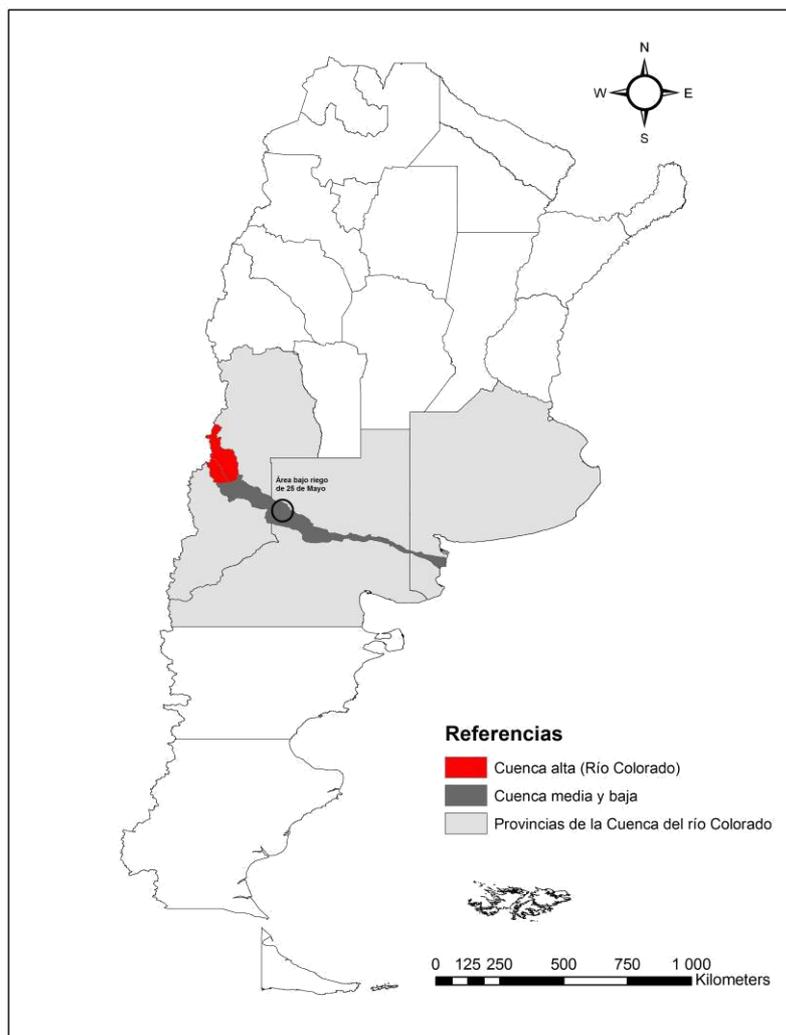


Figura 1. Localización del área bajo estudio.

Para la **caracterización morfométrica** del terreno, se emplearon datos procedentes del Proyecto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (Aumassanne *et al.* 2016). SRTM registra datos de elevación con una resolución espacial de 90 metros y radiométrica de 16 bit. Se realizó un análisis estándar del terreno con el software SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses), y se evaluaron parámetros de relieve (pendiente y orientación) que luego se clasificó en 4 clases para simplificar su análisis.

En el caso de la **estimación de la cobertura de nieve**, se utilizó el producto MOD10A2 (Aumassanne *et al.*, 2015). La superficie total bajo estudio es de 13.900 km² que corresponde a la cuenca hidrológica activa, cuencas del Grande y Barrancas y representa el 29 % de la superficie de toda la cuenca del río Colorado. El producto es desarrollado a partir de imágenes registradas por el sensor satelital MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (<http://reverb.echo.nasa.gov>), y muestra la extensión máxima de la cubierta de nieve en un compuesto de 8 días (Hall *et al.*, 2001; Hall *et al.*, 2006), con una resolución espacial de 500 metros. El valor de píxel indica de manera cualitativa la presencia o ausencia de nieve (0 nada, 25 dudoso, 50 nube y 200 nieve). La presencia de nieve en un píxel es registrada cuando para al menos uno de los 8 días se detecta. Se trata, por lo tanto, de una aproximación que maximiza la presencia de nieve. Se utilizaron las escenas h12v12 y h13v12, y se analizó la serie años 2003 a 2013, en el período comprendido

entre el 23 de abril y el 17 de noviembre de cada año (27 fechas). La selección de dichas fechas se basa en el comportamiento observado de la cobertura de nieve en las tres estaciones nivológicas que se localizan en la cuenca alta. Se agruparon las imágenes por fechas y por años, mediante el uso del software ERDAS 9.1; así se obtuvo un archivo por año de las diferentes fechas (en total 11 archivos que representan los 11 años - 2003a2013- de 46 bandas cada uno que son las fechas julianas cada 8 días del producto MOD10A2) para poder identificar la marcha anual de la cobertura de nieve, y 46 archivos de las mismas fechas pero con los diferentes años para poder detectar si la fecha en cuestión siempre presentó nieve. Luego fue necesario conocer siempre la fecha de ocurrencia de nieve, para la cual se diseñó un algoritmo que indicara si había nieve y a qué fecha correspondía, asignándole el valor de esa fecha. Por último para cada año se agruparon las fechas o compuestos por clases, donde cada una de las clases contienen: al menos 3 fechas, de 4 a 6, de 7 a 9, de 10 a 12, 13 a 15, 16 a 18, 19 a 21, 22 a 24 y de 25 a 27 fechas. Posteriormente, se calculó el área de cada clase a partir de la cantidad de píxeles y se correlacionó con el derrame anual del río Colorado, en la estación Buta Ranquil (Neuquén) (www.coirco.gov.ar). Por otra parte, se analizó los registros de la serie histórica de datos de caudal, de la estación antes mencionada y de conductividad eléctrica, medida en la estación Punto Unido (La Pampa) desde 1965-2009. Esta última se ubica aguas debajo de Buta Ranquil, y representa el ingreso al Sistema bajo Riego de Aprovechamiento Múltiple del río Colorado en 25 de Mayo La Pampa.

