

VARIACIÓN ESPACIAL DE LOS CONTENIDOS HÍDRICOS DEL SUELO EN FUNCIÓN DEL RELIEVE

EUGENIA MARÍA FERNANDA MONTOYA¹, ADRIANA ANAHÍ GILI¹,
MAURICIO FARRELL², ELKE NOELLEMAYER^{1*}

Recibido: 06/10/2016

Recibido con revisiones: 17/01/2018

Aceptado: 17/01/2018

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es aportar la información de base para caracterizar la distribución de la humedad en perfiles de suelos que corresponden a un paisaje típico del norte de La Pampa. Para tal fin se llevó a cabo un muestreo en un lote sembrado con maíz, cercano a Intendente Alvear (La Pampa). Se muestrearon 26 puntos en tres fechas distintas (28/12/2013 cercano a la siembra de maíz, 30/01/2014 durante floración y 06/07/2014 post cosecha). En todos los puntos se midió la humedad del suelo en intervalos de profundidad de 20 cm y hasta una profundidad total de 140 cm. Respecto a las fechas de muestreo, la variación de humedad se vio afectada por el ciclo del cultivo, presentado mayores requerimientos en floración, por ende menor contenido de humedad en el perfil para esta fecha, que se vio más acentuado en los puntos de mayor altimetría. En tanto que la fecha de muestreo siguiente que corresponde a la post-cosecha del cultivo, se produjo una recarga en el perfil que mostró pocas diferencias en la humedad disminuyendo la amplitud entre los bajos y las lomas. La relación humedad-altimetría indicó que los mayores contenidos de humedad se encontraron en los estratos inferiores, siendo mayores en bajas altimetrías. En tanto que los estratos superiores presentaron menor contenido hídrico influenciado por otros factores como extracción por el cultivo y la evaporación.

Palabras clave: Altimetría, profundidades, La Pampa, Maíz

TOPOGRAPHY EFFECT ON THE SPATIAL VARIABILITY OF SOIL MOISTURE CONTENTS

ABSTRACT

The objective of this study was to contribute with basic information of moisture distribution in soil profiles in a typical landscape of the north area of La Pampa province. A field planted with corn, near Intendente Alvear (La Pampa) was sampled at 26 points in three different dates (28/12/2013 near planting, 30/01/2014 during flowering, and 06/07/2014 after harvest). Moisture was measured in depth intervals of 0.2 m to a total depth of 1.4 m. Sampling dates showed that moisture variations were related to the crop phenology, with higher requirements at flowering and consequently lower moisture contents in the soil, more pronounced at the higher parts of the landscape. At the last sampling date, after crop harvest, soil moisture was recharged and fewer differences in moisture were observed with less amplitude between high and low altimetry points. The relationship between moisture and altimetry showed that higher moisture was found at deeper depths. In turn, the more superficial stratum presented lower moisture contents and were more affected by other factors such as crop extraction and evaporation.

Key words: Altimetry, Depth; La Pampa; Corn

1 Facultad de Agronomía, UNLPam, Ruta 35, km 334. C.P.6300 Santa Rosa, L. P. Argentina

2 EEA INTA Anguil "Guillermo Covas", Ruta Nacional 5 km 580, C.P. 6326, Anguil, L.P. Argentina

* Autor de contacto: noellemeyer@agro.unlpam.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La región semiárida pampeana a pesar de contar con poca variabilidad altitudinal se caracteriza por una amplia diferencia de ambientes que no solo están determinados por su posición en el relieve sino también por la interacción entre distintas fuentes de variabilidad que originan diferentes efectos a escala de lote, como es el caso de la heterogeneidad en la distribución de la humedad en los distintos ambientes dentro de un mismo potrero. En esta región se diferencian las unidades geomorfológicas de planicie con tosca y planicie medanosa, dentro de las cuales diferencias en el micro- y meso relieve determinan en gran medida las características de los suelos (INTA *et al.*, 1980). La heterogeneidad de los ambientes conlleva a la variabilidad en las características edáficas y en la productividad de biomasa de sus ecosistemas naturales en general (Solon *et al.*, 2007) y de los cultivos de cosecha específicamente en la región mencionada. Las propiedades edáficas que más varían con el relieve son la textura, y asociado a ella la capacidad de retención de agua (Fernandez *et al.*, 2008; Pachepsky *et al.*, 2006), cualidades que afectan de manera directa la productividad de los cultivos, más aún en regiones con limitantes hídricas. Por este motivo, surge la necesidad de identificar los diferentes ambientes en los paisajes de la región semiárida, determinados principalmente por la topografía y las características edáficas. La diferenciación de ambientes dentro del lote permite su uso diferencial con una adecuada utilización de insumos adaptada a las variables edáficas del paisaje (Gregoret *et al.*, 2006). De esta manera se logrará un uso más eficiente de los recursos (Urricariet *et al.*, 2011). Entre los criterios utilizados para definir diferentes zonas de manejo se destaca la altimetría (Gili *et al.*, 2017; Kravchenko & Bullock, 2000; Tagarakis *et al.*, 2012). Dentro de las distintas zonas de manejo, en general los bajos representan las zonas de alto rendimiento por poseer una mayor retención de agua y de nutrientes (Kumhálová *et al.*, 2011), debido al aporte de materiales por erosión y por escurrimiento. De esta manera, las zonas bajas tienden a tener texturas más finas que las lomas. Estas diferencias texturales afectan la disponibi-

