

NAPA FREÁTICA: DINÁMICA, VARIABLES DE CONTROL Y CONTENIDO DE NITRATOS EN SUELOS DE PAMPA ARENOSA

GABRIEL G VÁZQUEZ AMABLE^{*1-2}; NICOLAS BOSCH¹; ALEJANDRA P RICCA³; DANTE E ROJAS³; MARÍA L ORTIZ DE ZÁRATE¹; JOAQUÍN LASCOMBES¹; MARÍA F FEIGUÍN¹ & DIEGO CRISTOS³

Recibido: 21-07-16

Recibido con revisiones: 26-12-16

Aceptado: 04-01-17

RESUMEN

A fin de estudiar la dinámica y control de la napa freática y el contenido de nitratos, en lotes agrícolas del Oeste bonaerense, se analizaron registros de ocho años de nivel freático y muestras de agua extraídas durante dos años. El modelo hidrológico DRAINMOD fue calibrado y validado en base a registros de freatómetros instalados en 12 lotes agrícolas, ubicados en un radio de 100 km. Las curvas de retención hídrica requeridas por el modelo fueron estimadas mediante funciones de pedotransferencia. Un segundo conjunto de freatómetros fue instalado en noviembre del 2011 para el muestreo mensual y análisis de la evolución del contenido de nitratos bajo diferentes cultivos en posiciones de loma, media-loma y bajo, durante dos campañas agrícolas. DRAINMOD fue evaluado para ser utilizado en la estimación del impacto de la variación climática interanual, uso de tierras y estructuras de control sobre la profundidad de la napa. En este aspecto, se analizaron estrategias de control del nivel freático, combinando drenes subterráneos con el nivel de consumo de rotaciones agrícolas y pasturas en toposecuencias. Considerando la totalidad de las observaciones, en calibración, el modelo predijo la profundidad de la napa con un error medio de 25 cm y una eficiencia (Nash-Sutcliffe) promedio de 0,88. Mientras que en validación el error medio fue de 39 cm y la eficiencia media fue de 0,73. Respecto a la concentración de N-NO₃ en agua se observó un efecto significativo de la posición en el paisaje y de la profundidad de la napa. El 52% de las muestras superaron los 10 mg L⁻¹, independientemente de la dosis de N aplicado como fertilizantes, y mayormente relacionado a las excesivas precipitaciones del invierno del año 2012. Esto implicaría que una proporción significativa de nitratos lixiviados, provendría del proceso natural de mineralización del carbono orgánica del suelo.

Palabras clave. Drainmod, nitrógeno, modelo hidrológico, drenaje subterráneo.

GROUNDWATER TABLE DYNAMICS, CONTROL VARIABLES AND NITRATE LOADS IN AGRICULTURAL SOILS OF WESTERN PAMPAS

ABSTRACT

Groundwater table depth and nitrate (NO₃-N) concentration were studied in agricultural fields, in western Buenos Aires Province, Argentina. DRAINMOD, a process-based and field-scale hydrological model was calibrated and validated for studying groundwater table depth control strategies, at 12 farms located within a radius of 100 km, using records from 2004 to 2012. Pedotransfer functions were evaluated and applied to setup model inputs. A second set of observation wells were installed in 2011 to take monthly groundwater samples for studying NO₃-N concentration under different crops, at three landscape positions (upper, middle and lower hill) at seven farms. Model performance was evaluated in order to be used as a decision support system to estimate the impact of potential management, land use and climate scenarios, on groundwater table dynamics. Likewise, groundwater control strategies were analyzed for agricultural sandy soils of Western Pampa, combining tile drains, crop rotations and pastures, on the landscape. All observations considered, DRAINMOD predicted daily groundwater table depth with an average Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) of 0.88, and an average RMSE of 25 cm. At validation, the model presented an average RMSE of 39 cm and NSE of 0.73. Drainmod was also used to estimate groundwater table changes under different land use changes. As for NO₃-N concentration, a significant effect of the landscape position and water table depth was observed. Considering 10 mg L⁻¹ NO₃-N as a standard limit, 52% of the observations exceeded this value, regardless N fertilization rates and mostly related to unusual precipitations events during winter 2012. Results showed that a significant proportion of leached nitrate would come from the natural process of mineralization of soil organic matter.

Key words. Drainmod, tile drainage, nitrogen, hydrologic model.

1. Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA) - Unidad de Investigación y Desarrollo Sarmiento 1236 5to piso (1041) Buenos Aires Argentina

2. Univ. Nacional de La Plata-Escuela de Bosques. Posgrado en Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas, Diag 113 y 18 S/N (1900) La Plata, Argentina

3. INTA-CIA, Instituto de Tecnología de Alimentos - Castelar, Buenos Aires, Argentina

* Autor de contacto: gvazquez@crea.org.ar

INTRODUCCIÓN

La napa o capa freática es una variable de interés en cuencas rurales. Su cercanía a la superficie puede afectar el desarrollo de los cultivos (Nosseto *et al.*, 2009; Stone and Ekwue, 1993; Brisson *et al.*, 2002), el tráfico de maquinarias (Paul & De Vries, 1979) y la salinidad del suelo (Northey *et al.*, 2005; Jobaggy & Jackson, 2000 y 2007).

Algunos autores han estudiado, en región pampeana, la influencia recíproca entre la vegetación y la napa freática sobre los flujos de descarga y recarga del agua subterránea (Nosseto *et al.*, 2009), siendo aún relevante su estudio para la comprensión de estas interacciones complejas. La variabilidad del nivel freático es un punto importante en el terreno del manejo de sistemas agrícolas (Viglizzo *et al.*, 2009), especialmente en Pampa Arenosa donde el balance precipitación-evapotranspiración está estrechamente relacionado con su fluctuación (Kruse *et al.*, 2001).

Por otro lado, la producción agrícola también puede afectar la dinámica y la calidad del agua de la napa por transporte de nutrientes o agroquímicos (Portella *et al.*, 2006 y 2009; Vázquez Amabile *et al.*, 2014).

Teniendo en cuenta estos aspectos, es importante aumentar el conocimiento local de la dinámica de la napa, su oscilación y contenido de nitratos, como así también analizar estrategias de manejo para uso y control. Contar con herramientas de predicción confiables, que permitan estimar el riesgo de ascensos freáticos es relevante para la toma de decisiones, teniendo en cuenta la sustentabilidad ambiental y económica de los sistemas de producción.

El uso de modelos hidrológicos constituye una valiosa herramienta para estimar el impacto de variaciones climáticas interanuales o de la implementación de prácticas de manejo, en diferentes tipos de suelos, y así prevenir potenciales consecuencias ambientales y económicas. Este tipo de modelos permiten no solamente evaluar el comportamiento local de las variables intervinientes, sino también tecnologías implementadas en otras regiones (Kruse & Zimmermann, 2002). Sin embargo, es importante tener presente que todo modelo matemático, previamente a ser utilizado, debe ser evaluado y validado localmente (Passioura, 1996). Analizar la habilidad de un modelo hidrológico para predecir el comportamiento de la napa freática, estrategias de control y otras variables de interés, en lotes de producción agrícola en región pampeana, sigue siendo un tema de estudio.

Un modelo de interés para ser aplicado en región pampeana, especialmente Pampa Arenosa, es el modelo DRAINMOD (Skaggs, 1980; Youseff *et al.*, 2006), el cual no ha sido aún evaluado en nuestro país. DRAINMOD permite estimar la oscilación de la profundidad de la napa freática, la concentración de N y transporte de sales a escala de potrero, junto a otras variables tales como el rendimiento relativo de cultivos y traficabilidad de la maquinaria. Dicho modelo permite también dimensionar estructuras de drenaje subterráneo, de potencial implementación en lotes agrícolas de nuestro país, como así también el impacto del tipo de uso de suelo (agrícola o ganadero) y de las variaciones anuales de las precipitaciones, sobre la profundidad de la napa. Si bien el uso de drenajes subterráneos para el control de la napa freática no ha sido adoptado para cultivos extensivos en nuestro país, es utilizado desde hace décadas en sistemas agrícolas en los EEUU (USDA, 1987).

Otro aspecto de interés en relación a la evaluación de DRAINMOD, es el potencial acople, propuesto por Skaggs *et al.* (2012), de este modelo con los modelos de cultivo incluidos en DSSAT (Jones *et al.*, 2003), validados en nuestro país por varios autores (Calderini *et al.*, 1994; Travasso & Magrin, 1998).

El presente trabajo está enfocado en el estudio de la dinámica de la napa freática y el contenido de nitratos, en lotes de producción de Pampa Arenosa, en base a tres objetivos específicos: a) Calibrar y validar un modelo de simulación para predecir la oscilación de la profundidad de la napa freática en suelos bajo uso agrícola; b) analizar el impacto de dos estrategias de control de la napa freática: consumo de agua por cultivos y estructuras de drenaje subterráneo; c) analizar la variación del contenido de nitratos en la napa freática a lo largo del año y su relación con el manejo del cultivo y la posición en el paisaje.

En relación a los primeros dos objetivos, se trabajó con el modelo DRAINMOD cuyas predicciones de profundidad de napa fueron contrastadas con observaciones realizadas en un periodo de ocho años. Con respecto al tercer objetivo, se analizó la concentración de nitrógeno como nitrato (N-NO_3) en la napa, en freáticos instalados en posiciones de loma, media loma y bajo, durante dos campañas agrícolas. La relación de este último objetivo con los dos primeros, reside en la importancia de conocer el comportamiento de esta variable a la hora de pensar en estrategias de drenaje, a fin de prevenir impactos negativos por transporte de N en solución a ecosistemas acuáticos.

MATERIALES Y METODOS

Área de Estudio

El estudio se llevó a cabo utilizando registros de dos conjuntos de freatómetros instalados en lotes de producción de los partidos de Rivadavia, Trenque Lauquen, Guaminí, Pehajó y Bolívar, del oeste de la provincia de Buenos Aires (Fig. 1). Los suelos presentes fueron principalmente molisoles, arenosos y profundos, clasificados como Hapludoles. De los doce sitios de estudio, siete correspondieron a suelos Hapludoles énticos (Serie Bolívar), tres a Hapludoles típicos (Serie Piedritas) y dos a Hapludoles Thapto-árgicos (Serie Carlos Salas) (GeoINTA, 2012).

Esta región abarca un área representativa de la "Pampa húmeda", caracterizada por un relieve plano a suavemente ondulado de suelos arenosos y médanos. Este paisaje carece de una red definida de drenaje, de tal modo que el agua procedente de precipitaciones mayormente infiltra recargando el suelo y provocando ascensos de la napa freática, y en menor medida escurre concentrándose en depresiones (bajos y lagunas). Este proceso de recarga del acuífero superficial varía moderadamente entre el invierno y el verano, pero puede cambiar abruptamente en períodos con excesivas precipitaciones, causando encharcamiento, aumento de los cuerpos superficiales de agua, e incluso inundaciones (Aragón *et al.*, 2010; Kruse *et al.*, 2001 y 2006).