Para la **estimación de la evapotranspiración**, se consideró un área piloto de $\sim 40,000 \text{ km}^2$ con centro en 25 de Mayo, provincia La Pampa (Beget *et al.*, 2014). La metodología utilizada considera la hipótesis del equilibrio hidrológico. La misma plantea que el estado de la vegetación está en equilibrio con la precipitación en aquellos sitios no degradados y que no reciben aportes de agua extra procedentes de la escorrentía superficial o del nivel freático. La evapotranspiración media anual (ETMA) en los sistemas áridos y semiáridos se puede escalar de linealmente con la anomalía del índice de vegetación espectral -IV-. La anomalía es calculada como la diferencia entre el valor observado por el satélite -IVobs- y el esperado si la precipitación local fuera la única fuente de agua para el desarrollo de la vegetación -IVpma-(Contreras *et al.* 2011). De manera preliminar, para la estimación de IVpma se calibró una relación regional entre la precipitación anual media (PMA) y el promedio del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) observados en una muestra de 25000 píxeles de referencia seleccionados al azar. El índice EVI se obtuvo del producto MOD13Q1 de MODIS (Solano *et al.* 2010) para el período octubre de 2000 a septiembre de 2012. Los valores de PMA de la región se extrajeron de la base de datos "CliMond" (Kriticos *et al.* 2012). A modo de ejercicio de evaluación se realizó una comparación de los valores de ETMA estimados con aquellos estimados a partir del método FAO56 (Allen *et al.* 1998, Contreras *et al.* 2014) en una selección de píxeles puros con cultivos de maíz, alfalfa, vid y plantaciones forestales.

Escala de lote

A escala de lote, el área de estudio se ubica la cuenca media del río Colorado, en la Sección V de riego del Sistema de Aprovechamiento Múltiple de 25 de Mayo La Pampa, Argentina (Figura 2a). Aquí se seleccionó un lote de maíz (*Zea mays*) con riego gravitacional (37°56'29.74"S 67°50'23.28"O) de 27 has (Lambert *et al.*

2014). En el lote se designaron 6 unidades elementales de muestreo (UEM), representadas en la Figura 2b). En cada UEM (Figura 2c) se tomaron registros sistemáticamente de la fenología del cultivo, de la altura (H), se tomaron fotografías digitales y se instaló un sistema PASTIS57. Dicho sistema fue desarrollado por el INRA (Baret *et al.* 2010a) e incluye un datalogger conectado a 6 sensores que registran la radiación, permitiendo realizar estimaciones de transmisión de la radiación por parte del canopeo, y en consecuencia del índice de área de planta (PAI). Los sensores están orientados a 57,5°, ya que a esa dirección se minimizan los efectos de la arquitectura del canopeo y las condiciones de iluminación (Baret *et al.* 2010b). Las fotografías digitales cenitales, hemisféricas y a 57,5° se procesaron utilizando el programa libre CAN-EYE (INRA, <https://www4.paca.inra.fr/can-eye>) para el cálculo de la fracción de suelo cubierta (fCover), la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida (fAPAR) y el PAI. A su vez se realizaron muestreos de suelo para la determinación de propiedades físicas y químicas. El modelo se calibró localmente con los datos de terreno una UEM y se validó a partir de aquellos resultados obtenidos en otras dos UEM. Las variables climáticas de entrada fueron obtenidas de una estación meteorológica situada en 25 de Mayo y la evapotranspiración de referencia fue calculada a partir del método FAO56 (Allen *et al.* 1998).

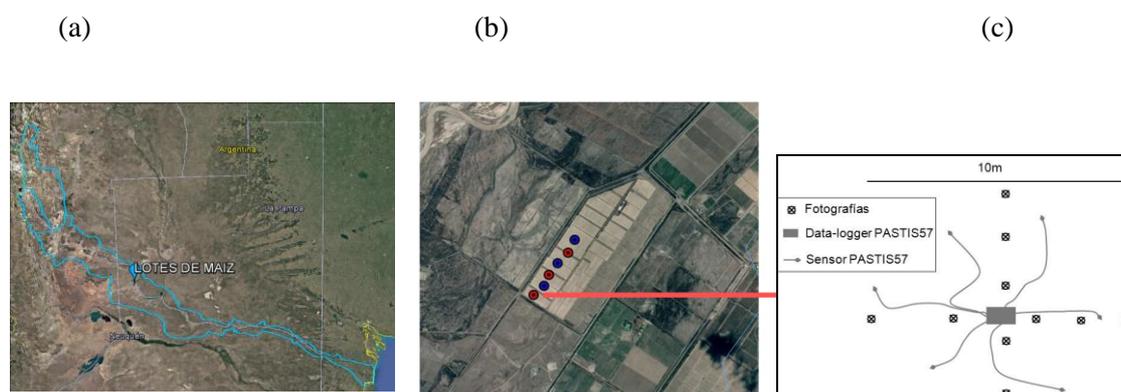


Figura 2. a) Localización del lote de estudio en la cuenca. b) Lote y UEM. c) Esquema de las mediciones tomadas en cada UEM. Tomado de Lambert *et al.* 2014.

RESULTADOS

Escala de cuenca

La **caracterización morfométrica** del terreno define que el río Grande, tiene una longitud de 345 km hasta confluir con el río Barrancas, encerrando un área de drenaje de 10.405 km², con dirección predominante hacia el sur, de forma encajonada (Figura 3). Por su parte el río Barrancas tiene una longitud de 131 km hasta confluir con el río Grande, con un área de drenaje de 3.544 km². Su curso se orienta en dirección sur-sureste hasta la laguna Carri-Lauquen, a partir de la cual retoma su curso por un cañón angosto hasta unirse con el río Grande. En cuanto a la elevación, la cuenca alta del río Colorado se ubica entre los 877 msnm y los 4.700 msnm. El 50,8% de la subcuenca del Barrancas y 53,7 % de la superficie del Grande se encuentran entre las cotas de 1.500 y 2.500 m.s.n.m, presentando la del Grande cotas por encima de 3.500 m.s.n.m en un 2,2 % de la superficie. El 57,3% de la superficie del Barrancas y 64,6 % del Grande presentan pendientes entre 0-15%.

