

# Combinación de información derivada de teledetección y un balance hídrico para la estimación de niveles freáticos

*Gustavo Ferreira<sup>1,2</sup>, Marta Marizza<sup>1</sup>, Emanuel Nocetti<sup>1</sup>, Leticia Rodriguez<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Centro de Estudios Hidro-ambientales, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (UNL) Ciudad Universitaria, CC217, Paraje el Pozo (3000) Santa Fe, Argentina

<sup>2</sup> Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente. Provincia de Santa Fe. Argentina.

Mail de contacto: [cqf@fich1.unl.edu.ar](mailto:cqf@fich1.unl.edu.ar)

---

## RESUMEN

Con el objeto de explorar el uso de distintas variables remotamente sensadas para la cuantificación regional de sistemas subterráneos, se ha utilizado la evapotranspiración ET estimada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) basado en el NDVI y la temperatura de la superficie proporcionada por imágenes NOAA AVHRR, para inferir la evolución temporal de los niveles freáticos en una estación meteorológica de la cuenca del A<sup>o</sup> Cululú, perteneciente a la cuenca del río Salado (Pcia. de Santa Fe).

Para ello se aplicó un balance hídrico mensual y quincenal simplificado, considerando que los procesos de flujo vertical predominan sobre los procesos de flujo superficial, por tratarse de una zona de llanura.

El método planteado es netamente operativo, y sus resultados preliminares (error promedio en la estimación de 6%) alientan la posibilidad de construir mapas secuenciales, convenientemente validados en suficientes puntos, de la profundidad al nivel freático a escala regional.

Palabras clave: sensores remotos, aguas subterráneas, evapotranspiración.

---

## ABSTRACT

In order to explore the use of remotely sensed variables to quantify regional underground systems, has been used ET evapotranspiration estimated by the Argentinean National Agricultural Institute (INTA) based on the NDVI and surface temperature provided by NOAA AVHRR imagery, to infer the temporal evolution of groundwater levels of the Cululú stream catchment, belonging to the Salado River catchment (Province of Santa Fe).

To that aim, a simple water balance was applied considering that vertical flow processes dominate over overland flow processes on a monthly and biweekly at plain areas.

The proposed method is purely operational, and preliminary results (average error in the estimate of 6%) encourage the possibility of building sequential maps, conveniently validated enough points, depth to water table at regional scale.

KEYWORDS: remote sensing, groundwater, evapotranspiration.

---

## Introducción

Las fluctuaciones de los niveles freáticos-NF son el resultado de las tensiones que el ciclo hidrológico y algunas actividades antrópicas ejercen sobre los sistemas de aguas subterráneas, los que se traducen en cambios en el almacenamiento freático (Custodio y Llamas, 1996; Freeze y Cherry, 1979; Kienitz, 1979). Entre los mecanismos que influyen sobre los niveles freáticos, la recarga y la descarga de agua subterránea suelen ser predominantes (Rushton y Ward, 1979), por ende la identificación de áreas de recarga y descarga y la cuantificación de sus respectivas magnitudes

son críticas no sólo para conocer la relación entre los sistemas de aguas superficiales y subterráneas, sino también para una correcta gestión de los recursos hídricos de una zona o cuenca en particular.

La posición de los niveles freáticos en zonas de llanura está en directa relación con los factores climáticos, topográficos y geológicos, el tipo de explotación que se realiza y la presencia o ausencia de canales de drenaje. En este tipo de ambientes los movimientos horizontales de agua son poco significativos, por lo que predominan los movimientos verticales. Además, el riesgo de anegamiento de zonas

rurales y urbanas está asociado a la presencia de niveles freáticos cercanos a la superficie del terreno (Ferreira y Rodríguez, 2005).