El clima de la región es templado con una temperatura media anual de 16 °C y una ETP anual de 1250 mm. La preci-

pitación media anual depende de los períodos considerados, pero para el período 2000-2012, la media anual fue de 950 mm. No obstante, hubo diferencias entre años, con 655 mm en 2005 y un pico de 1350 mm en el 2002. Estas variaciones provocaron ascensos y descensos en los niveles freáticos de los distintos sitios de estudio.

Breve descripción del modelo

DRAINMOD es un modelo unidimensional y físicamente basado desarrollado para describir la hidrología de suelos pobremente y artificialmente drenados. El modelo se basa en el balance de agua del perfil de un suelo pobremente drenado correspondiente a un lote de producción (Skaggs *et al.*, 2012). La tasa de infiltración es calculada a paso diario y sub-diario en base a la ecuación de Green y Ampt (Green & Ampt, 1911). El modelo permite calcular el balance hídrico de un suelo para largas series de registros climáticos y predecir el efecto del drenaje, y prácticas de manejo asociadas, sobre la profundidad de la napa freática, el régimen hídrico del suelo y el rendimiento de los cultivos. A pesar de ser "unidimensional", el modelo contempla el flujo horizontal subterráneo, denominado "downslope seepage", en función del gradiente topográfico.

DRAINMOD requiere datos climáticos de temperatura diaria mínima y máxima, y datos sub-diaris de precipitación y eventualmente evapotranspiración potencial diaria. En cuanto a los datos de entrada de suelo, el modelo requiere la curva de retención hídrica de cada capa de suelo y la conductividad

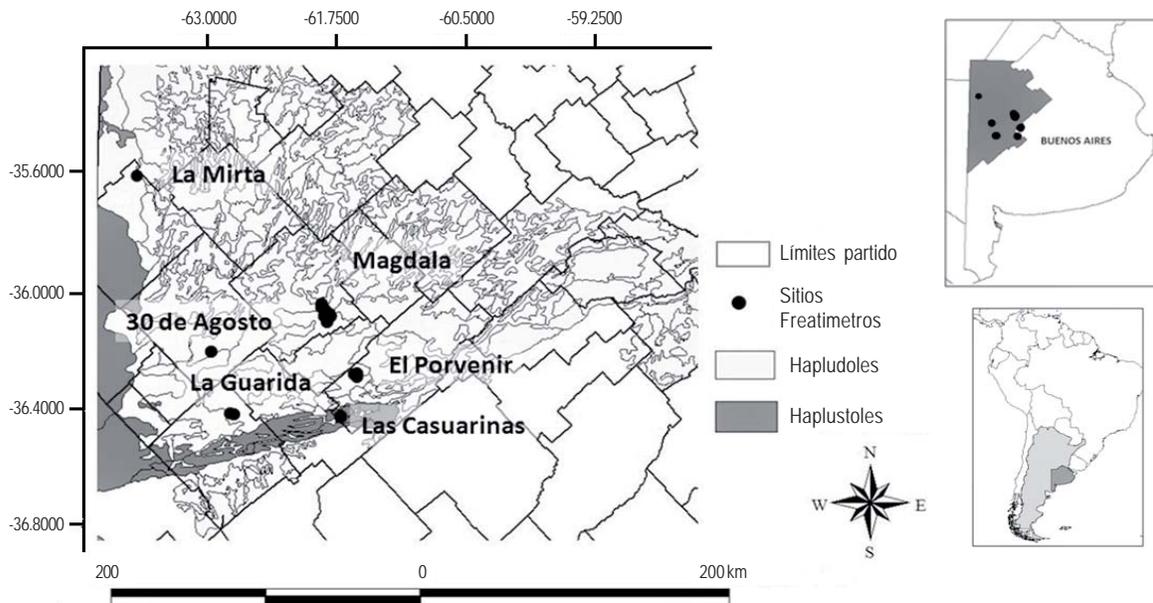


Figura 1. Área de Estudio.

Figure 1. Study Area.

hidráulica saturada (K_{sat}). Estos datos de suelo, pueden estimarse mediante funciones de pedotransferencia en base a la textura del suelo (Salazar *et al.*, 2008) y son utilizados por DRAINMOD para estimar parámetros de infiltración y la relación entre volumen drenable y profundidad de la napa freática.

Como se representa en la Figura 2, DRAINMOD permite calcular el efecto de la profundidad (d) y distancia entre drenes (L) de un sistema de drenaje subsuperficial, sobre la profundidad de la napa y otras variables relacionadas.

Registros utilizados y entradas del modelo

Las predicciones de profundidad de napa fueron contrastadas con observaciones realizadas durante el período 2004-2013, en freáticos ubicados en 12 establecimientos del oeste de Bs As. Dichos registros fueron utilizados en los procesos de calibración y validación y en el análisis de estrategias de control de la napa freática.

Los datos climáticos utilizados provinieron de registros horarios obtenidos con estaciones meteorológicas automáticas localizadas cercana a los freáticos.

La ETP diaria fue calculada por DRAINMOD en base a los inputs de temperatura máxima y mínima diarios para cada sitio, según el método de Thornwaite. Los factores mensuales de ETP del modelo fueron ajustados a 0,9 para los meses de diciembre, enero y febrero, por observarse un mejor ajuste en los meses de verano en los distintos años y en todos los sitios.

Las curvas de retención hídrica y K_{sat} de los distintos horizontes fueron calculados para los distintos suelos aplicando las funciones de pedotransferencia (FPT) propuestas por Saxton & Rawls (2006). Los sitios de estudio y las series suelos correspondientes, se detallan en la Tabla 1.

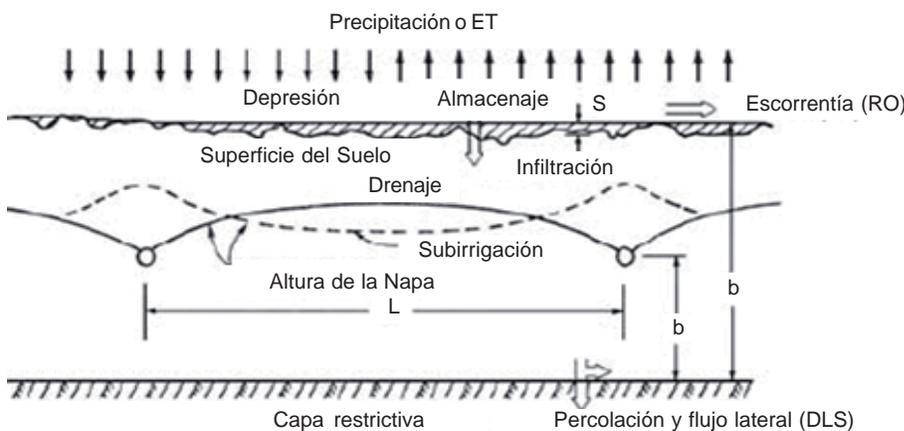


Figura 2. Principales procesos hidrológicos considerados por Drainmod (Skaggs *et al.*, 2012).

Figure 2. Principal hydrologic processes considered by Drainmod (Skaggs *et al.*, 2012).

Tabla 1. Descripción de los suelos presentes en los sitios de observación según posición en el paisaje y descripción de series según GeolNTA (2012).

Table 1. Soil series according to GeolNTA (2012) and landscape position at study sites.

Sitio	Posición en el Paisaje	Subgrupo de suelo	Serie de suelo
El Porvenir	Media-loma	Haplustol éntico	Bolívar
El Porvenir	Bajo	Haplustol típico	Piedritas
La Guarida	Loma	Haplustol éntico	Hd-Dx
La Guarida	Media-loma	Haplustol éntico	Bolívar
Las Casuarinas	Loma	Haplustol éntico	Bolívar
Las Casuarinas	Media-loma	Haplustol éntico	Piedritas
30 de Agosto	Media-loma	Haplustol éntico	Bolívar
La Mirta	Media-loma	Haplustol éntico	Bolívar
Magdala 11c	Media-loma	Haplustol típico	Piedritas
Magdala 13c	Media-loma	Haplustol thapto-árgico	Carlos Salas
Magdala 11 v	Media-loma	Haplustol típico	Piedritas
Magdala 13 v	Media-loma	Haplustol thapto-árgico	Carlos Salas

Sin embargo, previamente al uso de FPT para la estimación de la curva de retención hídrica, se corroboró la eficiencia de las FPT para los suelos del área de estudio. Un conjunto de 173 muestras de suelos arenosos, fueron usadas para analizar el ajuste entre las mediciones de humedad a -33 kPa y -1500 kPa realizadas en laboratorio, y las predicciones de las FPT de Saxton y Rawls (2006), para estos potenciales mátricos.

Calibración y Validación del modelo

DRAINMOD requiere los archivos de entrada de suelo para calcular la relación "Profundidad de la napa-Volumen de drenaje" del perfil completo, denominada WTD-DV (Water Table Depth-Drainage Volume), la cual es utilizada para su calibración. El volumen de drenaje (DV) es el espacio poroso que almacena agua entre capacidad de campo (-33 kPa) y saturación. El volumen de drenaje total del perfil está relacionado con la profundidad de la napa, siendo el mismo igual a cero por debajo del nivel freático, en ausencia total de aire en los macro poros.

Dicha curva puede ser calibrada en forma iterativa, ajustando la relación entre volumen de drenaje y profundidad de napa, a través de comparaciones sucesivas entre las predicciones del modelo y los registros de los pozos de observación de cada sitio.

A fin de estimar la performance del modelo a paso diario, el proceso de calibración y validación se realizó contrastando las salidas "diarias" del modelo con los registros "diarios" de cada sitio. En algunos sitios los niveles freáticos fueron relevados cada 7 días y en otros cada 30 días.

El total de registros fue dividido en dos sub-conjuntos: uno para calibración y otro para la validación del modelo. En los sitios 30 de Agosto, El Porvenir, Las Casuarinas, La Guarida y La Mirta, los primeros años de registros se usaron para calibrar el modelo y los últimos años se reservaron para la validación del modelo calibrado. En el sitio Magdala, debido a que se contaba con dos años de registros (2010-2012) en 6 freáticos, se separaron los registros de tres freáticos para calibrar y el resto para validación.

El contraste de las observaciones con las predicciones del modelo, fue realizado mediante el cálculo de los coeficientes de correlación de Pearson (r), el coeficiente de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970) y la raíz cuadrada del error medio cuadrático (RMSE). El coeficiente de Pearson permite inferir el grado de ajuste de DRAINMOD para reproducir la oscilación temporal de la profundidad de napa, en los períodos de calibración y validación. El coeficiente de Nash-Sutcliffe (R^2_N) permite cuantificar la eficiencia del modelo, estimando el ajuste a la línea 1a1 al confrontar gráficamente los valores observados versus los puntos predichos por el modelo. Este coeficiente varía $-\infty$ y 1. Un valor de $R^2_N = 1$ indicaría una predicción perfecta, resultando en un ajuste perfecto entre las observaciones y los valores predichos. Un valor $R^2_N = 0$, indica

que la media de las observaciones es tan buen predictor como el modelo y, por lo tanto, un valor positivo indicaría que el modelo es un mejor predictor que la simple "media" de los valores observados. Un valor negativo indicaría que la media sería un mejor predictor que el modelo evaluado.