Sobre el sector noroeste se encuentran las áreas de fuerte pendientes, entre 28 y 32°, donde se presentan también las mayores elevaciones. En general, las laderas de exposición norte presentan suelos con menor contenido de humedad y menor cobertura vegetal, que las laderas de exposición sur (Figura 3).

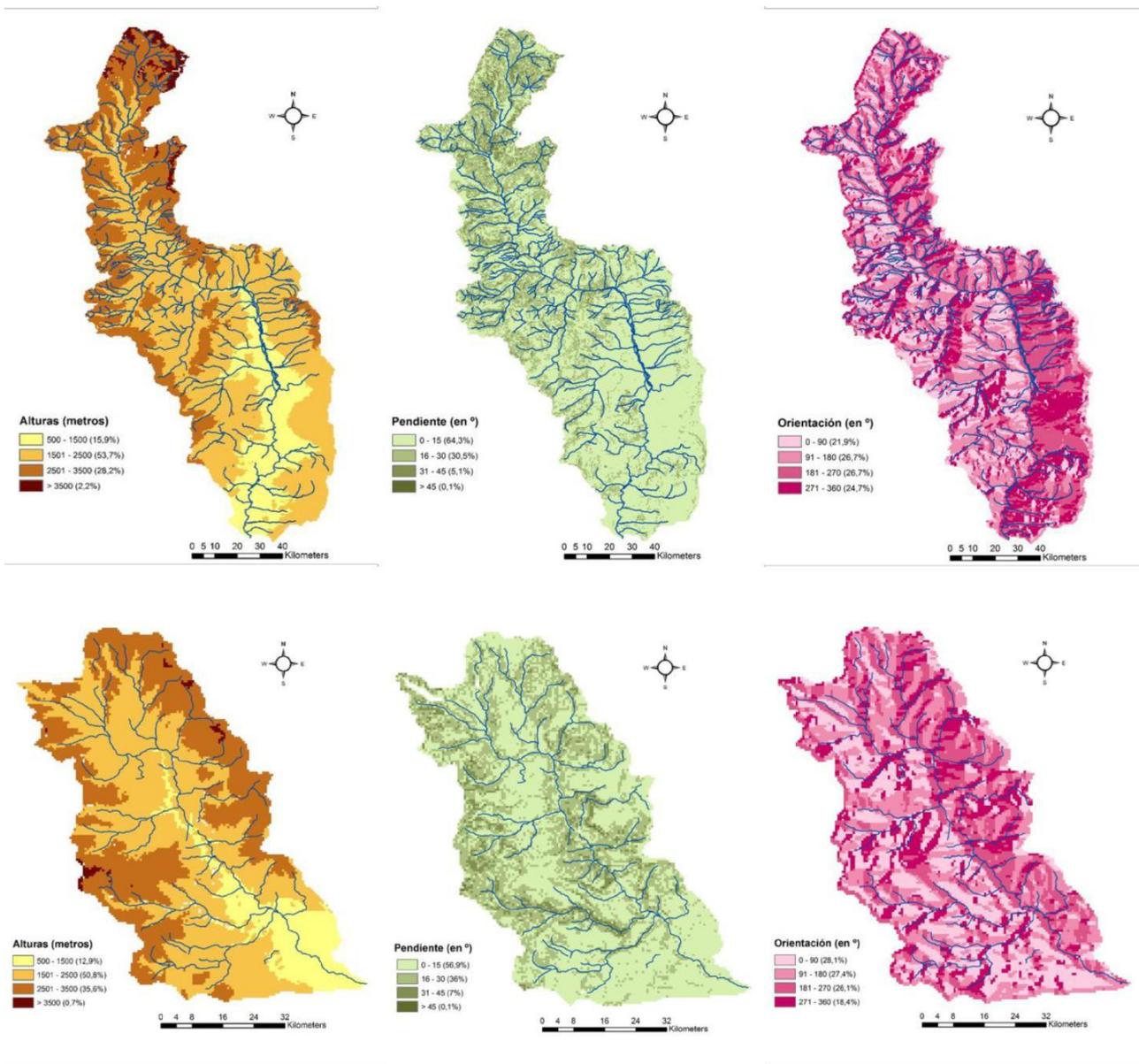


Figura 3. Elevación, pendiente y orientación. Cuenca del río grande (superior) y río Barrancas (inferior). Entre paréntesis superficie de cada clase. Tomado de Aumassanne et al. 2016.

Las cuencas analizadas, corresponden a la cuenca activa del río Colorado, que es donde se acumula la nieve, que luego se fusiona. Conocer las formas del terreno de esta región permitirá posteriormente realizar un análisis exhaustivo donde se relacione la acumulación de nieve, con la elevación, pendiente y orientación.

La **cobertura de nieve** es altamente variable en el espacio y el tiempo (Figura 4) en la cuenca alta del río Colorado. Se pueden observar zonas en que la mayor parte del tiempo (25 a 27 fechas) están cubiertas por nieve (región oeste y norte) y otras donde la duración de la cobertura es más variable (centro y sur del área de estudio). Las áreas con mayor duración de cobertura corresponden a zonas de mayor altimetría y en su mayoría están situadas en la subcuenca del río Grande. Por lo tanto, la persistencia temporal depende de la altitud y de la latitud. En coincidencia con varios autores (e.g. Lascano y Villalba, 2007), a mayor altura y mayor latitud, el período durante el cual la precipitación se acumula y permanece retenida en fase sólida es más largo. Por lo tanto, según la distribución altimétrica cada cuenca cuenta con más o menos superficie para el desarrollo del almacenaje de agua en escalas de tiempo iguales o mayores a un año.

Particularmente, para la serie de años analizada, el año 2005 fue el que presentó mayor cobertura de nieve, lo cual coincide con los mayores valores de derrames registrados por COIRCO durante el ciclo hidrológico 2005-2006 (7897 Hm³). El año con menor cobertura fue el 2013, asociado a un derrame anual de 2500 Hm³. Se observó además una disminución de la cobertura desde el año 2009 hasta el último año bajo análisis. De todas las clases analizadas se encontró mayor variación en el área cubierta por nieve en la clase que comprende de 25 a 27 fechas acumuladas (Figura 4), con un coeficiente de variación de 92,68. Esta clase es de especial interés en este estudio, debido a que son las zonas de mayor reservorio de agua, por presentar cobertura la mayor parte del tiempo, por lo que se trataría de una cobertura más permanente. El área cubierta con una frecuencia de 16 a 18 y 19 a 21 fechas por año, presentan menor variabilidad entre años, con un coeficiente de variación de 23,3 y 17,7 respectivamente, por lo que sería nieve más estable entre años.