En la llanura central de Argentina, el acuífero freático es de relevancia estratégica desde el punto de vista agropecuario. Es utilizado profusamente como fuente de bebida para el ganado, en una zona eminentemente tambera, y en forma creciente es vinculado a la productividad de los cultivos (Jobbágy y Nossetto, 2009; Nossetto et al., 2009).

A diferencia de otras variables hidrológicas, la densidad espacial de puntos de monitoreo de NF es usualmente escasa como para definir comportamientos regionales y los registros son de corta duración. Además, la heterogeneidad que caracteriza a los medios porosos y la falta de homogeneidad en la toma de datos, hacen que la información que pueda obtenerse de tales series sea de carácter puntual o de alcance local.

Sin embargo, conocer la magnitud de los NF es tan o más necesaria a escala regional que local, con el fin de implementar estrategias eficaces de manejo de recursos hídricos para la producción agrícola-ganadera y la mitigación del riesgo de inundaciones y de sequías. Una opción sería la realización periódica de censos de pozos. Los mapas de niveles (o profundidades) resultantes permiten identificar zonas de recarga/descarga, direcciones y gradientes de flujo, zonas afectadas por bombeo, caracterización de la interacción aguas superficiales/subterráneas, entre otras características. Estos censos se realizan muy esporádicamente y con un fin determinado debido a su alto costo, por lo que no brindan información sobre la evolución histórica del almacenamiento freático, sino sólo estados del sistema en fechas determinadas.

En la provincia de Santa Fe, Argentina, los registros continuos de NF están disponibles en pocos puntos de observación y las series son de corta duración. Por otro lado, sólo se cuenta con cuatro censos regionales de pozos en cuarenta años (CAAAS, 1976; INCYTH, 1986; INA, 2002; Ferreira et al., 2003). Las fluctuaciones temporales de los NF son principalmente atribuidas a la recarga debida a las precipitaciones y a la descarga provocada por la ET, y en menor medida, el drenaje artificial y la percolación profunda. Estos mecanismos tienen importancia relativa diferente en función de la posición del nivel freático respecto de la superficie del suelo. De la observación de la fluctuación de los niveles se desprende que el sistema tiene una gran inercia para descargarse, sin embargo para eventos de

precipitación refleja ascensos más rápidos (Ferreira y Rodríguez, 2005).

La información satelital surge entonces como una alternativa atractiva para superar los inconvenientes del monitoreo de NF antes mencionados, brindando la extensión areal deseada con una periodicidad adecuada. El desafío es entonces vincular información satelital con variables que caractericen el sistema subterráneo (Meijerink, 2007). En comparación con otras componentes del ciclo hidrológico, el agua subterránea y la humedad del suelo han sido las últimas variables en beneficiarse de la tecnología satelital (Becker, 2006).

Las aplicaciones de la teledetección relacionadas a la zona saturada son escasas, y generalmente se orientan a caracterizar los acuíferos a partir del mapeo de otras variables que sí pueden ser sensadas remotamente y correlacionadas con datos de campo. Por ejemplo Groenenveld (2008) estimó la evapotranspiración-ET a escala anual, a partir del índice de Vegetación Normalizado-NDVI, y lo correlacionó con la profundidad del agua subterránea, encontrando que los métodos basados sólo en el NDVI, subestiman la ET por no considerar la evaporación directa del agua subterránea desde la superficie del suelo para el caso de una zona semiárida con vegetación alcalina arbustiva. Ferreira et al. (2012) correlacionaron variables derivadas de imágenes satelitales con la posición del nivel freático a escala mensual, en una estación freatimétrica situada en la llanura central de Argentina, mediante la aplicación de un balance hídrico simplificado.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de aplicar la misma metodología utilizada por Ferreira et al. (2012) a escala quincenal en la misma estación freatimétrica con el fin de analizar cuál es la influencia de la escala temporal en las estimaciones de profundidad al nivel freático realizadas. Además se presentan los resultados preliminares de la aplicación a escala mensual en otras estaciones freatimétricas situadas en la zona de recarga de la cuenca.