La calibración se realizó para cada sitio ajustando iterativamente la curva WTD-DV, hasta conseguir el máximo valor de R^2_N . Una vez terminado dicho proceso, se procedió a correr el modelo para el período de validación, evaluando así su habilidad de predicción una vez calibrado.

Previamente a la calibración de la curva WTD-DV se ajustaron otros parámetros del modelo, tales como: Profundidad inicial de la napa (W), distancia desde la superficie a la capa impermeable (H), grado (S) y largo (L) de la pendiente.

Determinación de escenarios

Una vez finalizada la validación, el modelo fue utilizado para evaluar el efecto del consumo de la biomasa vegetal y de drenes subterráneos sobre el nivel freático para una serie de 40 años. A tal fin, se evaluaron distintos escenarios de manejo: dos rotaciones agrícolas continuas, con y sin doble cultivo denominadas "rotación 1" (maíz-soja) y "rotación 2" (maíz-trigo/soja 2da); ambas rotaciones con drenajes subterráneos y uso continuo con pasturas sin drenaje.

Para esto último, se configuraron archivos de entrada ".PET", calculando el consumo diario correspondiente a los distintos cultivos, resultante del producto entre el Kc del cultivo en distintos estados fenológicos (Allen *et al.*, 1998) y de la ETP, calculada por fuera del modelo según el método de Priestley Taylor, en base a datos históricos climáticos diarios, relevados en la estación experimental INTA Gral Villegas para el período 1973-2013.

La condición inicial fue la misma para todos los escenarios, partiendo de un nivel freático de 150 cm de profundidad, para el sitio validado "La Guarida" en posición de media loma. Mediante el uso DRAINMOD se evaluaron configuraciones de drenaje bajo uso agrícola, variando la profundidad (120 y 150 cm) y distancias entre drenes (50, 100 y 150 m).

Determinación de contenido de N

Con el objetivo de conocer la variación del nivel de nitratos en la napa freática, un segundo conjunto de 19 freáticos fue instalado, en octubre de 2011, dentro de la misma área de estudio. Los mismos fueron instalados en siete lotes agrícolas en posiciones del paisaje: loma, media-loma y bajo, con el fin de tomar periódicamente muestras de agua y registrar las variaciones de profundidad del acuífero superficial.

Los registros utilizados corresponden a muestras mensuales tomadas durante 17 meses desde noviembre del 2011 a marzo del 2013. La Tabla 2 describe para cada freático su posición en el paisaje, la secuencia de cultivos del período analizado y el N aplicado.

Tabla 2. Detalle de los sitios donde se establecieron freaímetros para el muestreo y determinación de nitratos en napa: posición en el paisaje, cultivos y N aplicado como fertilizante.

Table 2. Site Description for groundwater wells installed for N sampling: landscape position, crop sequence and applied N as fertilizer for 2011-12 and 2012-13 seasons.

Sitio	Numero de freaímetros	Posición en el paisaje	Secuencia de Cultivos		Total N aplicado (kg N/ha)	
			2011-2012	2012-2013	11-12	12-13
Las Casuarinas	3	Loma-Media-loma y Bajo	Maíz	Soja	102	0
Berseé	2	Media-loma y Bajo	Soja	Trigo/Soja 2da	4,4	95
El Estribo	2	Loma y Bajo	Maíz	Soja	82	0
El Porvenir	2	Loma y Bajo	Soja	Soja	0	0
El Porvenir	1	Media-loma	Soja	Late Maíz	0	66
La Guarida	1	Loma	Girasol	Maíz	64	79
La Guarida	1	Media-loma	Maíz	Soja	93	0
La Guarida	1	Bajo	Maíz	Inundado	93	0
Los Álamos	2	Loma y Media-loma	Cebada/Soja 2da	Soja	86	0
Los Álamos	1	Bajo	Cebada/Soja 2da	Inundado	86	0
San Jorge	1	Loma	Ceb/Maíz 2da	Soja	104	0
San Jorge	1	Media-loma	Cebada	Soja	72	0
San Jorge	1	Bajo	Girasol	Cebada	6	113
Total Freatímetros	19		N Promedio aplicado (kg/ha)		61,3	27,5

Estos pozos de observación se ubicaron dentro de los lotes de producción para asegurar que los fertilizantes fueran aplicados en el área de recarga de la napa freática. Los suelos de estos sitios de muestreo fueron también Hapludoles bien drenados a "algo excesivamente drenados".

El muestreo y las mediciones se realizaron mensualmente y las muestras de agua se conservaron en frío para su posterior envío al laboratorio y determinación de N como nitrato (N-NO_3). Previamente a la extracción de muestras, se procedió al purgado de los pozos mediante una bomba manual, con el fin de remover el agua alojada en la perforación, esperando su recarga para luego extraer la muestra. El muestreo se extendió por 17 meses, abarcando dos campañas agrícolas y los resultados presentados corresponden al periodo noviembre 2011 a marzo del 2013.

Para el análisis estadístico de las observaciones se ajustó un modelo mixto considerando la posición en el paisaje como efecto fijo, profundidad de napa como covariable y el freaímetro como efecto aleatorio. Incluir freaímetro permite modelar la correlación de las observaciones realizadas sobre un mismo freaímetro. La estimación de las medias de concentración de N-NO_3 para cada nivel de paisaje fueran obtenidas a partir de la metodología de modelos mixtos (Mejor Estimador Lineal Insesgado Empírico) y comparadas vía mínima diferencia significativa al 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración y Validación del modelo

Calidación de las FPT utilizadas

Como se mencionó anteriormente, las funciones de pedotransferencia (FPT) propuestas por Saxton & Rawls

(2006) fueron evaluadas previamente a ser utilizadas en la estimación de las curvas de retención hídrica y K_{sat} de los distintos suelos.

En este aspecto, Borin *et al.* (2000) evaluaron a DRAINMOD comparando determinaciones de las propiedades hidráulicas de suelos con las curvas de retención y la K_{sat} calculadas mediante FPT. Los autores concluyeron que el modelo fue capaz de describir las fluctuaciones de la napa y la descarga drenes subterráneos, utilizando conjuntos limitados de datos. Más recientemente, Abdelbaki & Youssef (2010) también evaluaron la factibilidad de aplicar DRAINMOD estimando las propiedades hidráulicas de los suelos mediante FPT, obteniendo buenos resultados con suelos de los EEUU. En la Argentina, Landini *et al.* (2007) evaluaron la FPT de Saxton & Rawls (2006) para estimar los parámetros de infiltración de la ecuación de Green and Ampt, hallando muy buenos ajustes en molisoles del noreste de la provincia de Buenos Aires.

En el presente estudio, en los primeros 40 cm, con contenidos de arena del 70% y 12,5% de arcilla, las FPT ajustaron a las determinaciones con valores de eficiencia Nash-sutcliffe (R^2_{NS}) de 0,50 para capacidad de campo (-33 kPa) y 0,55 para punto de marchitez (-1500 kPa) (Fig. 3). En las muestras de suelo de 40 a 200 cm de profundidad, con 77% de arena y 9,5% de arcilla, la eficiencia fue de 0,43 para capacidad de campo (-33 kPa) y 0,24 para punto de marchitez (-1500 kPa).

La mayor distancia entre los valores predichos por FPT y determinaciones a laboratorio correspondieron al punto

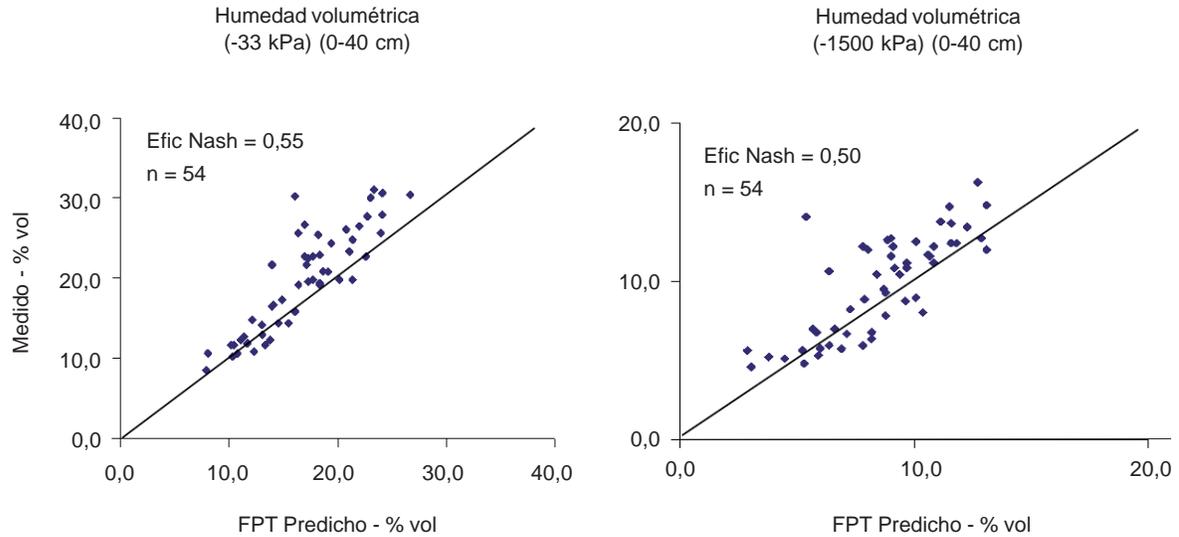


Figura 3. Humedad volumétrica medida en laboratorio y predicha por las funciones de pedotransferencia (FPT) de Saxton and Rawls (2006), en muestras de suelo tomadas de 0 a 40 cm, a succiones de 1500 kPa y 33 kPa.

Figure 3. Volumetric water content measured and predicted by PTF (Saxton and Rawls, 2006) for soil samples from 0-40 cm, at 1500 and 33 kPa.

de marchitez (-1500 kPa) en capas profundas (40 a 200 cm), donde las FPT subestimaron la humedad volumétrica en un 27% respecto a los valores observados.

Calibración y Validación de la profundidad de la napa freática

La Figura 4 presenta las curvas calibradas para las series de suelo Bolívar y Piedritas, en los sitios 30 de Agosto y Magdala.

Los resultados obtenidos en la calibración se detallan en la Tabla 3. Los valores de correlación (r) fueron elevados, indicando que el modelo reprodujo la dinámica de la napa en el tiempo (Fig. 5). Por su parte, el valor de R^2_N varió entre sitios, pero el ajuste general fue muy bueno (0,88), considerando el total de observaciones y predicciones (n=1239), con un RMSE of 24,9 cm (Fig. 6).