lidad de agua, y determina la distribución de la humedad dentro del potrero (Crow *et al.*, 2008). Sin embargo, no se ha estudiado las características texturales en un paisaje típico de la región semiárida pampeana y la evolución de los contenidos hídricos en los suelos a lo largo de una red de drenaje en las pendientes, a pesar de que esta información resultaría de suma importancia para la definición y delimitación de zonas de manejo homogéneo para el manejo sitio-específico (Roudier *et al.*, 2008). La eficiencia de uso de agua de los cultivos en regiones semiáridas es la clave para el diseño de sistemas de producción sustentables (Noellemeyer *et al.*, 2013), y la estrecha relación entre la textura del suelo y la eficiencia de uso de agua (Katerji & Mastrorilli, 2009) predestina a este parámetro como primordial para la definición de zonas de manejo (Gregory *et al.*, 2000). Por otra parte, los patrones de flujo del agua dentro del suelo y a través del paisaje definen la redistribución del mismo entre los distintos ambientes (Schoeneberger & Wysociki, 2005). Esta redistribución y la resultante variabilidad temporal de los contenidos hídricos de los perfiles aún no han sido estudiadas en la región. Sin embargo, diferencias en los patrones de recarga y ascenso capilar podrían afectar la disponibilidad hídrica para los cultivos, por lo que es importante obtener información sobre la variabilidad temporal y el patrón de distribución de humedad en los perfiles.

El presente trabajo tiene como objetivo aportar la información de base para caracterizar la distribución de la humedad en los perfiles de suelos de los distintos ambientes asociados con las diferencias en altimetría que corresponden a un paisaje típico de la zona norte de la planicie medanosa.

Se plantea como hipótesis que, en la planicie medanosa pampeana, la disponibilidad hídrica para los cultivos depende de la altimetría del perfil del suelo, con mayores contenidos hídricos en los perfiles ubicados en las posiciones bajas del lote agrícola. Las diferencias de humedad entre las posiciones topográficas se acentuarían en épocas de escasa lluvia o de alto consumo del cultivo, mientras que en épocas de recarga las diferencias de humedad entre perfiles de suelos son menores.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se desarrolló en la región planicie medanosa (al Noreste de la Provincia de La Pampa) en el establecimiento "Loma Arisca", en cercanías de la localidad de Intendente Alvear. El lote en el cual se realizaron los muestreos se ubica al NE La Pampa (35° 24' 11" S y 63° 40' 38" O). El mismo presenta una superficie ondulada de 125 ha y la textura es arenosa a franco-arenosa y contenido de materia orgánica es bajo (< 1,5 %) a intermedio (< 2,5%) de acuerdo a su posición en el relieve (A. Quiroga, comunicación personal). Los suelos son Haplustoles énticos o típicos, con suelos más evolucionados en las partes bajas del relieve.

En cuanto a la época de precipitaciones, las mismas ocurren principalmente durante el periodo de primavera-verano, alcanzando niveles de entre 600 y 700 mm anuales. Desde el segundo muestreo hasta el tercer muestreo, los milímetros caídos rondaron en los 600 mm (**Figura 1**), indicando que hubo buenas precipitaciones en dichos meses que coincidieron con el final del ciclo del cultivo, permitiendo la recarga de los perfiles de suelo. Respecto a los vientos, estos predominan del sector NNE y SSO, con mayor intensidad en el periodo de septiembre hasta diciembre.