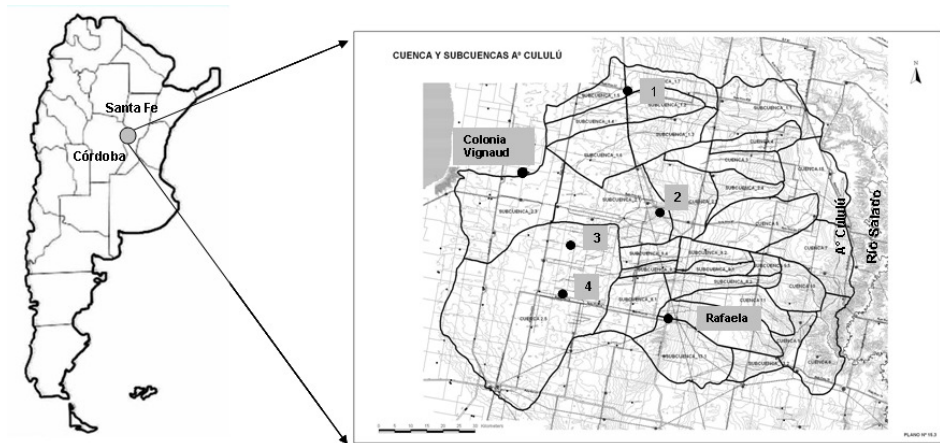
### **Descripción del área de estudio**

El sitio elegido para validar la metodología descrita en la sección siguiente corresponde a la Estación Meteorológica de la Escuela Agrotécnica de Colonia Vignaud (EACV) (Provincia de Córdoba), cuyas coordenadas son 30°50'22" de latitud sur y 61°57'35" de longitud oeste (Figura 1). Se encuentra en la cabecera de la cuenca del Arroyo Cululú, donde prevalece

el movimiento vertical del agua, con escaso escurrimiento superficial, característico de la llanura circundante.

El Arroyo Cululú es afluente por margen derecha del Río Salado. Su cuenca se ubica en el sector central de la provincia de Santa Fe,

aunque una delgada franja de ancho variable correspondiente a las cabeceras, se sitúa al oeste, en la vecina provincia de Córdoba (Figura 1).



**Figura 1.** Área de estudio, Cuenca del Arroyo Cululú (Fuente: INA 2007). Referencias: **Colonia Vignaud** Estación Meteorológica de la Escuela Agrotécnica de Cnia. Vignaud – Pvcia. de Córdoba; **Rafaela** Estación Experimental Agropecuaria Rafaela del INTA. Estaciones pluvio-freatimétricas del Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente – Pvcia. de Santa Fe: **1**-Las Palmeras; **2**-Sunchales; **4**-Vila. Estación freaticimétrica del Centro de Estudios Hidro-ambientales: **3**-Colonia Fidela.

La cuenca, de aproximadamente 9500 km<sup>2</sup>, posee una amplitud máxima de 130 km en sentido Este-Oeste (E-O) y de 100 km en sentido Norte-Sur (N-S). Desde el punto de vista climático, se caracteriza por un clima templado pampeano. El área está inserta entre las isotermas medias anuales de 18 y 19°C. La precipitación media anual es cercana a los 1000 mm con un leve gradiente decreciente en sentido E-O (serie 1971-2000). La distribución de precipitaciones se concentra en el semestre noviembre-abril con un 75 % del total anual. Los suelos de la zona pertenecen a asociaciones de Argiudoles. La geomorfología del área corresponde a la parte sur de la denominada faja de cañadas paralelas (Iriondo, 1987). La capa más superficial del perfil litológico está constituida por sedimentos loésicos, en los cuales se ubica el acuífero freático. El flujo subterráneo regional es en dirección predominantemente Oeste-Este (Ferreira y otros, 2003), teniendo como nivel de base el río Salado.