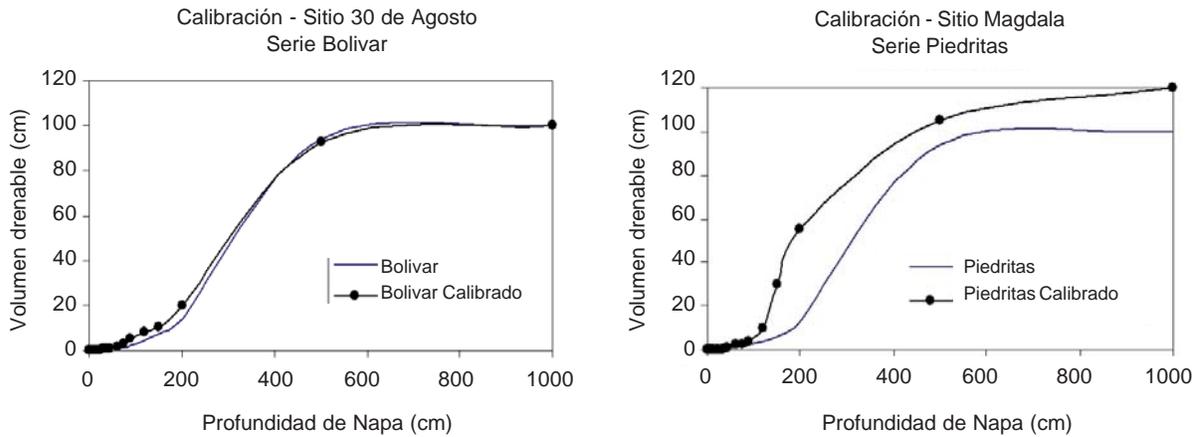


Figura 4. Curvas “Profundidad de napa-Volumen drenable” (WTD-DV), calibradas y calculadas por DRAINMOD para las series de Bolívar (sitio 30 de Agosto) y Piedritas (Sitio Magdala).

Figure 4. Calibrated and Drainmod computed WTD-DV curves for Bolivar and Piedritas Soil series.

Tabla 3. Eficiencia de Nash-Sutcliffe (R^2_N), coeficiente de correlación de Pearson (r) y raíz cuadrada del error medio cuadrático (RMSE) correspondientes al período de calibración del modelo DRAINMOD para predecir profundidad de niveles freáticos para los sitios de estudio.

Table 3. Model Performance at calibration for Groundwater table depth. Nash-Sutcliffe efficiency (R^2_N), Pearson correlation coefficient and root mean square (RMSE).

Sitio	Posición en el paisaje	Período de calibración	Observaciones (n)	Frecuencia media de observación (días)	R^2_N	Pearson (r)	RMSE (cm)
El Porvenir	Media-loma	2009-2010	68	7	0,75	0,88	13,90
El Porvenir	Bajo	2009-2010	69	7	0,72	0,93	16,87
La Guarida	Loma	2005-2010	54	30	0,51	0,81	16,41
La Guarida	Media-loma	2005-2010	54	30	0,75	0,90	12,65
Las Casuarinas	Loma	2005-2010	270	7	0,35	0,75	24,65
Las Casuarinas	Media-loma	2005-2010	270	7	0,47	0,76	26,73
30 de Agosto	Media-loma	2004-2010	257	7	0,60	0,88	21,15
La Mirta	Media-loma	2007-2010	59	30	0,23	0,87	24,78
Magdala 11c	Media-loma	2010-2012	31	30	0,49	0,87	58,89
Magdala 13c	Media-loma	2010-2012	29	30	0,61	0,83	42,67

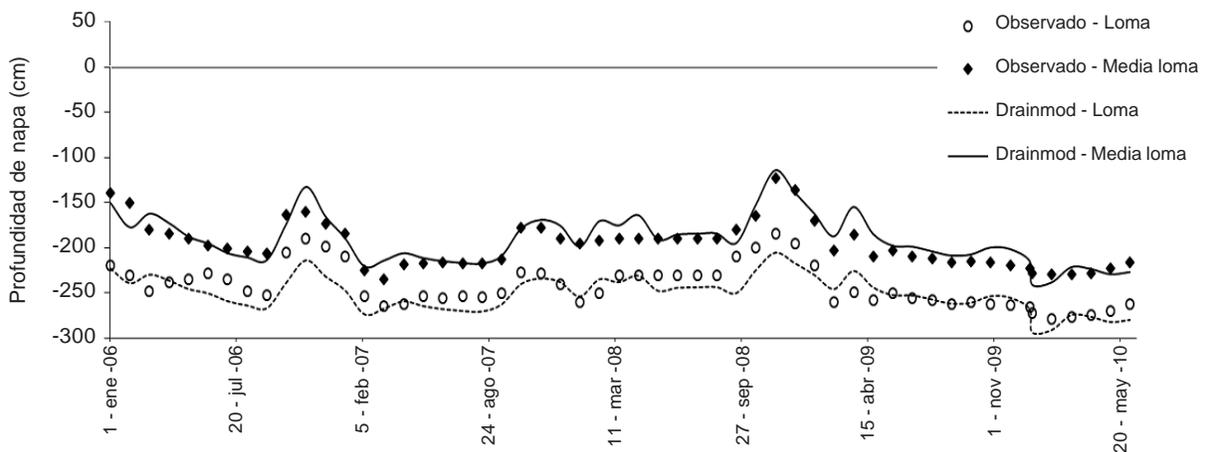


Figura 5. Profundidad de la napa freática observada y predicha por DRAINMOD en las posiciones de loma y media-loma en el sitio La Guarida, en el período de calibración (2006-2010).

Figure 5. Observed and Drainmod Predicted water table depth for the upland and midslope wells, at La Guarida (2006-2010).

En el proceso de validación, las predicciones de DRAINMOD tuvieron un buen ajuste a los valores observados. Los resultados obtenidos en la validación se detallan en la Tabla 4. Siete de los ocho sitios validados presentaron coeficientes R^2_N entre 0,44 y 0,90 para profundidad de napa diaria. En cuanto al ajuste general en el período de validación, el coeficiente R^2_N fue de 0,73, considerando el total de observaciones y predicciones ($n=747$), con un RMSE de 39 cm (Fig. 6).

Los coeficientes de correlación entre los valores diarios predichos y los observados oscilaron entre 0,80 y 0,95, reflejando un buen acuerdo entre modelo y las observaciones en la variación temporal. La Figura 7 presenta las series de tiempo de profundidad de napa, en el período de validación, en las posiciones de loma y media loma, para el sitio La Guarida. Esta figura puede ser comparada con la Figura 5 que presenta este mismo sitio en el período de calibración, donde la napa se ubicó siempre por debajo de

Tabla 4. Eficiencia de Nash-Sutcliffe (R^2_N), coeficiente de correlación de Pearson (r) y raíz cuadrada del error medio cuadrático (RMSE) correspondientes al período de validación del modelo DRAINMOD para predecir profundidad de niveles freáticos para los sitios de estudio.

Table 4. Model Performance at Validation for Groundwater table depth. Nash-Sutcliffe efficiency (R^2_N), Pearson correlation coefficient and root mean square (RMSE).

Sitio	Posición en el paisaje	Período de validación	Observaciones (n)	R^2_N	Pearson (r)	RMSE (cm)
La Guarida	Loma	2010-2013	57	0,90	0,95	18,1
La Guarida	Media-loma	2010-2013	57	0,77	0,89	27,2
Las Casuarinas	Loma	2010-2013	170	0,44	0,86	37,3
Las Casuarinas	Media-loma	2010-2013	175	0,75	0,88	30,8
30 de Agosto	Media-loma	2010-2013	169	0,42	0,90	49,5
La Mirta	Media-loma	2010-2012	59	0,56	0,80	41,4
Magdala 11v	Media-loma	2010-2012	31	-0,09	0,87	70,4
Magdala 13v	Media-loma	2010-2012	29	0,68	0,92	37,1

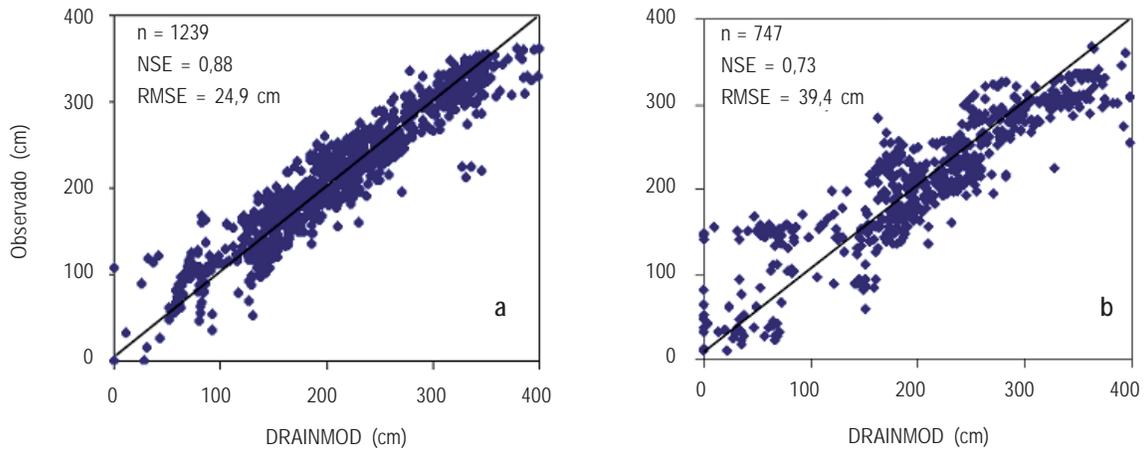


Figura 6. Valores de Profundidad de la napa freática observada versus valores predichos por DRAINMOD para todos los sitios en el período de Calibración (a) y Validación (b).

Figure 6. Observed and Predicted Ground Water Table Depth for all site observations at Calibration (a) and Validation (b).

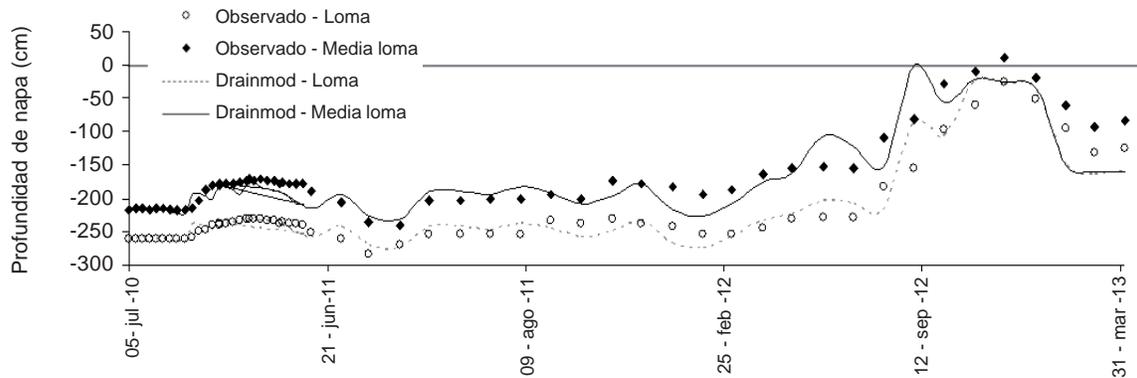


Figura 7. Profundidad de la napa freática diaria observada y predicha por DRAINMOD en las posiciones de loma y media-loma en el sitio La Guarida, en el período de validación (julio 2010-abril 2013).