El lote se ha manejado con una rotación de cultivos de verano (girasol, maíz, sorgo y soja) en

siembra directa durante al menos 10 años. En la campaña 2013/14 el potrero se sembró con un cultivo de maíz en siembra variable. La aplicación variable se determinó por niveles de altimetría del lote, donde para el sitio de menor altimetría la densidad de siembra fue de 115000 plantas, mientras para el sitio de mayor altimetría se utilizaron 75000 plantas.

Se realizó un relevamiento planialtimétrico del todo el establecimiento a través del uso de un GPS topográfico Trimble. Con los datos obtenidos se creó una base de datos con valores X, Y y Z, corregidos por la altura ortométrica. Posteriormente, con el uso del software GV SIG (<http://www.gvsig.org>) se realizó el modelo digital de elevación (MDE) con una resolución espacial de 5m.

Para la realización del MDE se utilizó el método Kriging (Krige, 1951), cuyo método requiere de la estimación de la dependencia espacial mediante la realización de un semivariograma que grafica la correlación espacial entre los datos en función de la distancia entre ellos. (Jounel & Huijbrets, 1978).

Posteriormente se realizaron mapas de flujo de acumulación y pendientes utilizando como fuente de información el DEM generado. Los valores de los mapas obtenidos fueron agrupados en 3 clases (1, 2 y 3) considerando su valor de acuerdo con la incidencia que aporta a los contenidos hí-

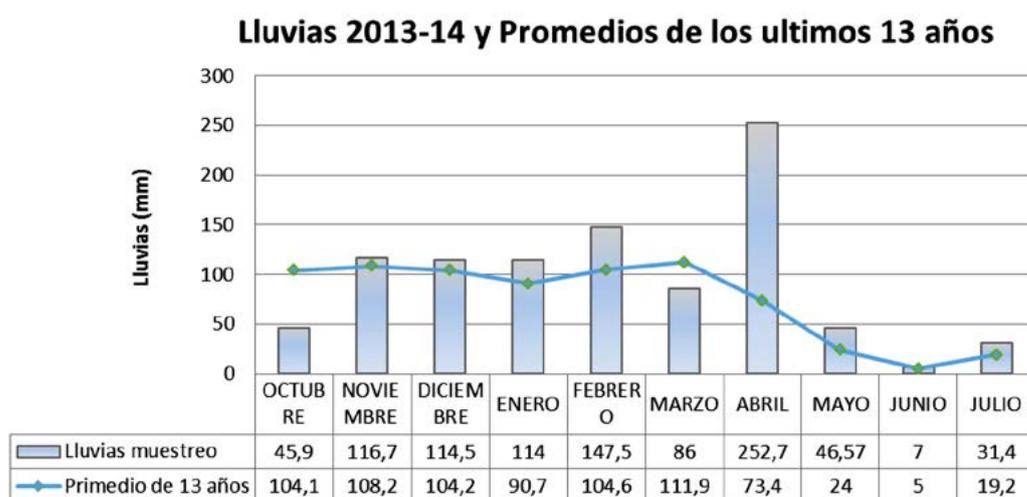


Figura 1. Lluvias correspondientes al periodo que abarcó el muestreo (barras) y los promedios históricos de los últimos 13 años (línea continua).

Figure 1. Rainfall during the experimental period (bars) and the historical averages of the past 13 years (continued line).

dricos del suelo (**Tabla 1**). Por último, se generó un mapa de aptitud hídrica a partir del uso de los mapas previamente reclasificados, utilizando el método de superposición temática de variables, que permite encontrar nuevos límites a partir de la generación de áreas homogéneas.

Estos niveles de aptitud hídrica generados se deben a la variación espacial de los contenidos hídricos considerando diferentes niveles de acumulación de flujos hídricos condicionados por las pendientes. Se determinaron 3 ambientes o sitios con similar aptitud hídrica. La cantidad de ambientes depende de la homogeneidad que cada sitio.

El mapa de aptitud fue la base para generar 3 transectas con puntos de muestreo (28 en total). Los puntos que integran la transecta tienen una distancia promedio de 100 m. y su disposición en el terreno se debe a los diferentes niveles de aptitud hídrica registradas en el mapa. Posteriormente se introdujeron las coordenadas a un GPS navegador para poder llegar al punto de muestreo en ocasiones posteriores.