Existe una relación directamente proporcional ($R^2= 0,82$) entre el derrame anual y el área cubierta por nieve (Figura 5) con la clase que contiene entre 22 a 24 fechas con cobertura. Por tanto, la reducción del área cubierta por nieve tiene efecto directo sobre el caudal del río, salvo en el caso del ciclo hidrológico 2006-2007, donde la cobertura de nieve (clase de 25 a 27 fechas) se ve reducida y su derrame tuvo valores altos (6851 Hm³), lo que podría deberse a un efecto de tipo retardado por la acumulación de nieve en el ciclo anterior.

Existe relación directa entre la disponibilidad de agua y su calidad. Dependiendo del uso al que se la destine, se definen los parámetros a evaluar y/o monitorear. En el caso de la agricultura bajo riego, la conductividad eléctrica (CE) es uno de los parámetros más importantes.

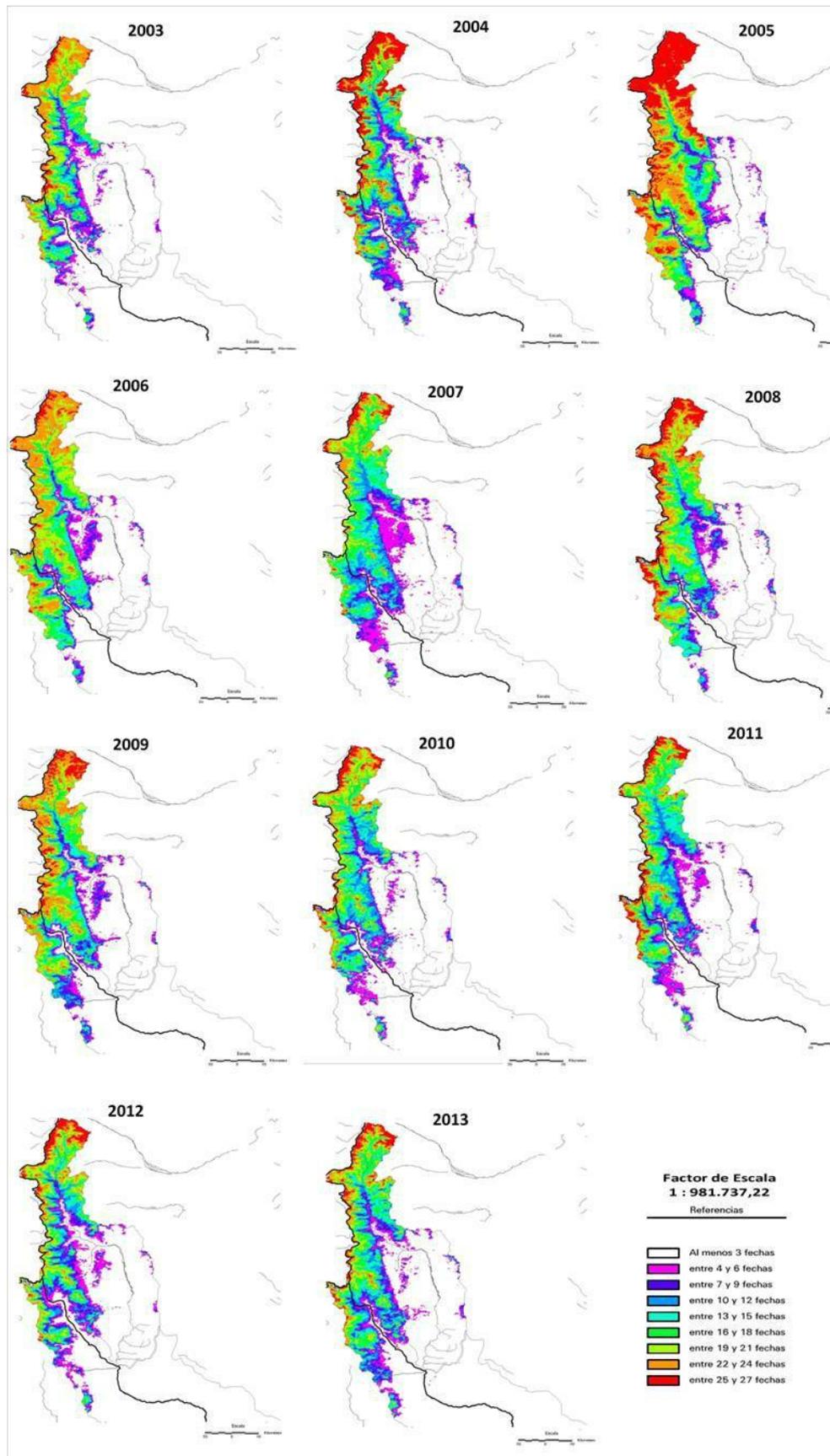


Figura 4. Mapas de frecuencia de cobertura de nieve en la cuenca alta del río Colorado, derivados del producto MOD10A2, para los años 2003 a 2013 de abril a noviembre de cada año. Tomado de Aumassanne *et al.* 2015

A través del análisis del caudal medio anual en la estación Buta Ranquil, aguas arriba del área bajo riego de 25 de Mayo y de la CE en la entrada del sistema de riego del Sistema de Aprovechamiento Múltiple del Río Colorado en 25 de Mayo, La Pampa, se observa una relación inversamente proporcional entre la CE y el caudal (Q) (Figura 5). Los valores de CE medios anuales rondan entre 0.7-1.2 mmhos/cm, alcanzando los valores máximos los períodos de 1968-1969, 1973-1974, 1996-1997, 1998-1999. Los valores de caudal máximos registrados corresponden a diciembre de 1982 (778 m³/seg) y enero de 1983 (632 m³/seg), esto coincide con valores reportados por informes del Comité Interjurisdiccional de la cuenca del río Colorado (COIRCO).