En cuanto a la hidrografía, la red de drenaje tiene dirección O-E, en tanto que el Arroyo Cululú tiene dirección N-S. La red de drenaje natural es fuertemente asimétrica, de 210 km de longitud, que se completa con una extensa red de canales artificiales de más de 1000 km. Los inicios de su construcción se sitúan en la década del 1930. Esta red ha sido ampliada a lo largo de los años con redes de drenaje menores o locales (DPOH-FICH, 1995).

Para el presente trabajo se emplearon datos diarios de temperaturas extremas, precipitaciones y profundidad del NF de la estación EACV para la serie enero 2005-marzo 2009.

Asimismo se utilizaron mapas de evapotranspiración real ETR (aquí denominada ET remota) suministrados por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) para el intervalo temporal correspondiente al mismo periodo, que cubren el área de estudio. Los mapas tienen una resolución de 100 ha donde cada píxel representa el valor de ET remota máxima en un intervalo de 7 ó 10 días,

expresado en mm/mes (<http://www.sepa.inta.gob.ar/>; Oricchio, 2010). Los mapas de ET remota son el resultado de la aplicación del algoritmo desarrollado por Di Bella et al. (2000), que se obtiene a partir de una serie de rutinas automáticas de procesamiento de mapas diarios del NDVI y la temperatura de superficie (Ts) obtenidas de imágenes NOAA AVHRR, válido solamente para los meses de primavera y verano. Uno de los sitios validados por el autor mencionado es la Estación Experimental Agropecuaria Rafaela (EEA Rafaela), que pertenece al INTA (ver Figura 1). Por tal razón se consideró que la ET remota estimada por Di Bella, et al. (2000) es representativa del área de estudio.

En la Tabla 1 se sintetizan los valores para los años hidrológicos completos (en negrita) de la serie estudiada. La temperatura media anual (T) y la precipitación anual (P) son valores observados en la estación. La evapotranspiración real (ETR) es el valor acumulado obtenido de los mapas del INTA.

**Tabla 1.** Valores característicos de la serie

Periodo/Año Hidrológico	P (mm)	ETR (mm)	T °C	Año
Ene/2005 Ago/2005	387	543	19.1	-
<b>2005/2006</b>	<b>868</b>	<b>940</b>	<b>19.6</b>	<b>N</b>
<b>2006/2007</b>	<b>1285</b>	<b>934</b>	<b>19.0</b>	<b>H</b>
<b>2007/2008</b>	<b>708</b>	<b>1029</b>	<b>19.7</b>	<b>S</b>
Set/2008 Mar/2009	280	776	22.6	-

Referencias: **N**: año normal, **H**: año húmedo, **S**: año seco.

## Metodología

### Procedimiento de cálculo

La metodología a escala mensual consta de los siguientes pasos:

- 1) Obtención de la ET remota a partir de un conjunto de mapas para el pixel que contiene la EACV; acumulando adecuadamente para obtener el valor mensual.
- 2) Aplicación de un balance hídrico simplificado utilizando ET remota para meses cálidos;
- 3) Obtención de la recta de regresión entre el resultado de 2) y la variación del nivel freático medio mensual observado;
- 4) Estimación de la ET remota para meses invernales;

5) Aplicación del balance en conjunción con la recta de regresión de 3) para reproducir la evolución temporal de los niveles observados en el sitio de estudio para todo el período de análisis.

El balance hídrico a escala mensual puede expresarse según la ecuación 1:

$$\pm \Delta L = P - ET \text{ remota} \quad (1)$$

donde:

P = precipitación mensual (mm)

ET remota = evapotranspiración real (mm)

$\Delta L$  = cambio en el almacenamiento de agua subterránea (mm)

Si  $P > ET$ , es una situación de exceso hídrico, implica un incremento de agua almacenada en la zona de aireación y eventualmente incrementos del NF por recarga. Si  $P < ET$ , indica que las salidas en su conjunto son mayores que P, dando lugar a una disminución de la humedad del suelo y una potencial ausencia de recarga, lo que llevaría a una disminución de los NF por efecto del escurrimiento regional. Se debe destacar que ET depende de la disponibilidad de agua y de energía, además del tipo, estado de desarrollo y profundidad radicular de la vegetación.