En cada punto de muestreo se realizaron las siguientes determinaciones: contenido hídrico gravimétrico del suelo a partir de la recolección de muestras tomadas del perfil a distintas profundidades, utilizando el barreno. Las muestras fueron tomadas desde los 0 a 140 cm de profundidad en un intervalo de 20 cm.

Se realizaron 3 muestreos a lo largo del ciclo de un cultivo de maíz en el momento posterior a la siembra (28 de diciembre de 2013) coinci-

diendo con la primera etapa del cultivo (V3-4), alrededor de floración (30 de enero de 2014) y después de la cosecha (6 de julio de 2014).

Para poder realizar un análisis descriptivo, los puntos de muestreo fueron agrupados en 4 categorías distintas que representan diferencias altimétricas de 1 m, considerando diferencias entre los 131 y 134 m de altura sobre el nivel de mar. Se modeló la humedad del suelo como función de la profundidad, la altimetría, la fecha de muestreo y sus interacciones. La estimación de los parámetros se obtuvo a través de mínimos cuadrados generalizados (GLS). Los distintos modelos ajustados se compararon a través del criterio de Akaike (AIC), seleccionando como óptimo el modelo que menor AIC presentó. Se utilizó el programa estadístico InfoStat (Di Rienzo, *et al.*, 2015) y su vínculo con R (R Development Core Team, 2015).

El análisis realizado permitió estudiar la relación entre las variables y ver si la misma presentó diferencias en las distintas fechas. Esto último se realizó a través de contrastes que permiten la comparación de los coeficientes que describen la tasa de cambio (pendiente) entre las distintas fechas.

La heterocedasticidad se modeló a través de una función (identidad) que permitió estimar una varianza distinta para cada fecha. No se modeló la presencia de correlación espacial entre los puntos de muestreo ya que la inclusión de la misma no mejoró el ajuste, pero si fue necesario modelar la presencia de correlación residual, ya que las determinaciones realizadas en cada punto en las distin-

Tabla 1. Descripción de las variables utilizadas para la creación del mapa de aptitud hídrica

Table 1. Variables used for creating the hydraulic aptitude map.

Mapas	Rangos de datos	Características	Reclasificación Nuevo valor	Condición
Altimetría	130 - 133	Altimetría baja	3	Buena
	133 - 135	Altimetría media	2	Regular
	135 - 136	Altimetría alta	1	Mala
Pendientes	0 - 0,5	Escasa pendiente	3	Buena
	0,5 - 0,8	Pendiente media	2	Regular
	0,8 - 1,5	Alta pendiente	1	Mala
Acumulación de flujos	80 - 250	Sitios donde el agua se dispersa	1	Mala
	250 - 1000	Sitios neutros o planos	2	Regular
	1000 - 20000	Sitios donde el agua se acumula	3	Buena

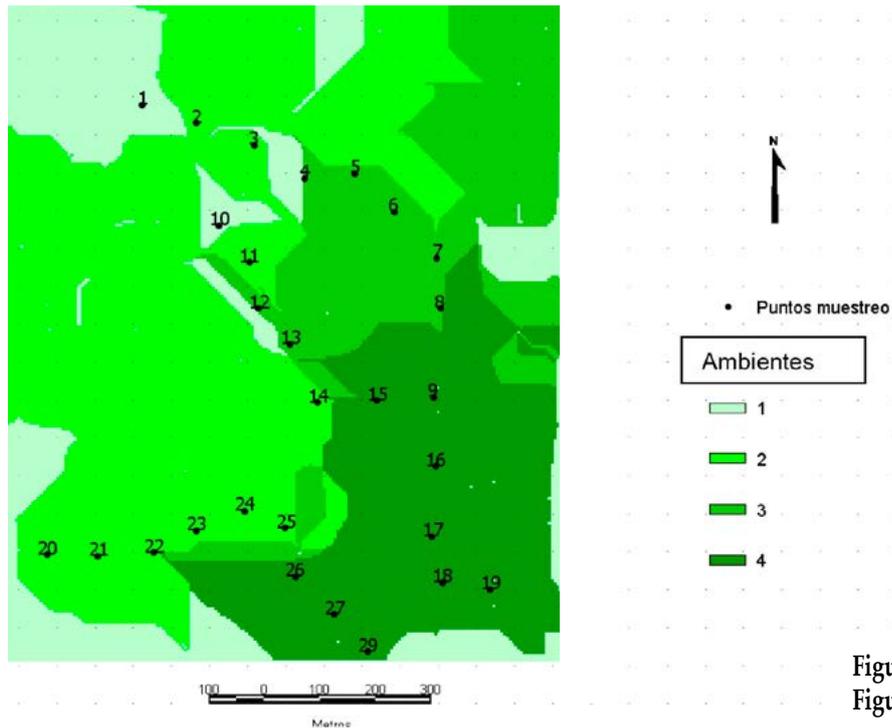


Figura 2. Mapa de puntos de muestreo
Figure 2. Map of the sampling points.