En la Figura 5, se presentan los valores mínimos, promedios y máximos mensuales de caudal y CE (sólo temporada de riego agosto-abril), para la Estación Punto Unido (PU), correspondiente al período 1965-2009. La CE presenta variaciones a lo largo del año, y con ello la calidad del agua. En términos generales, la CE se reduce con la crecida debido a la fusión nival (entre octubre y febrero), presentando los valores más bajos de CE específicamente en noviembre diciembre y enero, y se incrementa con los bajos caudales los restantes meses. En promedio, durante el año los valores oscilan entre 0,6 y 1 mmhos/cm, aunque se debe tener en cuenta que se han registrado, en la serie analizada, valores máximos que fluctúan entre 1,1-2,7 mmhos/cm. El río Colorado presenta crecidas en su caudal en los meses de octubre, noviembre, y se extienden hasta los meses de enero, febrero. Si se observan los valores máximos de caudal, se nota que existieron crecidas entre los meses de enero y febrero, que se deben a crecidas pluviales. Según informes de COIRCO, éstas crecidas pueden alcanzar caudales instantáneos importantes, aunque el derrame asociado no es significativo.

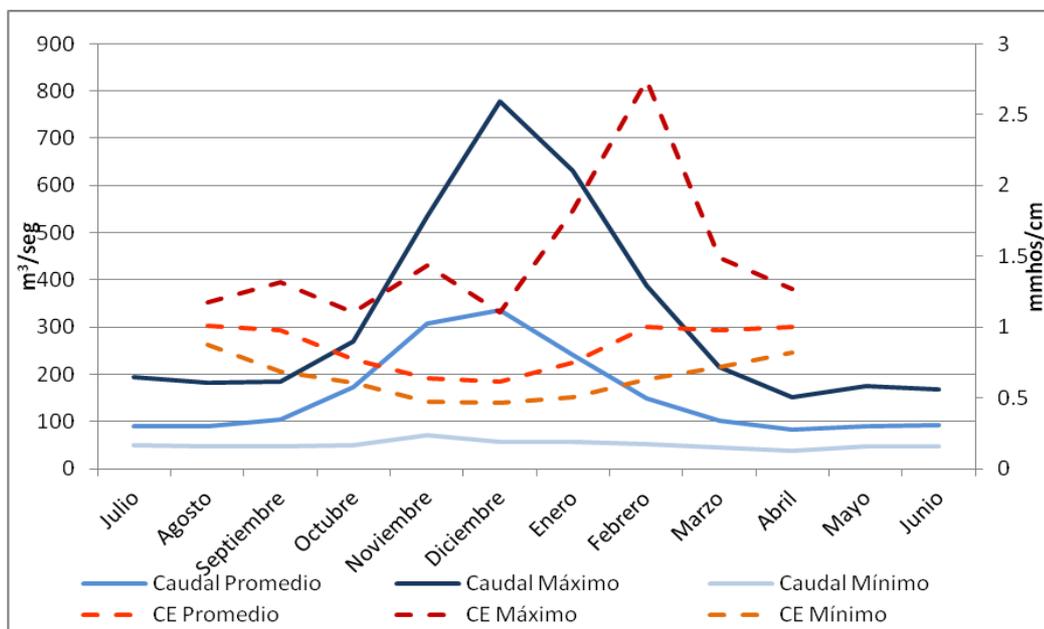


Figura 5. Caudales medios, máximos y mínimos mensuales y conductividad eléctrica para el período 1965-2009, Estación Punto Unido (La Pampa).

En relación a las estimaciones de evapotranspiración, se estableció una relación positiva entre los valores de EVI observados y la PMA (Figura 6). Los puntos ubicados sobre la línea de ajuste corresponden a las anomalías EVI positivas en las que la ETMA es cubierta por la PMA y aportes extras de agua como el riego o el agua subterránea. Los puntos ubicados debajo de la línea de ajuste corresponden a las anomalías negativas de EVI, en las que parte de la PMA se pierde por escurrimiento, evaporación directa o drenaje profundo. Los resultados mostrados en el presente son preliminares. En fases posteriores del estudio, se acotará la selección de los píxeles de referencia a una muestra de sitios no degradados y sin aportes adicionales de agua freática o de riego. Esta mejora metodológica permitiría garantizar que los sitios de referencia están bajo la hipótesis de equilibrio hidrológico (Nemani y Running, 1989).

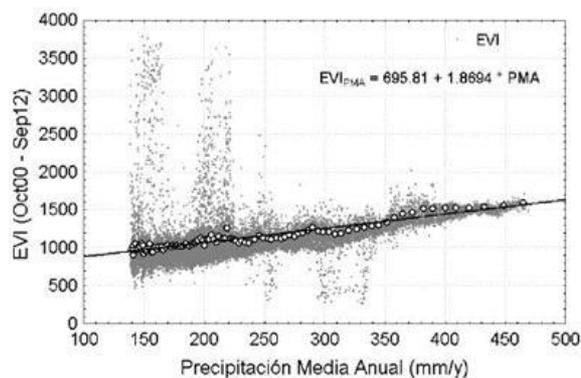


Figura 6. Desviación de índice EVI para el área de estudio. La línea de ajuste PMA-EVI se corresponde al cuantil 75.

Tomado de Beget *et al.* 2014.

En la Figura 7a se muestra un mapa de las anomalías o desviaciones de EVI en el área de estudio. Las desviaciones positivas de mayor magnitud están asociadas a los oasis de riego, en torno a los ríos Colorado y Neuquén, mostrando coloración verdosa.