Este procedimiento además, se replicó con paso quincenal, con el objeto de analizar la influencia de la escala temporal en los niveles freáticos estimados.

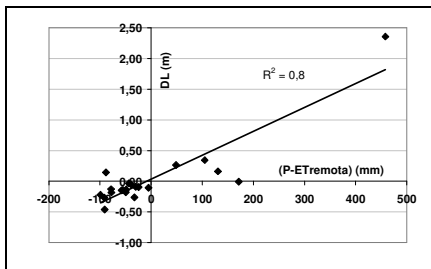
## Resultados

La Figura 2 muestra la correlación entre la variación del nivel freático medio mensual observado (DL, expresado en m) y  $\Delta L$  obtenido con el balance. El valor de DL se obtuvo a partir de mediciones freatigráficas. Para los meses de primavera-verano del período analizado comprendido entre enero de 2005 y marzo de 2009, el coeficiente de correlación lineal resultó  $R = 0,89$  y la recta ajustada (ecuación 2):

$$DL(m) = 3.9 \cdot 10^{-3} \frac{m}{mm} \cdot [P - ET_{remota}]_{mm} + 3.5 \cdot 10^{-2} m \quad (2)$$

Para estimar ET remota para los meses invernales, se utilizaron resultados de estudios previos realizados por el grupo de trabajo, con los que se construyó un diagrama adimensional para el cálculo de evapotranspiración de referencia  $ET_o$  promedio mensual (Ferreira et al., 2012), asumiendo que la distribución adimensional de la ET remota a lo largo de un

año medio tiene igual distribución adimensional que la ETO.



**Figura 2.** Correlación entre P-ETremota y DL a escala mensual

El NF para un mes determinado, se calculó partiendo del NF del mes anterior, sumando o restando según corresponda, el DL obtenido de la ecuación (2). El cálculo se inició considerando conocido el NF correspondiente al primer mes del periodo analizado.

La Figura 3 muestra el resultado de la comparación entre valores estimados y observados de NF medio mensual en la estación EACV para todo el periodo de análisis.

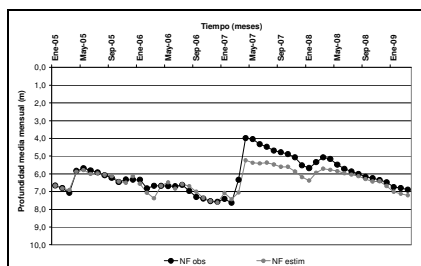
La máxima diferencia entre los niveles medidos y estimados mediante el balance mensual fue de 1,32 m y la mínima de 0 m, con un error promedio de 0,36 m. Cabe destacar que la profundidad media mensual del nivel freático para el periodo de análisis fluctuó entre 3,98 m y 7,63 m.

La mayor diferencia encontrada corresponde al mes de abril de 2007. Como consecuencia de un evento extremo de precipitaciones (560 mm en un mes -marzo 2007-), los NF en la región donde se encuentra la estación EACV experimentaron un ascenso mensual récord para la zona de 3 m (Ferreira et al., 2009).

La metodología aplicada refleja la ocurrencia del ascenso, aunque no ajusta adecuadamente la magnitud del mismo debido a lo extraordinario del evento. Esa diferencia se va disipando paulatinamente en los meses siguientes de cálculo hasta que prácticamente desaparece un año después, en mayo de 2008.

A partir de este mes se obtiene un ajuste muy bueno entre niveles estimados y observados.