tas profundidades no fueron independientes. Para la modelación de la correlación en profundidad se usó un modelo esférico (sin varianza nugget).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La primera fecha de muestreo (Figura 3) correspondió al momento inmediatamente posterior a la siembra del cultivo de maíz (28/12/2013). Se observó que, todos los puntos presentaron mayor humedad en los estratos superficiales (0-20 y 20-40 cm). A medida que la profundidad aumentó, el comportamiento fue distinto de acuerdo con la altimetría considerada. Los puntos con menor

altimetría, si bien tuvieron contenidos hídricos mayores en todo el perfil de suelo, mostraron una disminución marcada de los contenidos hídricos entre los 40 y 100 cm, a partir de esta última profundidad los contenidos aumentaron y alcanzaron los mismos niveles superficiales. En cuanto a los puntos de mayor altimetría los contenidos hídricos disminuyeron hasta los 60 cm aproximadamente a partir de la cual los mismos se mantuvieron sin grandes variaciones en las profundidades mayores.

En la segunda fecha de muestreo (30/01/2014) que coincidió con el período de floración, los contenidos hídricos totales en todos los puntos fueron

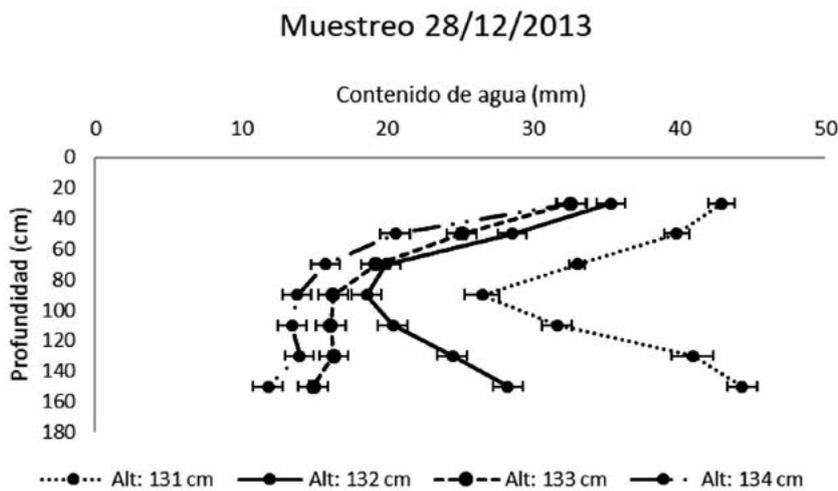


Figura 3. Perfiles hídricos de todos los puntos correspondientes a la primera fecha de muestreo. Se representa la media ± error estándar.

Figure 3. Moisture profiles of all points at the first sampling date. Means and standard errors are represented.

considerablemente menores que en la primera fecha, debido a la exploración y extracción de agua por las raíces del cultivo. En este periodo el consumo diario de agua por parte del maíz es de 7 mm/día aproximadamente (Evans *et al.*, 1996). En esta fecha no se evidenciaron mayores contenidos hídricos superficialmente (**Figura 4**). En los puntos con menor altimetría los contenidos hídricos fueron mayores en todo el perfil en comparación con los puntos con mayor altimetría. Dentro de estos últimos aquellos situados en las zonas más altas (134 m), mostraron los menores contenidos hídricos en superficie en comparación con los puntos que presentaron menor altimetría. Esto se podría atribuir a la evaporación y a la extracción del cultivo, en tanto que en profundidad los contenidos hídricos demostraron una tendencia a disminuir.