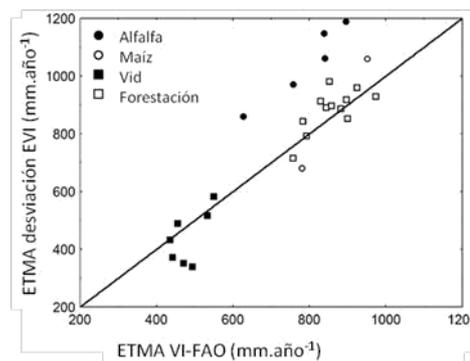
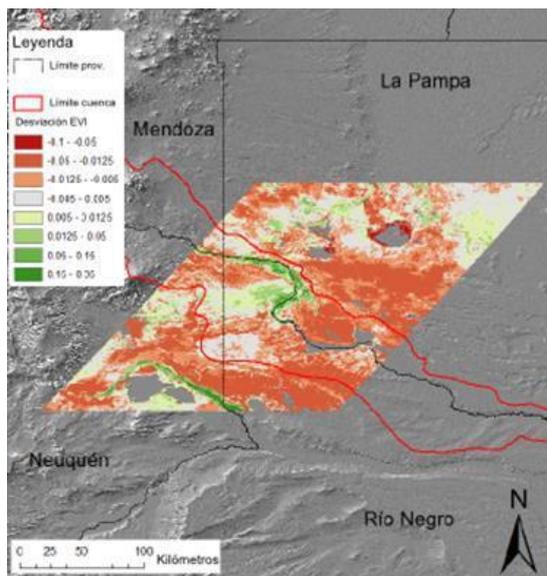


Figura 7 a). Desviación o anomalía del EVI para el área de estudio, b) Comparación entre metodologías de estimación de ETMA. Tomado de Beget *et al.* 2014.

La aplicación de la metodología resultó satisfactoria, ya que los valores estimados de ETMA estuvieron estrechamente relacionados con aquellas derivadas del método FAO56 en aquellos sitios seleccionados de cultivos de maíz, vid, forestación y alfalfa (Figura 7b).

Escala de lote

Las distintas metodologías usadas estimaron el PAI acorde al modelo usado CSDM por Duveiller *et al.* (2011) con una precisión aceptable (Figura 8a). Este modelo permite de simular con continuidad el PAI del sistema PASTIS57. Las fotografías a 57,5° presentaron mayor error que las hemisféricas con respecto a PASTIS57. Atribuimos ello a errores inherentes a la clasificación de las fotografías.

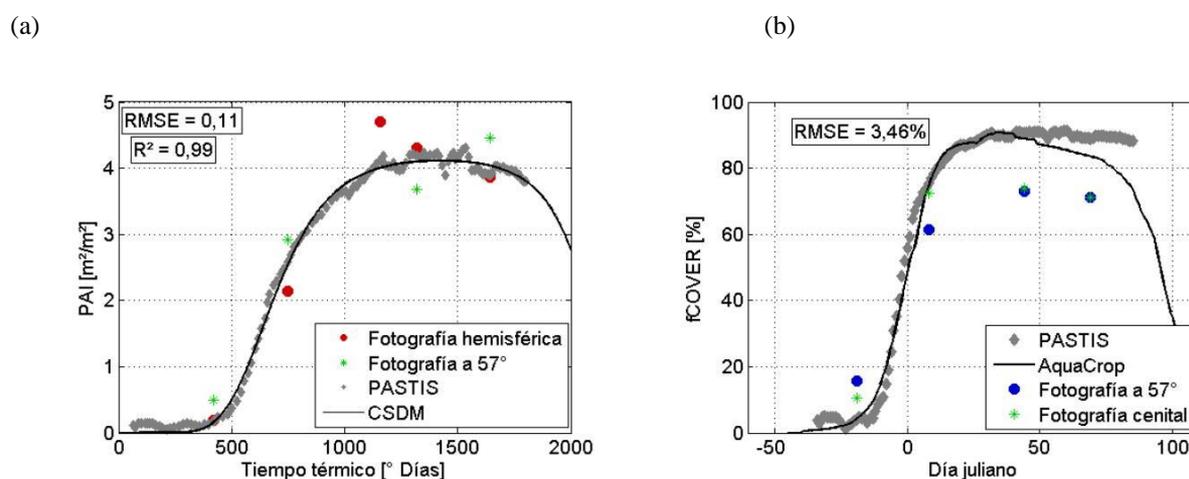


Figura 8. PAI (a) y fCover (b) estimadas a partir de los diferentes métodos y simuladas por los modelos. Tomada de Lambert *et al.* 2014.

Los datos de fCover obtenidos con los sensores de terreno fueron utilizados para calibrar el modelo AQUACROP (Figura 8b). La evaluación del modelo resultó en un RMSE de 3,46%. Durante el ciclo, el cultivo fue regado con 1000 mm (5 riegos de 200 mm). El modelo AQUACROP demostró que dicha irrigación y bajo las condiciones de suelo limonoso-arenoso, gran parte del agua se ha perdido por drenaje. El modelo simuló una irrigación óptima equivalente a casi la mitad del caudal regado actualmente (Tabla 1), aplicado con mayor frecuencia y obteniendo un rendimiento similar.

Tabla 1. Resultados de las simulaciones con AQUACROP, con datos de irrigación real y óptima (Fuente: Lambert *et al.* 2014).

	Irrigación real	Irrigación -óptima
Irrigación (mm)	1000	574
Drenaje (mm)	553	47
Rendimiento (tn.ha ⁻¹)	12,64	13,05

CONCLUSIÓN

En las últimas décadas, el uso y la cobertura de la tierra han cambiado significativamente como resultado de la expansión de la agricultura y la actividad petrolera. Este trabajo utiliza herramientas efectivas para la recolección, procesamiento y despliegue de información de carácter ambiental, y específicamente para el monitoreo de los recursos naturales a través del tiempo.

A partir de las imágenes de SRTM, se cuantificaron algunos parámetros que describen el terreno de la cuenca, siendo la pendiente y orientación los primeros derivados del MDE. Las subcuencas bajo estudio presentan diferencias (elevación, tamaño, pendiente y orientación) en sus áreas de aporte, que se refleja en la permanencia de la cobertura de nieve y por consiguiente en el comportamiento hidrológico.