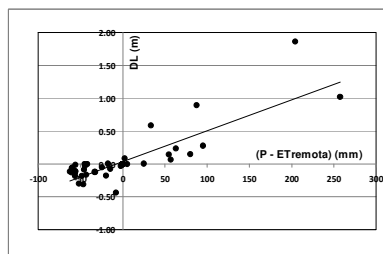
La metodología descrita se aplicó además, a escala quincenal. La correlación entre la variación del nivel freático medio quincenal observado (DL, expresado en m) y ΔL obtenido con el balance se muestra en la Figura 4.



**Figura 3.** Comparación entre valores de NF medio mensual calculados y observados entre Ene2005 y Ene2009.

La recta ajustada corresponde a la ecuación 3, con un coeficiente de correlación lineal de  $R=0,84$ .

$$DL(m) = 4.7 \cdot 10^{-3} \frac{m}{mm} * [P - ET_{remota}] mm + 3.5 \cdot 10^{-2} m \quad (3)$$



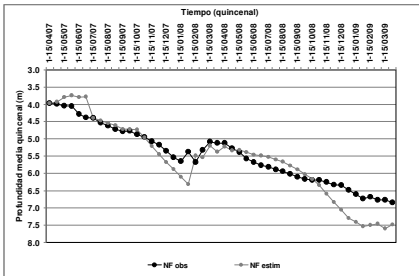
**Figura 4.** Correlación entre P-ETremota y DL a escala quincenal.

Considerando que el evento pluviométrico extremo de marzo de 2007 supera ampliamente los valores medios normales, y que la respuesta del sistema a la recarga producida se registra en los niveles freáticos del mes siguiente, se establece como valor inicial para la estimación del NF, el correspondiente al de la primera quincena de abril de 2007.

La Figura 5 muestra el resultado de la comparación entre los valores estimados y los valores medios quincenales observados de NF en la estación EACV para todo el periodo indicado, es decir abril 2007 a enero 2009.

Del análisis de los resultados, se observa que la máxima diferencia entre los niveles medidos y estimados mediante el balance quincenal fue de 0,94 m y la mínima de 0 m, con un error promedio de 0,32 m. Cabe destacar que la profundidad media quincenal del nivel

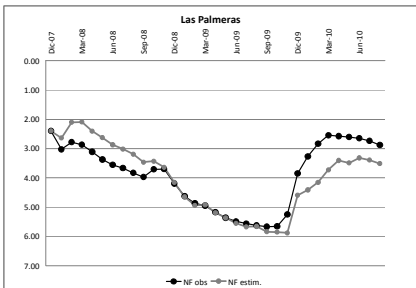
freático para el período de análisis fluctuó entre 3,97 m y 6,85 m.



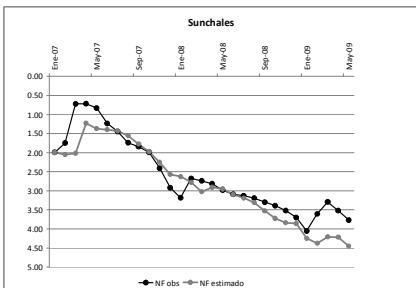
**Figura 5.** Comparación de valores de NF medio quincenal calculados y observados entre 1ra. quincena Abril2007 y 2da. quincena Ene2009

Con el fin de analizar la validez de la metodología, se replicó la misma en cuatro sitios de la cuenca, localizados en el área de recarga (Figura 1).

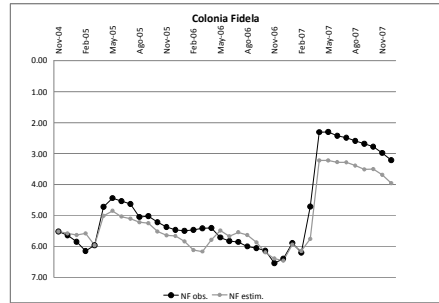
En los sitios: 1-Las Palmeras; 2-Sunchales; 3-Colonia Fidela y 4-Vila, se dispone de información en diferentes períodos de tiempo. Los resultados preliminares a escala mensual se muestran en las Figuras 6 á 9.