Figure 7. Validation Time series for groundwater table at La Guarida site for Upland and Midslope observation wells.

los 150 cm de profundidad. Sin embargo, en el período de validación el modelo pudo predecir valores de profundidad de la napa muy cercanos a la superficie para el año 2012, en ambas posiciones de loma y media loma.

Si bien el modelo presentó buenos niveles de predicción, otros autores han encontrado incluso mejores ajustes. Sanoja *et al.* (1990) en los EEUU y Madramootoo *et al.* (1999) en Canadá reportaron errores medios de 15 y 20 cm, respectivamente, entre la profundidad de la napa predicha y la observada. Esto es promisorio por resultar una herramienta que puede ser de interés para el estudio de la dinámica del balance de agua y el transporte de sales y nitratos en otras regiones del país, bajo distintos escenarios de manejo.

Estrategias de Control de la profundidad de la napa freática

En Pampa Arenosa, el nivel freático tiene una importante correlación con la precipitación anual y condiciones locales de saturación (Santa Cruz & Silva Busso, 2002). Por otro lado, la textura arenosa determina un movimiento vertical predominante con una alta tasa de infiltración y bajo nivel de escurrimiento superficial. Esto significa que el exceso de precipitaciones en esta región se refleja en un ascenso de la zona saturada y del nivel freático. En períodos con importante precipitación, el grado de saturación promedio es una variable determinante en la acumulación de excesos hídricos. El grado de saturación actual del suelo está relacionado al consumo de agua de la cobertura vegetal.

En Pampa Arenosa, para poder controlar el nivel freático puede pensarse en minimizar el grado de saturación, maximizando el consumo de agua y en redistribuyendo excesos en forma artificial, mediante drenes subterráneos, en virtud de la inexistencia de una red de drenaje definida, que permita una salida ordenada de los excedentes a nivel de cuenca.

Mediante DRAINMOD se analizó el impacto de dos estrategias de control de la napa freática: consumo de agua por cultivos y estructuras de drenaje subterráneo, para el periodo 1973-2013.

La Figura 8 presenta la profundidad "media anual" de la napa freática, para el sitio La Guarida en posición de media loma, bajo tres escenarios de manejo: "agricultura continua actual", "agricultura continua con drenaje" y "pastura continua". Como se observa en el gráfico (Fig 8) ambos escenarios agrícolas (rotaciones 1 y 2) se comportan en forma similar en períodos húmedos, como las décadas del '80 y '90, presentando niveles freáticos por encima del metro de profundidad. La "rotación 2" que incluye doble cultivo en la mitad de los años, presenta un nivel medio de la napa algo inferior a la "rotación 1" (maíz-soja), especialmente en el período menos húmedo 2002-2011. Esta diferencia poco significativa entre rotaciones agrícolas coincide con lo reportado por Mercau *et al.* (2015) para la misma región, en el partido de Pehajó.

El uso con pastura continua, con un mayor consumo anual de agua, presenta una profundidad media anual de

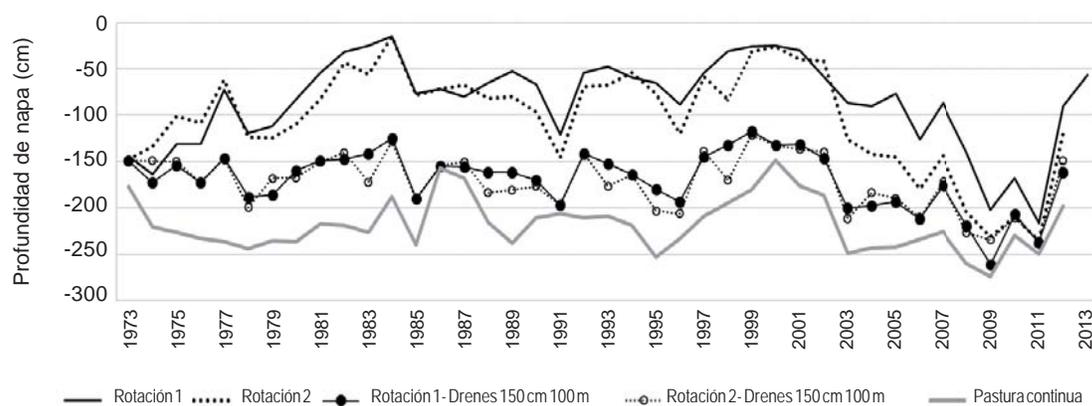


Figure 8. Profundidad "media anual" de la napa freática estimados con DRAINMOD para el periodo 1973-2013, en el sitio La Guarida-Media Loma, bajo diferentes escenarios de manejo: dos rotaciones agrícolas continuas, ambas rotaciones con drenes subterráneos y Pastura Continua.

Figure 8. Yearly average groundwater table depth estimated by DRAINMOD for the period 1973-2012, under different managements: undrained crop rotations, Tile-drained crop rotations and undrained continuous pasture.

la napa cercana a los dos metros, oscilando siempre por debajo del metro y medio de profundidad. La incorporación de drenes subterráneos a un metro y medio, permitiría mantener la napa de dicha profundidad, bajo un uso de agricultura continua, mediante el drenaje del agua de saturación. Esta tecnología permitiría continuar con una rotación agrícola manteniendo la napa freática a una profundidad óptima y sin riesgo de anegamiento.

La implementación de este tipo de tecnología implica contar con una red de drenaje que permita evacuar los excedentes hídricos del sistema de drenaje, o bien contar con áreas bajas, lagunas o reservorios, que puedan recibir dichos excedentes, en forma controlada.

Por otro lado, el costo de instalación es relevante, siendo necesario un análisis previo para definir la configuración del sistema de drenaje a instalar, total o parcialmente, en un lote agrícola. El uso de modelos hidrológicos permite realizar este tipo de cálculos. Para estimar la configuración óptima de estas estructuras de control, se calculó con DRAINMOD la eficiencia de drenes subterráneos ubicados en dos profundidades (120 cm y 150 cm) y a tres distancias entre drenes (50 m, 100 m y 150 m), para el caso "La Guarida" en posición de media loma. El diseño óptimo de distancia y profundidad de drenes es un compromiso

entre el costo de instalación y el control esperado de la napa freática. El costo será mayor cuanto menor sea la distancia entre drenes y mayor la profundidad de instalación.

La Figura 9 presenta el nivel "diario" medio y el rango mínimo y máximo de la napa freática analizado para el período de calibración y validación del modelo (2006-2013) en el sitio La Guarida en posición de media loma. Dentro de las configuraciones evaluadas, la más eficiente, considerando costos y beneficios, resultó ser la de drenes subterráneos ubicados a 150 cm de profundidad y distanciados a 100 m entre drenes. Esta disposición mantendría la napa entre el 150 cm y 200 cm con un ascenso máximo a 70 cm de la superficie del suelo, fuera de la zona de riesgo de anegamiento, siendo además más económica que la estructura de drenes espaciados a 50 m, que presenta un rango de control similar. Por otro lado, al aumentar la distancia entre drenes de 100 m a 150 m, el control es menos eficaz en períodos muy húmedos, aunque resulte más económica su instalación.

Si se considera el efecto del consumo de las pasturas y de la instalación de estructura de drenaje, en lugares que lo permitan, se pueden estudiar estrategias mixtas para establecimientos agrícola-ganaderos de Pampa Arenosa.

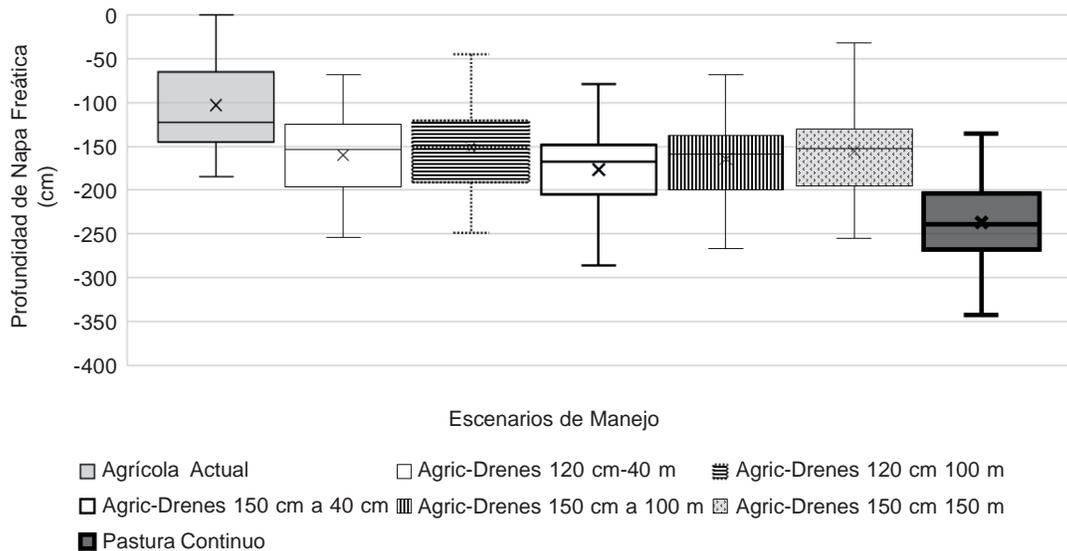


Figura 9. Rango de variación de la profundidad diaria de la napa freática según escenarios de manejo estimada con Drainmod para el período 2004-2013.

Figure 9. Daily groundwater table depth variability range under undrained agricultural crops, undrained pasture and Tile-drain designs for agricultural crops, estimated by DRAINMOD for 2004-2013.

En esta región, el menor consumo de agua de los cultivos anuales, en comparación con pasturas perennes, incrementa el riesgo de anegamiento por ascenso del nivel freático, en años con precipitaciones superiores al promedio histórico. El gráfico de la Figura 10 presenta el nivel medio freático mensual estimado "retrospectivamente" con DRAINMOD, para el área de influencia del sitio La Guarida en posición de media loma, entre octubre de 1973 y abril del 2012, comparando tres escenarios de manejo: "rotación 1", "rotación 1 con drenes a 150 cm espaciados a 100 m" y "pastura perenne continua". El escenario "rotación 1" presenta reiterados eventos de niveles freáticos cercanas a la superficie, mientras que la pastura continua se mantiene mayormente por debajo de los 2 m sin presentar ascenso a la superficie. Este comportamiento coincide con los resultados reportados recientemente por Nosseto *et al.* (2015), en región pampeana en 9 sitios encontrando niveles freáticos significativamente más profundos bajo pastura respecto a rotaciones agrícolas con simple y doble cultivo (4m, 1,5 m y 2,1 m, respectivamente).