En cuencas de grandes extensiones, como la cuenca del río Colorado, donde además se suma la inaccesibilidad para la toma de datos sobre todo a fines del invierno y en primavera, la información derivada de sensores remotos es la única herramienta disponible para el seguimiento de la cobertura de nieve. Existe alta variabilidad interanual e intra-estacional de cobertura de nieve en la cuenca alta del río Colorado. Con mayor cantidad de años analizados, complementados con información hidrológica y meteorológica se podrían generar pronósticos de derrame y tendencias sobre cobertura de nieve en la cuenca activa del río Colorado. Se plantea la necesidad de ampliar y mejorar esta investigación, incluyendo datos sobre equivalentes de agua nieve y espesor de nieve, que puedan transformarse en volumen de agua, y otros datos como temperatura, radiación solar, precipitación. Este modelo constituye una herramienta sencilla y práctica para el seguimiento espacial y temporal de la cobertura de nieve en tiempo real, que si bien no tiene en cuenta el espesor de nieve y densidad, la cobertura cuantificada por el modelo está asociada al derrame anual del río, sirviendo de base para la planificación y manejo integral del recurso hídrico.

La metodología de estimación de la ETMA propuesta constituye una herramienta muy útil a escala regional y en los casos en que se cuenta con limitada información de terreno. El método de las desviaciones espaciales del índice de vegetación permite cuantificar la ETMA y asociar aquellas desviaciones positivas con el consumo de agua freática o de riego, y las negativas con las pérdidas de agua por escorrentía superficial, evaporación directa o drenaje profundo.

El modelo de cultivo AQUACROP resultó una herramienta muy valiosa a la hora de estudiar el uso del agua por el cultivo de maíz. La asimilación de los datos tomados por los sensores remotos de terreno permitió la calibración del modelo, obteniendo resultados más precisos. La planificación del riego, realizando aplicaciones acorde a la demanda del cultivo, resultaría en un aumento en la eficiencia de irrigación, debido a una menor pérdida por drenaje. Ante un escenario de aumento en la superficie agrícola a regar y de variabilidad en la disponibilidad de agua, la modelización del crecimiento de los cultivos es una herramienta a incorporar por agricultores y gestores para un uso sustentable del agua a escala de cuenca.

Resulta importante socializar, involucrar y concientizar a partir de este tipo de estudios a las instituciones político-administrativas dentro de los municipios. En este sentido proponemos el seguimiento de la expansión agrícola y petrolera, la planificación de la urbanización y al uso eficiente del agua que los sectores antes mencionados utilizan, estableciendo mecanismos de control en toda la cuenca.

REFERENCIAS

- Abrahamo, R., Causapé, J., García-Garizábal, I., Merchán, D. 2011. Implementing irrigation: Water balances and irrigation quality in the Lerma basin (Spain). *Agricultural Water Management* 102: 97-104.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper* 56.
- Allen, R. G., Tasumi M., Morse A., Trezza, R. 2005. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. *Irrigation and Drainage Systems* 19: 251-268.
- Ault, T. W., K.P. Czajkowski, T. Benko, J. Coss, J. Struble, A. Spongberg, M. Templin y C. Gross. 2006. Validation of the MODIS Snow Product and Cloud Mask Using Student and NWS Cooperative Station Observations in the Lower Great Lakes Region, *Remote Sensing of Environment*, 105(4):341-353.
- Aumassanne, C; Oricchio, PO; Beget, ME; Di Bella, C. 2015. Seguimiento satelital de la cobertura de nieve en la cuenca del Río Colorado, Argentina. XXV Congreso Nacional del Agua. Agua como política de estado. Paraná, Argentina Editado por Asociación internacional de hidrogeólogos. ISBN 978-987-27407-4-0.
- Aumassanne, C. M., Gaspari, F. J., Oricchio, P., Beget, M. E., Di Bella, C. M. 2016. Caracterización de la cuenca del río Colorado a partir de un modelo digital de elevación. XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Ordenamiento territorial: un desafío para la Ciencia del Suelo. Univ. Nacional de Río Cuarto, Facultad de Agronomía y Veterinaria. Del 27 de Junio al 1 de Julio de 2016.
- Baret, F., Lecerf, R., Mottus, M. and Rautinaen, M., 2010a. PASTIS57: Description of the system, processing of the measurements and first results, *EMMAH, INRA, Avignon*.
- Baret, F., de Solan, B., Lopez-Lozano, R., Ma, K. y Weiss, M. 2010b. GAI estimates of rowcrops from downward looking digital photos taken perpendicular to rows at 57.5°zenith angle: Theoretical considerations based on 3D architecture models and application to wheat crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(11), 1393–1401.
- Bastiaanssen, W. G. M., Noordman, E. J. M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B. P., Allen, R. G. 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131: 85-93.
- Baumgartner, M. F., Seidel, K., Martinec, J. 1987. Towards snowmelt runoff forecast based on multisensor remote sensing information. *IEEE Trans, on Geoscience and Remote Sensing GE-2S*, 746-75.
- Beget, M.E., Contreras, S., Aumassanne, C., Fontanella, D., Sartor, P., Di Bella, C. 2014. Estimación de la evapotranspiración anual en la cuenca del Río Colorado a partir de sensores remotos. Reunión Binacional Uruguay-Argentina de Agrometeorología y XV Reunión Argentina de Agrometeorología. Piriápolis, Uruguay. Marta Vinocur, Roberto Seiler Editores, UniRio Editora pags 133-134.
- Cartes, M.A. 2009. Pronóstico de volúmenes de deshielos mediante redes neuronales recurrentes e imágenes satelitales MODIS. Tesis Ms. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento De Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago de Chile.
- Cea, C., Cristóbal, J., Pons, X. 2007. Determinación de la superficie nival del Pirineo Catalán mediante imágenes Landsat y MODIS. En 7ª Semana de Geomática. Barcelona.
- COIRCO (Comité Interjurisdiccional del Río Colorado). 2013. Programa Integral de Calidad de Aguas del Río Colorado – Calidad del Medio Acuático. Informe Técnico. Comité Interjurisdiccional del Río Colorado, Secretaría de Energía de la Nación, Grupo Interempresario. Disponible en: www.coirco.com.ar
- Contreras, S., Jobbágy, E. G., Villagra, P. E., Nosetto M. D., Puigdefábregas, J. 2011. Remote sensing estimates of supplementary water consumption by arid ecosystems of central Argentina. *Journal of Hydrology* 397: 10-22.
- Contreras, S., Hunink, J., Droggers, P., Baille, A., 2014. Building a Watershed Information System for the Campo de Cartagena basin integrating hydrological modeling and remote sensing. *FutureWater Internal Report num. 125*. Cartagena.