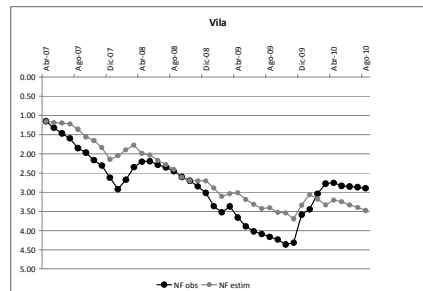
**Figura 6.** Comparación de NF observados y simulados en Las Palmeras (Dic2007 - Ago2010).



**Figura 7.** Comparación de NF observados y simulados en Sunchales (Ene2007 - May2009).



**Figura 8.** Comparación de NF observados y simulados en Cnia. Fidela (Nov2004 - Dic2007).



**Figura 9.** Comparación de NF observados y simulados en Vila (Abr2007 - Ago2010).

## Conclusiones

Para los sitios de estudio se verificó que las fluctuaciones temporales más notables de los niveles freáticos observados son aquellas referidas a la recarga debida a las precipitaciones y a la descarga provocada por la evapotranspiración real hasta una profundidad cercana a los 7 m.

Para la EACV, en el período analizado, las fluctuaciones de los NF variaron aproximadamente entre 4 y 8 m. Teniendo en cuenta las simplificaciones establecidas en la metodología, la estimación de los niveles freáticos ha sido satisfactoria, con un error promedio correspondiente al 6 % relativo a la profundidad media mensual y quincenal, considerando además que se vinculan datos a nivel puntual (pluviómetro y treatímetro) con información satelital a nivel píxel de 100 ha.

La recta de regresión encontrada para las dos escalas temporales varía sólo en su pendiente. Cada una de estas se aplica indistintamente para todo el rango de profundidad observado, sin considerar el diferente comportamiento que presentan las

variaciones de los niveles freáticos con la profundidad.

Asimismo, la recta se ajusta para la información correspondiente a los meses cálidos y se aplica para estimar los niveles freáticos en los meses fríos. Si bien se introducen errores, para la escala de trabajo se consideran aceptables.

La metodología se considera acertada para la zona de recarga de la cuenca en estudio, ya que los resultados obtenidos muestran que es posible -en términos medios- despreciar el flujo superficial.

La aplicación de esta simple metodología muestra que la utilización de información remota combinada con un modelo sencillo de balance hídrico tiene un gran potencial en el análisis de sistemas subterráneos, minimizando la realización de los costosos levantamientos de campo de escala regional si se aplica a un número significativo de sitios de validación.

El método planteado es netamente operativo y se está aplicando en otros puntos de cuenca para reducir las incertidumbres a escala espacial. Los resultados preliminares para otros cuatro sitios presentan un ajuste aceptable y alientan la posibilidad, a futuro, de construir mapas secuenciales, convenientemente validados en suficientes puntos, de la profundidad del nivel freático a escala regional.

## Agradecimientos

Especial agradecimiento al personal del INTA Castelar de la Provincia de Buenos Aires, particularmente a Patricio Oricchio; a la Escuela Agrotécnica de Colonia Vignaud y al Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente de la Provincia de Santa Fe por el aporte de datos meteorológicos y freáticos.

Los estudios desarrollados para la elaboración del presente trabajo han sido posibles, en parte, gracias a los fondos provenientes de la Acción de Coordinación VIAGUA (410AC0399) del Programa CYTED (Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo) de España y del programa CAI+D de la Universidad Nacional del Litoral de Argentina.

## Referencias

Becker, M. 2006. Potential for Satellite Remote Sensing of Ground Water. *GroundWater* 44 (2): 306–318.