En los puntos bajos, la humedad en los estratos superiores fue menor que cuando se consideraron las profundidades mayores. Considerando que es probable que la profundidad de raíces fuera similar en todos los puntos, estos mayores contenidos hídricos a profundidad estarían indicando aportes por flujo subterráneo desde los puntos más altos de las cuencas. Por lo contrario, si se presume que la exploración de las raíces no fue similar en todos los puntos, esto mismo indicaría que en los puntos más bajos altimétricamente las raíces estarían explorando un menor espesor del suelo.

La última fecha de muestreo (06/07/2014) representó la situación de recarga del perfil del suelo (**Figura 5**), ya que el consumo del cultivo fue nulo y las precipitaciones acumuladas fueron elevadas, llovieron en total 306,3 mm entre abril y junio (**Figura 1**). Esto se nota en que todos los

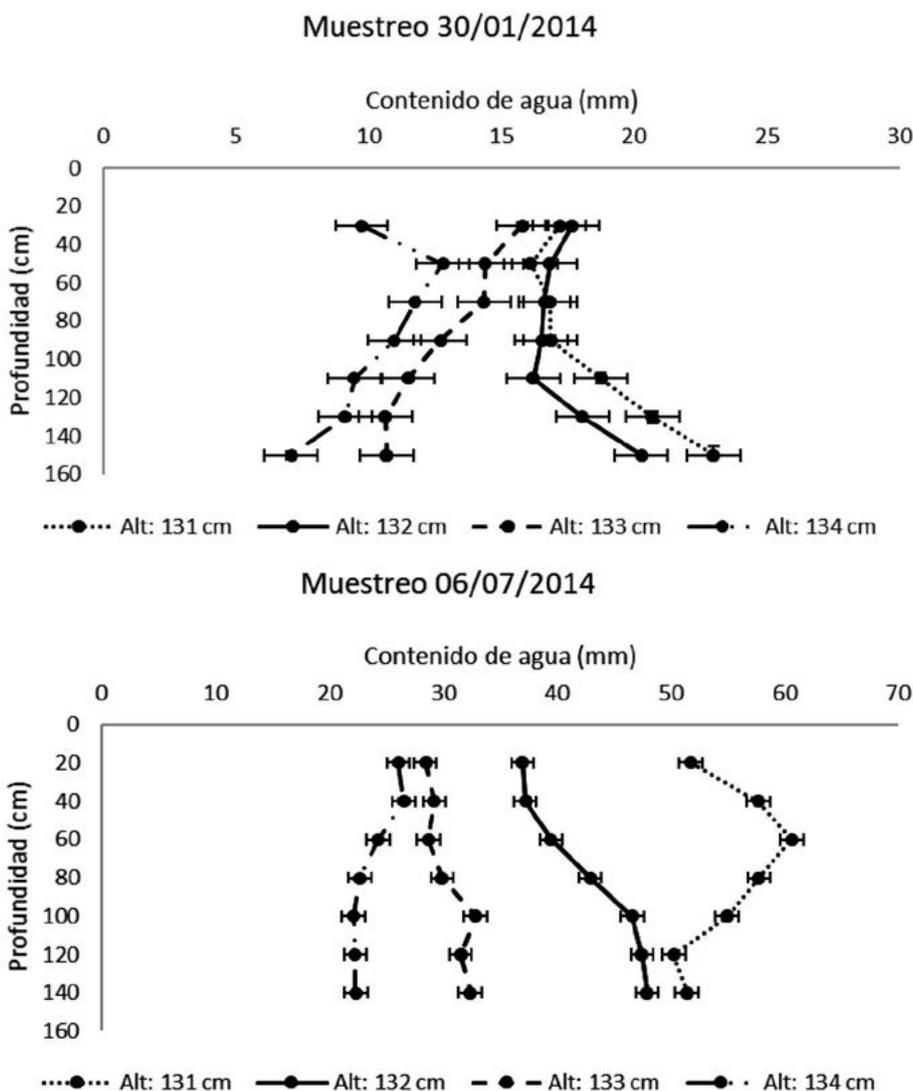


Figura 4. Perfiles hídricos correspondiente a la segunda fecha de muestreo. Se representa la media ± error estándar.
Figure 4. Moisture profiles of all points at the second sampling date. Means and standard errors are represented.

Figura 5. Perfiles hídricos correspondientes a la tercera fecha de muestreo. Se representa la media ± error estándar.
Figure 5. Moisture profiles of all points at the third sampling date. Means and standard errors are represented.

perfiles de esta fecha tenían contenidos hídricos mayores a los de las fechas anteriores, todos superiores a 20 mm por cada 20 cm de profundidad, llegando a máximos de hasta 60 mm por estrato en los puntos más bajos de las microcuencas.