- Dahri, Z. H., Ahmad, B., Leach, J. H., Ahmad, S. 2011. Satellite-Based Snowcover Distribution and Associated Snowmelt Runoff Modeling in Swat River Basin of Pakistan. En Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences, 48 (1): 19–32.
- Duveiller, G., Baret, F., and Defourny, P. 2011. Crop specific area index retrieval from MODIS data at regional scale by controlling pixel-target adequacy. Remote Sensing of Environment, 115(10), 2686–2701
- Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V. 2001. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms. Disponible en: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod10.pdf
- Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V.V. 2006. MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500 m Grid V005, Updated Daily. National Snow and Ice Data Center.
- Herms, I., Jorge, J. 2012. “Variación anual e interanual del manto nivoso en el Port del Compte-Serra del Cadí a partir de imágenes MODIS”. XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Madrid.
- Immerzeel, W. W., Gaur, A., Zwart, S. J. 2008. Integrating remote sensing and a process-based hydrological model to evaluate water use and productivity in a south Indian catchment. Agricultural Water Management 95: 11-24.
- Jobbágy, E. G., Noretto, M. D., Santoni, C., Baldi, G. 2008. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco- Pampeana. Ecología Austral 18: 305-322.
- Jobbágy, E. G. 2011. Servicios hídricos de los ecosistemas y su relación con el uso de la tierra en la llanura Chaco - Pampeana. En: Valoración de los servicios ecosistémicos: conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. Editores: Laterra Pedro, Jobbágy Esteban, Paruelo, José. Buenos Aires-INTA. 740 p.
- Lambert, M.J., Beget, M.E., Aumassanne, C., Fontanella, D., Sartor, P., Di Bella, C.M. 2014. Modelización del uso del agua por un cultivo de maíz bajo riego a partir de AQUACROP Reunión Binacional Uruguay-Argentina de Agrometeorología y XV Reunión Argentina de Agrometeorología.. Piriápolis, Uruguay,. Marta Vinocur, Roberto Seiler Editores, UniRio Editora pags 115-116.
- Lascano, M. E., Velasco, I. 2007. Estimación de cobertura de nieve en los Andes Centrales con datos NOAA-AVHRR. Cuencas de los ríos Colorado y Neuquén. www.infraestructura.com.ar
- MA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. Ecosystems and Human Well-Being. Our Human Planet. Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington 109 p.
- Martinec, J., Seidel, K., Burkart, U., Baumann, R. 1991. Areal modelling of snow water equivalent based on remote sensing techniques. In XX General Assembly IUGG in Vienna 1991, IAHS-IUFRO Symposium Snow, Hydrology and Forests in High Alpine Areas, pages 121–129. IAHS Publication No. 205.
- Nemani, R.R., Running, S.W., 1989. Testing a theoretical climate-soil-leaf areahydrologic equilibrium of forests using satellite data and ecosystem simulation. Agr. Forest Meteorol. 44, 245–260.
- Noretto, 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.

- Paruelo, J. M., Guerschman, J. P., Piñeiro, G., Jobbágy, E. G., Verón, S. R., Baldi, G., Baeza, S. 2006. Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia* 2: 47-61.
- Salomonson, V. V., Appel, I. 2004. Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index. *Remote Sensing of Environment* 89: 351-360.
- Scanlon, B. R., Jolly, I., Sophocleous, M., Zhang, L. 2007. Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. *Water resources research* 43: 1-18.
- Sánchez, R. M. 2013. Estimación de los requerimientos hídricos de los principales cultivos en el Valle Bonaerense del río Colorado. Informe Técnico N° 40. INTA. 31 p.
- Solano, R., Didan, K., Jacobson, A., Huete, A., 2010. MODIS vegetation indices (MOD13) C5—User's guide. Tucson: The University of Arizona 38 pp.
- Solbrig, O. T. 1999. Observaciones sobre biodiversidad y desarrollo agrícola. En: *Biodiversidad y uso de la Tierra. Conceptos y ejemplos de Latinoamérica*. Editores: Mateucci, S. D., Solbrig, O. T., Morello, J., Halffter, G. Ed. Eudeba. Argentina.
- Reynolds, J. F., Stafford Smith, D. M., Lambin, E. F., Turner II, B. L., Mortimore, M., Butterbury, S. P. J., Dowlatabadi, H., Fernández, R. J. 2007. Global Desertification: Building a science for dryland development *Science* 316: 847-851.
- Tweed, S., Leblanc, M., Cartwright, I., Favreau, G., Leduc, C. 2011. Arid zone groundwater recharge and salinisation processes; an example from the Lake Eyre Basin, Australia. *Journal of Hydrology* 408: 257-275.
- Viglizzo, E. F., Frank, F. C., 2006. Ecological interactions, feedbacks, thresholds and collapses in the Argentine Pampas in response to climate and farming during the last century. *Quaternary International* 158: 122-126.
- Wang, X., H. Xie, and T. Liang. (2008). Evaluation of MODIS snow cover and cloud mask and its applications in northern Xinjiang, China. *Remote Sensing of Environment*, 112(4): 1497-1513.
- Xu, X., Huang, G., Sun, G., Pereira, L. S., Ramos, T. B., Huang, Q., Hao, Y. 2013. Assessing the effects of water table depth on water use, soil salinity and wheat yield: Searching for a target depth for irrigated areas in the upper Yellow River basin. *Agricultural Water Management* 125: 46-60.
- Zhang, X., Liu, Y., Fang, Y., Liu, B., Xia, D. 2012. Modeling and assessing hydrologic processes for historical and potential land-cover change in the Duoyingping watershed, southwest China. *Physics and Chemistry of the Earth* 53-54: 19-29

IFRH 2016

3^{er} ENCUENTRO DE INVESTIGADORES
en Formación en Recursos Hídricos