CAAAS - Convenio Argentino Alemán de Aguas Subterráneas. 1976. Recursos de Agua Subterránea y su aprovechamiento en la

Llanura Pampeana y en el Valle del Conlara. Tomo 8. Servicio Geológico de la República Federal de Alemania.

Custodio, E. & M. Llamas. 1996. *Hidrología Subterránea*. Ed. Omega. Barcelona. España. T1, 333-335.

Di Bella, C., C. Rebella, & M. Paruelo. 2000. Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. INTA, IFEVA. Buenos Aires, Argentina.

DPOH-FICH (Dirección Provincial de Obras Hidráulicas – Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas) (1995) Préstamo de Protección contra las Inundaciones. Canalización y Obras de Arte Cuenca del Arroyo Cululú. Anexo Específico. Santa Fe. Argentina

Ferreira, G., G. Farías & L. Rodríguez. 2003. Comportamiento de Niveles Freáticos en Zonas Rurales: Cuenca Inferior del Río Salado, Santa Fe, *Anales del 3er. Congreso Argentino de Hidrogeología y 1er. Seminario Hispano-latinoamericano sobre temas actuales de la hidrología subterránea*. Rosario. Argentina. UNR Editora. T1, 255-262.

Ferreira, G. & L. Rodríguez. 2005. Uso de niveles freáticos para la caracterización de la recarga/descarga. *XX Congreso Nacional del Agua*. Mendoza. Argentina

Ferreira, G., L. Rodríguez, C. Vionnet, J. Choque & P. Marano. 2009. Avances en el conocimiento del acuífero libre de la cuenca del Arroyo Cululú (Provincia de Santa Fe), Argentina. *VI Congreso Argentino de Hidrogeología y IV Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea*. La Pampa, Argentina.

Ferreira G., Marizza M., Rodríguez L. (2012) "Utilización de información procedente de teledetección para el análisis de sistemas subterráneos". *Revista AQUA-LAC*. Vol 4, Num 1. pp. 9 - 18. Disponible en: <http://www.unesco.org/uy/phi/aqualac/es/numeros-de-agua-lac/septimo-numero-vol-4-num-1.html> (última visita 12/06/2013).

Freeze, R. & J. Cherry. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall Inc. New Jersey.

Groeneveld, D. (2008) Remotely-sensed groundwater evapotranspiration from alkali scrub affected by declining water table. *Journal of Hydrology* 358, pp. 294–303. ISSN: 0022 1694. Available at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

INA (Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Litoral). 2002. Influencia de los

- Acueductos proyectados en la Provincia de Santa Fe sobre los niveles freáticos. Convenio INA/DPOH-Prov. de Santa Fe. Argentina.
- INCYTH (Instituto Nacional del Ciencias y Técnicas Hídricas). 1986. Caracterización Hidrológica de la Cuenca del Río Salado. Centro Regional Litoral. Santa Fe. Argentina.
- Iriondo, M. 1987. Geomorfología y Cuaternario de la Provincia de Santa Fe (Argentina). Departamento de Hidrología General y Aplicada. Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe. Argentina.
- Kienitz, G. 1979. Hydrological Regime as Influenced by Drainage of Wetlands. IHP. Unesco. Paris. France.
- Jobbágy, E. & M. Noretto. 2009. Napas freáticas: pautas para comprender y manejar su impacto en la producción. XVII Congreso Nacional de AAPRESID. Argentina.
- Meijerink, M. 2007 Remote Sensing Applications to Groundwater. IHP-VI, Series on Groundwater No.16. Unesco.
- Noretto, M., E. Jobbágy, G. Sznaider & R. Jackson. 2009. Reciprocal influence between crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. Field Crop Research 113: 138-148. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.fcr.2009.04.016.
- Oricchio, P., 2010. Comunicación Personal.
- Rushton, K., & C. Ward. 1979. "The Estimation of Groundwater Recharge" J. Hydrology 41: 345-361.