Considerando los partidos del área de estudio: Bolívar, Daireaux, Guaminí, Hipólito Irigoyen, Pehajú, Rivadavia y Trenque Lauquen, se observa que en 1970, el área agrícola representaba un 18% de la superficie total de estos partidos, subiendo gradualmente al 25% en 1990. Mientras que en el período 1990-2012 el área efectiva cosechada se incrementó fuertemente pasando a ocupar el 44%

del área total (SIIA, 2015). Esto implicaría un mayor riesgo de anegamientos por ascenso freáticos debido al aumento del área sembrada y la disminución de área ocupada por pasturas en los mencionados partidos. Sin embargo, esto último no puede afirmarse y merecería ser estudiado.

La Figura 10 permite observar que el uso con pastura mantiene el nivel freático unos 150 a 200 cm por debajo del nivel bajo uso agrícola. Similarmente, la instalación de drenes subterráneos ubicados a 150 cm y espaciados a 100 metros mantuvo la napa entre 100 y 150 cm por debajo del nivel freático bajo uso agrícola convencional. Ambos casos, uso con pastura y drenaje subterráneo, presentan una zona no saturada de mayor espesor permitiendo almacenar excesos en momentos de altas precipitaciones.

El efecto beneficioso del mayor consumo con pasturas es especialmente relevante en años húmedos. En el período 1973-2012, la evapotranspiración anual de la "rotación 1" fue de 780 mm, mientras que en pastura fue de 904 mm, dando una diferencia promedio de 124 mm año⁻¹, que en la rotación agrícola tiene un efecto acumulativo mayor que en los ciclos con pasturas. Esta diferencia es contrastante al comparar años extremos. La Figura 11 presenta la precipitación promedio y la ET de la "rotación 1" y la pastura, para dos campañas agrícolas extremas: 2008-2009 y 2001-2002, observándose que el cultivo pudo utilizar más agua almacenada en el perfil en el año seco, mientras que la pastura fue capaz de utilizar el agua

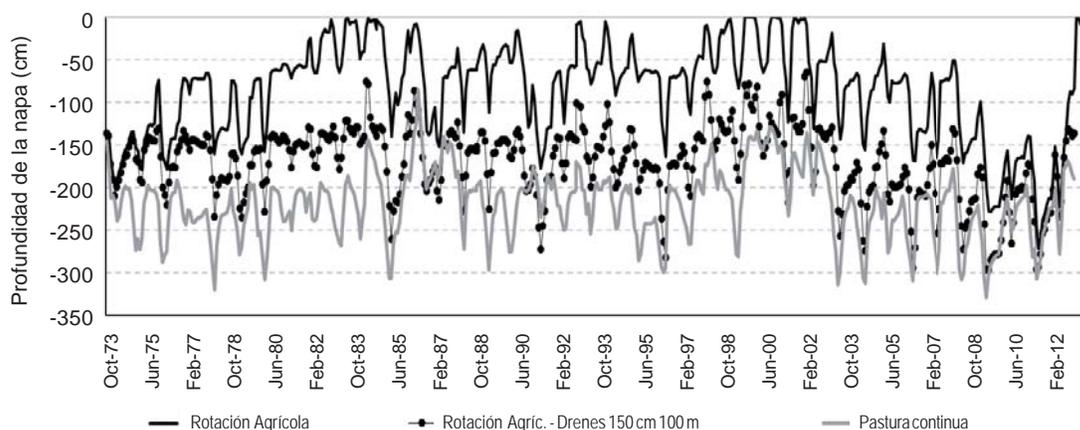


Figura 10. Profundidad "media mensual" de la napa freática estimada con DRAINMOD para el período 1973-2012 para el sitio La Guarida posición media loma, bajo tres escenarios de manejo seleccionados: Rotación agrícola continua, Rotación agrícola con drenes subterráneos a 150 cm separados a 100 m y Pastura continua.

Figure 10. Monthly average groundwater table depth estimated by DRAINMOD for the period 1973-2012, under different 3 selected managements: undrained crop rotation, Tile-drained crop rotation (drains depth 150 cm ,100 m distance) and undrained continuous pasture.

precipitada y almacenada en el año húmedo. En el año húmedo, la pastura fue capaz de aprovechar los excesos por tener mayor capacidad de almacenaje, mientras que en el cultivo el nivel freático llegó a la superficie. Similarmente, Nossetto *et al.* (2015) sugieren diferencias promedio del 15%, al comparar el consumo anual de cultivos de verano con pasturas perennes en el oeste bonaerense, reportando incluso diferencias mayores de 1075 mm año⁻¹ para pasturas perennes y 679 mm año⁻¹ para cultivos de verano.

Combinación de pasturas y drenes

Una estrategia para mitigar el riesgo de anegamientos por ascenso freáticos, podría ser la combinación de estructuras de drenaje subterráneas y el consumo de agua con pasturas, u otro cultivo perenne, incluso plantaciones forestales. La Figura 12 presenta esquemáticamente esta estrategia para una toposecuencia de Pampa Arenosa. El esquema presenta la localización de una rotación agrícola en los sectores loma plana extendida y medias lomas y un área con pastura en las zonas de media loma baja y bajos. La instalación de un sistema de drenaje en posición de loma permite acelerar el flujo sub-superficial hacia posiciones más bajas del paisaje. La pastura, por presentar un mayor consumo de agua, en general presentaría una zona "no

saturada" de mayor espesor, que funcionaría como "buffer" para recibir los excedentes de los suelos cultivados en posiciones de loma, o media loma alta, que se encuentren debidamente sistematizados con drenes subterráneos y una estructura de control a la salida del caño colector. Los sectores de bajo con pasturas podrían a su vez estar sistematizados con drenes subterráneos para evacuar excedentes a posiciones de laguna o reservorios, en forma controlada. Ambos sistemas de drenaje, de loma y bajo, se presentan conectados y con estructuras de control que permiten liberar o limitar el drenaje de excesos a los sectores más bajos y lagunas o reservorio. La estructura de drenaje ubicada en la pastura tiene un doble propósito, ya que permite evacuar excedentes hacia la laguna, o aprovechar el agua de drenaje proveniente de los sectores de loma, redistribuyéndola a través de los drenes secundarios, en un proceso de "sub-irrigación", mediante la apertura y cierre de la estructura de control a la salida del caño colector. Este sistema combinado permitiría transferir los excedentes hídricos de los suelos ubicados en los sectores de loma extendida durante períodos de bajo consumo de los cultivos, para ser aprovechado por la pastura, minimizando a su vez la salida por drenaje a lagunas o reservorios artificiales, maximizando su capacidad de almacenaje ante eventos extremos. Finalmente, la estructura de control a

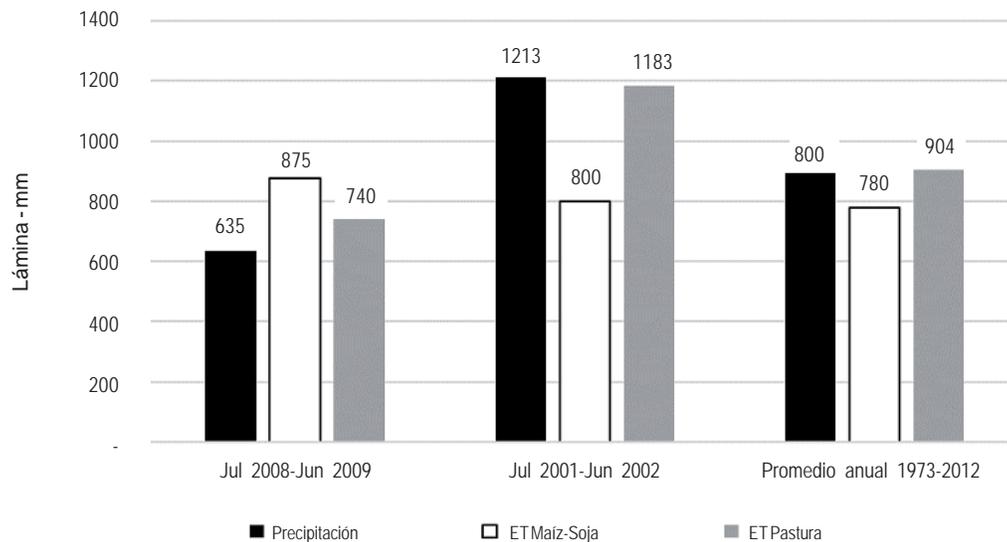


Figura 11. Láminas de precipitación y ET real de la rotación 1 (Maíz-Soja) y Pastura continua para el período 1973-2012 y dos campañas agrícolas extremas del período: 2008-2009 (seca) y 2001-2002 (húmeda).

Figure 11. Annual average Precipitation and ET, for a Maize-Soybean rotation and Continuous pasture for the period 1973-2012 and for two extreme seasons: 2001-2002 (wet) and 2008-2009 (dry).

la salida del colector en posición de loma, permitiría mantener la napa en un rango óptimo durante la estación de crecimiento del cultivo, en períodos de bajas precipitaciones. Paralelamente, contar con una estructura de drenaje permite asegurar el tráfico de maquinaria en momentos críticos como los son la cosecha y la siembra y evitar la salinización del suelo por ascenso freáticos. El uso de drenes subterráneos o "Tile Drains", se han extendido mucho en el área agrícola del medio-oeste de los EEUU. En el año 1985 existían casi 15 millones de hectáreas con drenes subterráneos en todo el territorio norteamericano (USDA, 1987), ascendiendo a 19 millones en 2012 (USDA, 2014). Si bien esta tecnología es altamente eficiente en el control de la napa, requiere el uso de estructuras de control y ciertos criterios de manejo para evitar pérdidas de nutrientes y agroquímicos en agua de drenaje (Klavidko *et al.*, 2001).

La apertura o cierre de las estructuras mencionadas en la Figura 12 pueden realizarse en forma sencilla monitoreando el nivel freático, considerando el consumo esperado y los pronósticos de lluvias de mediano plazo. Un grado mayor de sofisticación para adelantarse a ascensos

y descensos freáticos, es el uso complementario de "modelos de series de tiempo", que permiten realizar pronósticos locales en función de los registros freáticos, (Vazquez Amabile & Engel, 2008).

Este tipo de estrategias implica una evaluación de la topografía para la zonificación de cultivos, pasturas y reservorios, y una correcta elección de las especies forrajeras de la pastura, que maximicen el consumo y sean medianamente tolerantes a anegamientos temporarios o perfiles parcialmente saturados en profundidad.

Concentración de NO_3 en la napa

Los valores de concentración de N-NO_3 de las muestras tomadas en el período 2011-2013, presentaron concentraciones variables en la mayoría de los freáticos, dependiendo del nivel de precipitaciones y la posición en el paisaje. Considerando $10 \text{ mg L}^{-1} \text{ N-NO}_3$ como límite crítico, el 52% de las observaciones excedieron este límite, sin tener relación con las dosis de N aplicado como fertilizante y mayormente debido a la ocurrencia de muy altas precipitaciones ocurridas en el invierno del 2012.