En los puntos con mayor altimetría (134 m) se observaron los menores contenidos de humedad y los mismos no cambiaron marcadamente al variar la profundidad. Similares fueron los contenidos hídricos de los sitios con una altimetría de 133 m, pero en estos casos si se observó mayores contenidos de los mismos en las mayores profundidades. Este último comportamiento se evidenció en los sitios con una altimetría de 132 m, aunque los aumentos con la profundidad fueron más marcados. Los sitios más bajos presentaron un comportamiento distinto al resto ya que los mayores contenidos se mostraron sub-superficialmente y luego disminuyeron con la profundidad.

En general en los puntos con más altimetría los contenidos hídricos fueron menores. Esto podría explicarse por el drenaje hacia puntos bajos y por la mayor tasa de evaporación, ya que en estas posiciones la textura de los suelos generalmente fue más arenosa, presentando mayores proporciones de macroporos. En tanto que los puntos con menos altimetría presentaron más humedad tanto en profundidad como en los estratos superiores, posiblemente resultado del aporte desde posiciones más elevadas del relieve, y menor evaporación debido a texturas generalmente más finas con mayores proporciones de meso- y microporos. La relación positiva entre el relieve y la disponibilidad hídrica ha sido mencionada para los paisajes de la Pampa húmeda (Urricariet *et al.*, 2011), dónde estas diferencias determinaron en forma significativa los rendimientos de maíz.

A partir del modelo ajustado se encontraron diferencias significativas en cuanto a los contenidos medios de humedad de acuerdo a la fecha (p -valor < 0.0001) para altimetría y profundidad promedio. Los mayores contenidos hídricos se evidenciaron en la última fecha de muestreo, seguidos de la primera fecha. La segunda fecha de muestreo fue la que presentó menor contenido promedio de humedad (**Tabla 2**). La mayor variabilidad en los contenidos de humedad del suelo se detectó en el muestreo después de la cosecha, seguida por

la segunda fecha. No se detectó la presencia de variabilidad espacial en los contenidos de humedad entre los puntos de muestreo. Las determinaciones tomadas en cada punto para las distintas profundidades no fueron independientes, el rango estimado de la función esférica usada para modelar la correlación fue de 154.16 cm.

Para las tres fechas de muestreo la relación entre humedad y altimetría fue significativa ($p = 0.0003$, < 0.0001 y < 0.0001 para la primera, segunda y última fecha de muestreo respectivamente). En cuanto a la profundidad no ocurrió lo mismo, solo para las fechas 1 y 3 fue significativa la relación ($p = 0.0001$, 0.5474 y 0.0104 para la primera, segunda y última fecha de muestreo respectivamente). Los coeficientes de las ecuaciones para cada fecha se muestran en la **Tabla 3**.

Tabla 2. Contenidos de humedad promedio (mm) y su error estándar (valor entre paréntesis) en cada fecha de muestreo, considerando profundidad y altimetría promedio.

Table 2. Average soil moisture contents (mm), at each sampling date, considering average depths and altimetry.

Fecha de muestreo	28/12/2013	30/01/2014	06/07/2014
Contenido hídrico promedio (mm)	28,33 b (1,07)	15,54 c (0,85)	38,39 a (1,07)

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Tabla 3. Coeficientes de las ecuaciones que relacionan la humedad del suelo con profundidad y altimetría en cada una de las tres fechas de muestreo y su error estándar (valor entre paréntesis).

Table 3. Coefficients for the equations that determine soil moisture according to depth and altimetry at each of the three sampling dates.

	Intercepta	Profundidad	Altimetría
28/12/2013	937,45ab (247,31)	-0,11b (0,03)	-6,80 ab (1,86)
30/01/2014	610,28 b (110,66)	-	-4,49 a (0,84)
06/07/2014	1478,17 a (155,44)	0,04 a (0,02)	-10,96 b (1,17)

Coefficiente con letra común en la misma columna no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la primera fecha de muestreo por cada incremento de un centímetro de profundidad el contenido hídrico disminuye 0.11 mm. así mis-

mo para cada profundidad por cada centímetro que aumenta la altimetría disminuye 6.8 mm el contenido hídrico.