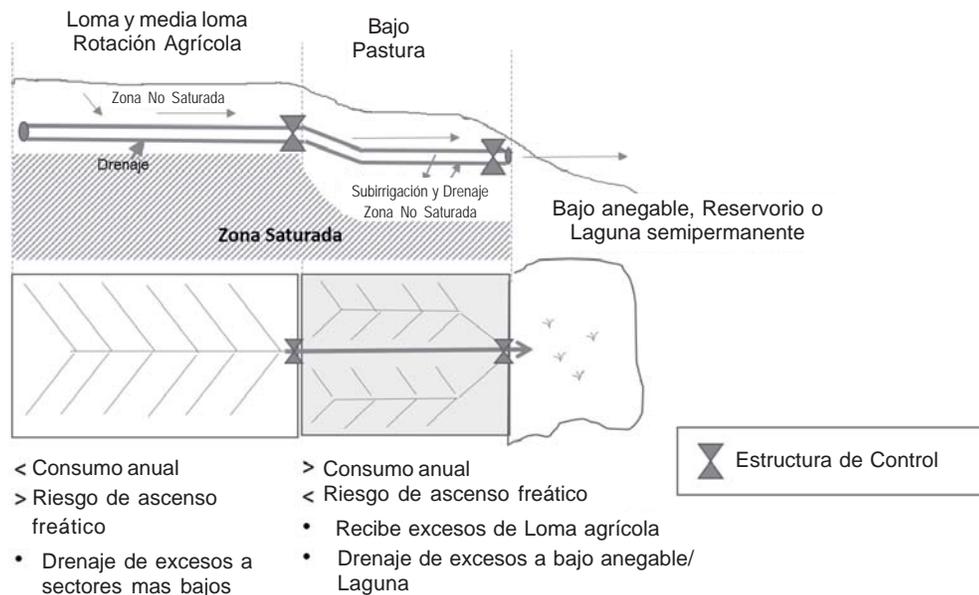


Figura 12. Esquema de regulación de la napa freática en lotes agrícolas combinando el uso de drenes subterráneos con el consumo de pasturas para establecimientos del Oeste de Buenos Aires.

Figure 12. Diagram for a combined strategy to control groundwater table depth in Western Pampa crop fields, based on tile drainage and pastures water consumption.

Durante la primera campaña de muestreos (2011-2012), la dosis promedio de N aplicado ($61,3 \text{ kg N ha}^{-1}$) fue mayor que en la segunda campaña ($27,5 \text{ kg N ha}^{-1}$). Esto se explica en el hecho de que la campaña 2012-2013 tuvo una mayor proporción de lotes con soja, que no recibieron fertilización con N, mientras que los cereales (maíz, trigo y cebada) son normalmente fertilizados con fuentes nitrógenadas, principalmente con urea durante el ciclo del cultivo y fosfatos de amonio a la siembra.

Las precipitaciones ocurridas entre mayo y octubre del 2012 sumaron 601 mm, en tanto que el promedio para dicho período, entre 1953 y el 2010, fue de 279 mm. Dichas precipitaciones ocurridas en invierno y comienzos de primavera, causó que la napa freática ascendiera hasta la superficie causando anegamiento en octubre y noviembre, e incrementando significativamente la lixiviación de nitratos a partir de mayo del 2012.

De modo que, como sería esperable en suelos arenosos, la cantidad y frecuencia de precipitaciones habría tenido mayor incidencia en el transporte de N, que la dosis de fertilizante aplicada, la posición en el paisaje y la proximidad de la napa a la superficie. Por ejemplo, para el período noviembre 2011 a febrero del 2013, el sitio El Porvenir en posiciones de Loma y de Bajo, tuvo soja los dos años consecutivos, sin aporte de N por fertilización. Sin embargo, la napa en posición de loma tuvo una concentración media N-NO_3 de 27 mg L^{-1} , con un máximo de $62,8 \text{ mg L}^{-1}$, mientras que el bajo tuvo un valor promedio de $6,7 \text{ mg L}^{-1}$ y un máximo de $14,2 \text{ mg L}^{-1}$. No obstante, ambos freáticos presentaron cerca de 2 mg L^{-1} de octubre 2012 a febrero 2013.

Considerando la totalidad de los sitios, las observaciones realizadas sobre un mismo freático no estuvieron correlacionadas en el tiempo ($P < 0,01$), y la posición en el paisaje tuvo un efecto estadísticamente significativo en la concentración de N-NO_3 ($P < 0,05$). Asimismo, la profundidad de la napa como covariable, tuvo un efecto significativo sobre la concentración de N-NO_3 , disminuyendo con el ascenso freático ($P < 0,01$), sin presentar interacción con la posición en el paisaje. La Tabla 5 presenta el análisis de la varianza y la comparación de medias de N-NO_3 , a un valor promedio de profundidad de napa ($114,8 \text{ cm}$).

La Figura 13 permite comparar conjuntamente el nivel promedio mensual de la napa freática y la concentración de nitratos para las tres posiciones del paisaje, promedio de todos los sitios. Debido a las altas precipitaciones, tanto la profundidad de la napa y la concentración de nitratos se incrementaron hasta noviembre y luego se normalizaron durante el verano, presentando bajos valores cercanos a $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ de N-NO_3 .

Estos resultados contrastan con lo reportado en Pampa Ondulada por Portela *et al.* (2009), quienes hallaron, en Argiudoles, mayores concentraciones de N-NO_3 en posición de bajo, explicado por transporte en flujo lateral subsuperficial desde la loma hacia el bajo. En los suelos arenosos el gradiente hidráulico vertical predomina fuertemente sobre el flujo lateral, lo cual explicaría una diferencia importante en la dinámica de los nitratos en agua subterránea entre suelos de la Pampa Arenosa y Argiudoles de Pampa Ondulada.

Tabla 5. Análisis de la varianza del efecto de la posición en el paisaje y la profundidad de la napa sobre la concentración de N-NO_3 .

Table 5. Analysis of variance of landscape and water table depth effects on $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration.

Análisis de la Varianza				
Fuente de Variación	Num DF	Den DF	F	Valor P
Paisaje	2	15,3	5,52	0,016
Profundidad de Napa (covariable)	1	170,4	7,57	0,007
Paisaje x Profundidad de Napa	2	170,6	0,22	0,803
Test de medias				
Paisaje	N-NO_3			
Loma	18,27	A		
Media-Loma	11,24	B		
Bajo	13,24	B		

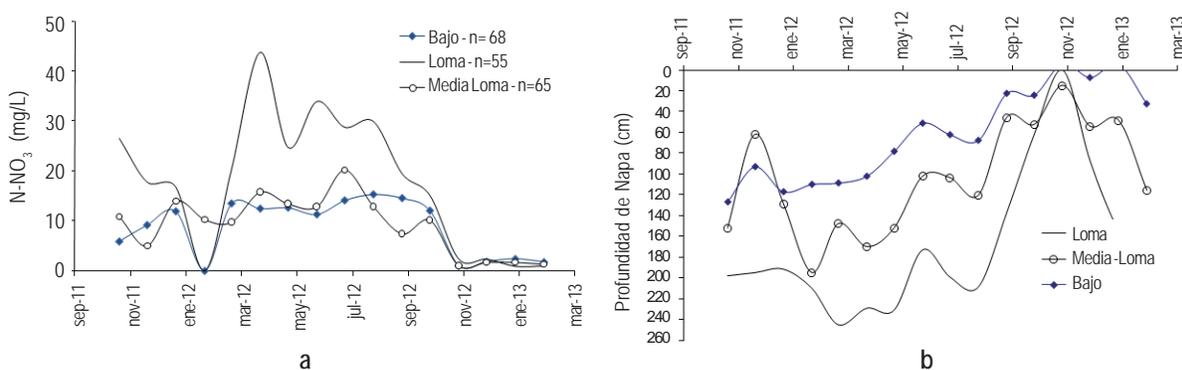


Figura 13. Nivel promedio mensual de la concentración de $N-NO_3$ (a) y de la napa freática (b) para las tres posiciones del paisaje, promedio de todos los sitios ($n=188$), desde octubre 2011 a febrero 2013.

Figure 13. Average monthly NO_3-N concentration (a) and Water Table depth (b) by landscape position, all sites from October 2011 to February 2013.

La menor concentración de $N-NO_3$ en posiciones de media-loma y bajo podría explicarse por un efecto "dilución" en agua, por menor profundidad de la napa en posiciones bajas. Sin embargo, otros procesos relacionados a la dinámica del N, tales como mineralización y denitrificación, deben ser considerados, especialmente donde los niveles de $N-NO_3$ no se relacionaron con las dosis aplicadas de fertilizantes nitrogenados, en coincidencia con Portela *et al.* (2006 y 2009).

Los altos valores de nitratos en posiciones de loma y menores en posición de bajo, podrían deberse a los procesos naturales de mineralización y denitrificación de la materia orgánica, junto a la lixiviación de nitratos. Aun en ausencia de agricultura, la mineralización de fracciones orgánicas incrementa el nivel de nitratos disponibles del suelo. Este proceso depende de la actividad bacteriana que se encuentra directamente relacionada con la temperatura y la humedad del suelo y buenas condiciones de drenaje. La denitrificación, por otro lado, reduce la cantidad de nitratos liberando óxido nitroso (N_2O), and N gaseoso (N_2), en condiciones de saturación y falta de oxígeno en el espacio poroso del suelo.

En este sentido, Portela *et al.* (2006) utilizaron N^{15} para rastrear el N lixiviado proveniente del fertilizante nitrogenado aplicado en maíz en suelos de región pampeana de texturas franco arcillosa y franco arenosa. Aun cuando el N lixiviado fue muy bajo y similar en ambos suelos, los autores reportaron que la contribución del fertilizante fue extremadamente baja (de 0 a 3,5%), implicando que más del 96% del N lixiviado derivó de la mineralización de la materia orgánica del suelo.

CONCLUSIONES

El modelo Drainmod fue evaluado en varios sitios del Oeste de la provincia de Buenos Aires, con el objetivo de contar con una herramienta de apoyo en el estudio de la dinámica de la napa freática y predecir el impacto de escenarios de manejo y variaciones climáticas interanuales. En el proceso de calibración el modelo predijo la profundidad diaria de la napa freática, con una eficiencia de Nash-Sutcliffe (R^2_N) promedio de 0,88 y un error medio cuadrático (RMSE) de 24,9 cm. En la validación DRAINMOD presentó un error medio cuadrático (RMSE) 39,4 cm y una eficiencia R^2_N que varió entre 0,44 y 0,90 en siete de los ocho sitios evaluados. El uso de funciones de pedotransferencia para la estimación de las curvas de retención hídrica y la Ksat de los suelos requeridos por el modelo, no constituyó un obstáculo para su validación.

El modelo resultó ser una herramienta muy eficaz para analizar escenarios de manejo y explorar posibles estrategias de control de la napa apropiadas para la región Pampa Arenosa, cuyo paisaje carece de una red de drenaje definida determinando que los excesos de precipitaciones impacten directamente sobre el ascenso del nivel freático. Cualquier estrategia de control para esta región debería considerar la maximización del consumo de agua manteniendo una zona "no saturada" de espesor significativo. En este aspecto, y en consonancia con otros autores, se observó una diferencia significativa entre el consumo anual de una pastura perenne y cultivos agrícolas anuales, aunque no se observó una diferencia sustancial en el consumo anual entre rotaciones agrícolas con y sin doble cultivo. DRAINMOD permitió cuantificar el efecto del mayor consumo de las pasturas perennes sobre la profundidad de la napa en relación a cultivos en ro-

tación, como así también el efecto de drenes subterráneos. La combinación de ambos permitiría redistribuir los excesos de suelos saturados con cultivos anuales, a sectores no saturados con pasturas, en toposecuencias, que a su vez cuentan con lagunas o reservorios artificiales, para recibir agua de drenaje en forma localizada. Consecuentemente, se disminuiría el riesgo de anegamiento en cultivos anuales, asegurando el tránsito de maquinaria, amortiguando cambios bruscos estacionales y disminuyendo otros efectos colaterales no analizados, como el riesgo de salinización por ascenso freáticos.

En relación a la concentración de nitratos en el agua de la napa freática, se observaron diferencias significativas según la posición en el paisaje, con concentraciones mayores en posición de loma y menores en posiciones de bajo y media loma. Asimismo, la profundidad de la napa como covariable tuvo un efecto significativo en la concentración de nitratos, aumentando con la profundidad de la napa. Esto último podría explicarse por un efecto dilución de los nitratos presentes en el perfil a medida que el nivel freático se acerca a la superficie. Los niveles observados de N-NO₃ no se relacionarían con la fertilización de cultivos y podrían explicarse por la lixiviación de nitratos provenientes de la mineralización de la materia orgánica y por los procesos de denitrificación en condiciones de saturación de suelo en posiciones de bajo. Los datos analizados no reflejaron movimientos de nitratos por flujo lateral desde la loma hacia el bajo, lo cual se explicaría por el gradiente hidráulico predominantemente vertical, propio de los suelos arenosos.

Los sistemas de drenaje aplicables al control de ascensos freáticos en Pampa Arenosa, deberán también considerar la movilidad de nitratos en el perfil y prevenir su potencial transporte en solución, junto a otros nutrientes o agroquímicos, en el agua de drenaje.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los técnicos e integrantes del grupo CREA Henderson-Daireaux, al Dr Martin Gonzalo y a los Ing Agr Gustavo Duarte, Valeria Parra y a las autoridades de la escuela 30 de Agosto. Este estudio ha sido realizado en forma conjunta por AACREA y el Instituto de Tecnología de los Alimentos de INTA-Castelar

BIBLIOGRAFÍA

- Abdelbaki, AM & MA Youssef. 2010. Assessing the Feasibility of DRAINMOD Application Using Soil Hydraulic Properties Estimated by Pedotransfer Functions 9th International Drainage Symposium held jointly with CIGR and CSBE/SCGAB Proceedings, 13-16 June 2010 IDS-CSBE-100170.
- Allen R.; L Pereira; D Raes & M Smith. 1998. Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper Nr. 56, FAO, Rome, Italy. 300 pages.
- Aragón R; EG Jobbágy & EF Viglizzo. 2010. Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). *Ecohydrology*, DOI: 10.1002/eco.149.
- Borin, M; F Morari; G Bonaiti; M Paasch & RW Skaggs, 2000. Analysis of DRAINMOD performances with different detail of soil input data in the Veneto region of Italy. *Agric. Water Manage.* 42(3): 259-272.
- Brisson, N; B Rebiere; D Zimmer & P Renault. 2002. Response of the root system of a winter Wheat crop to waterlogging. *Plant and Soil* 243(1): 43-55.
- Calderini, D; G Maddoni; D Miralles; R Ruiz & E Satorre 1994. Validación del modelo CERES-Wheat para producciones extensivas de trigo en diferentes situaciones de fertilidad del norte de la provincia de Buenos Aires. Actas III Congreso Nacional de Trigo, 81-82.
- GeoINTA. 2012. SAGyP - INTA - Proyecto PNUD ARG/85/019. Suelos de la República Argentina v.9. Disponible en <http://geointa.inta.gov.ar/>
- Green, WH & G Ampt. 1911. Studies of soil physics, part I. the flow of air and water through soils. *J. Agricultural Science* 4:1.
- Jobbágy, EG & RB Jackson. 2004. Groundwater use and salinization with grassland afforestation. *Global Change Biol.* 10: 1299-1312.
- Jobbágy, EG & RB Jackson. 2007. Groundwater and soil chemical changes under phreatophytic tree plantations. *J. Geophys. Res.* 112, G02013, doi:10.1029/2006JG000246.
- Jones, JW; G Hoogenboom; CH Porter; KJ Boote; WD Batchelor; LA Hunt; PW Wilkens; U Singh; AJ Gijssman & JT Ritchie. 2003. DSSAT Cropping System Model. *European Journal of Agronomy* 18: 235-265.
- Klavidko, EJ; LC Brown & JL Baker. 2001. Pesticide transport to subsurface tile drains in humid regions in North America. *Critical Reviews in Environ. Sci. and Tech.* 31(1): 1-62.
- Kruse, E; JA Forte Lay; JL Aiello; A Basualdo & G Heinenknecht. 2001. Hydrological processes on large flatlands: case study in the northwestern region of Buenos Aires Province (Argentina). Remote sensing and Hydrology (Proceeding of a symposium held at Santa Fe, New Mexico, USA, April 200). IAHS 267.
- Kruse, E & E Zimmermann. 2002. Hidrogeología de Grandes Llanuras. Particularidades en la Llanura Pampeana (Argentina), Workshop publication on Groundwater and Human Development, 2025-2038, Mar del Plata, Argentina, 2002.
- Kruse E; JA Forte Lay & JL Aiello. 2006. «Water Table fluctuations: an indicator of hydrological behavior in the northwest region. Proceedings of symposium S3 held during the seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, April 2005, IAHS 306, pp. 91-97.
- Landini, AM; D Martínez; H Días; E Soza, D Agnes & C Sainato. 2007. Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. *Cienc. suelo*, 25(2): 123-131.
- Madramootoo, CA; JW Kaluli & GT Dodds. 1999. Simulating nitrogen dynamics under water table managementsystems with DRAINMOD-N. *Trans. ASAE* 42(4): 965-973.
- Mercau JL; MD Nasetto; F Bert, R Giménez & EG Jobbágy. 2015. Shallow groundwater dynamics in the Pampas: Climate, landscape and crop choice effects. *Agricultural Water Management* 163: 159-168.
- Nash, JE & JE Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A Discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 282-290.

- Nosseto, MD; RA Paez; SJ Ballesteros & EG Jobbágy. 2015. Higher water-table levels and flooding risk under grain vs. livestock production systems in the subhumid plains of the Pampas. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 206: 60-70.
- Nosseto, MD; EG Jobbágy, R Jackson & G Sznajder. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Research*. 113: 138-148.
- Northey, J.; E Christen; JE Ayars & J Jankowski. 2005. Occurrence and measurement of salinity stratification in the shallow ground water in the Murrumbidgee irrigation area, south eastern Australia. *Agric. Water Mgmt.* 81(1 2): 23 40.
- Passioura, JB. 1996. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering. *Agronomy Journal* 88: 690-694.
- Paul, CL & J De Vries. 1979. Effect of soil water status and strength on trafficability. *Canadian J. Soil Sci.* 59(3): 313 324.
- Portela SI; A Andriulo; MC Sasal; B Mary & EG Jobbágy. 2006. Fertilizer vs. organic matter contributions to nitrogen leaching in cropping systems of the Pampas: 15N application in field lysimeters. *Plant and Soil* 289:265-277.
- Portela, SI; A Andriulo; EG Jobbágy & MC Sasal. 2009. Water and nitrate exchange between cultivated ecosystems and groundwater in the Rolling Pampas. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 134: 277-286.
- Salazar O; I Wesstrom & A Joel. 2008. Evaluation of DRAINMOD using saturated hydraulic conductivity estimated by a pedotransfer function model. *Agri. Water Management*. 95: 1135-1143.
- Sanoja, J; RS Kanwar & SW Melvin. 1990. Comparison of simulated (DRAINMOD) and measured tile outflow and water table elevations from two field sites in Iowa. *Trans. ASAE* 33(3): 827-833.
- Santa Cruz, J & AA Silva Busso. 2002. Comportamiento del nivel freáticos ante excesos hídricos en el Oeste de la llanura chacoparanense de la República Argentina. Workshop publication on Groundwater and Human Development, 1472-1483, Mar del Plata, Argentina, 2002.
- Saxton, K & WJ Rawls. 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1569-1578.
- SIIA. (2014). Sistema Integrado de Información Agropecuaria. Ministerio de Agroindustria de la Nación. Obtenido <http://www.siaa.gov.ar>, acceso Junio 2016.
- Skaggs, RW; MA Youssef & GM Chescheir. 2012. DRAINMOD: Model Use, Calibration, and Validation. *Trans. of the ASABE* 55(4): 1509-1522.
- Stone, RJ & El Ekwue. 1993. Maximum bulky density achieved during soil compaction as affected by the incorporation of three organic materials. *Trans. ASAE* 36(6): 1713 1719.
- Travasso, MI & GO Magrin. 1998. Utility of CERES-Barley under Argentine conditions. *Field Crops Research* 57: 329-333.
- USDA. 1987. Farm Drainage in the United States: History, Status, and Prospects. G.A.Pavelis Ed. Economic Research Service. U.S. Department of Agriculture. Miscellaneous Publication No 1455.
- USDA. 2014. Census of Agriculture, United States Department of Agriculture. Online Publications. https://www.agcensus.usda.gov/Publications/2012/Online_Resources/Highlights/Conservation/Highlights_Conservation.pdf Acceso Julio 2016.
- Vazquez Amábile, G & BA Engel. 2008 Fitting of Time Series Models to Forecast Streamflow and Groundwater Using Simulated Data from SWAT. *J. Hydrologic Engrg.* 13(7): 554-562.
- Vázquez Amábile, G; AP Ricca; D Rojas; D Cristos; ML Ortiz de Zarate; G Pellisier; N Bosch; MV Feler; A Rodriguez Vagaría & M.F. Gaspari. 2014. Análisis de agroquímicos y nitratos en cursos y aguas subterráneas de cuencas rurales del oeste y sudeste de Buenos Aires. Memorias del II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Universidad Nacional del Litoral, 23al 26 de Septiembre, Santa Fe, Argentina.
- Viglizzo EF; EG Jobbágy; L Carreño; FC Frank; R. Aragon; L De Oro & V Salvador. 2009 The dynamics of cultivation and floodsHydro. *Earth Syst. Sci.* 13: 491-502.
- Youssef, MA; RW Skaggs; GM Chescheir & JW Gilliam. 2005. The Nitrogen Simulation Model, DRAINMOD-N II. *Trans. ASAE* 48(2): 611-626.