En la última fecha de muestreo, se detectó que al aumentar en una unidad la profundidad la humedad aumentó 0.04 mm (**Tabla 3**). La tendencia que se encontró con respecto a la altimetría fue la misma en todas las fechas de muestreo sin embargo en la última fecha por cada unidad que aumenta la altimetría el contenido de humedad disminuyó 10,96 mm. Los menores contenidos hídricos se evidenciaron en el muestreo de finales de enero y no se halló asociación de los mismos con la profundidad, pero sí con la altimetría. En el muestreo cercano a la siembra los contenidos de humedad presentaron diferencias de acuerdo con la profundidad considerada y a la altimetría. En la capa superficial se observaron los mayores valores, y a medida que aumentó la profundidad los contenidos hídricos disminuyeron.

En el caso de la primer fecha de muestreo, se podría estipular que existieron bajas reservas de humedad en el suelo, tal vez debido a la baja eficiencia de barbecho que se observa en suelos de esta región (Fernandez *et al.*, 2008), mientras que el aporte de las lluvias más recientes (noviembre y diciembre) se veían reflejadas en mayores contenidos de humedad en superficie. En cambio, en la segunda fecha, todos los perfiles de los suelos fueron muy secos, debido a la extracción del cultivo de maíz que en esta fecha alcanza su máximo desarrollo. En la última fecha se observaron los mayores contenidos hídricos, que fueron muy parejos en todo el perfil de los suelos, lo cual significa que la recarga hídrica llegó hasta la profundidad de 140 cm. Este patrón de distribución de la humedad edáfica estaría indicando que en estos perfiles podría haber pérdidas de agua por drenaje profundo cuando el suelo no está ocupado por vegetación durante el barbecho (Bennie & Hensley, 2001; Nasta & Gates, 2013). Esto también podría explicar en parte los bajos valores de humedad en los estratos más profundos de los suelos a la siembra. Las pérdidas de agua por drenaje profundo aumentan cuando los sistemas de producción utilizan mayores

tiempos de barbecho (Huggins *et al.*, 2001) y disminuyen la eficiencia de uso de agua de los cultivos (Stroosnijder *et al.*, 2012).

El contenido hídrico guardó una relación inversa con el relieve y esta relación fue más marcada (mayor coeficiente en valor absoluto) en invierno con el lote desocupado que en verano con un cultivo de maíz en floración. No se evidenciaron diferencias en los coeficientes asociados a la tasa de variación de la humedad con la altimetría en las dos condiciones con mayor contenido hídrico del suelo.

Los factores que podrían haber incidido para que la relación entre la humedad y la altimetría sea menor (menor pendiente) en la fecha de floración de maíz (**Tabla 3**) serían el consumo del cultivo y la evaporación por mayor demanda atmosférica en verano. El hecho que el coeficiente para altimetría sea mayor en la última fecha sugiere que mientras el lote está ocupado por vegetación en crecimiento la dependencia altimétrica es menor y cuando no existe evapotranspiración de parte de un cultivo esta dependencia adquiere mayor importancia.

CONCLUSIONES

Los contenidos hídricos de los perfiles de suelo variaron en función de la altimetría de los puntos de muestreo, encontrándose elevada humedad en los bajos y menores contenidos hídricos en los puntos de mayor altimetría. Para la correcta estimación de la humedad del perfil del suelo, se debe tener en cuenta el estado fenológico del cultivo.

En lo que respecta a la relación entre la humedad y la profundidad se encontró una relación directa cuando el suelo no contaba con el cultivo e inversa a la siembra. En los estratos inferiores del perfil de los suelos mostraron mayores contenidos hídricos, respecto a los superiores, siendo más marcados en los puntos de bajas altimetrías, durante el período de barbecho.

REFERENCIAS

- Bennie, ATP & M Hensley. 2001. Maximizing precipitation utilization in dryland agriculture in South Africa — a review. *J. Hydrol.* 241: 124–139.
- Crow, W; W Kustas & J Prueger. 2008. Monitoring root-zone soil moisture through the assimilation of a thermal remote sensing-based soil moisture proxy into a water balance model. *Remote Sens. Environ.* 112: 1268–1281. doi:10.1016/j.rse.2006.11.033
- Di Rienzo JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. InfoStat versión 2015. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Fernandez, R; A Quiroga; E Noellemeier; D Funaro; J Montoya, B Hitzmann & N Peinemann. 2008. A study of the effect of the interaction between site-specific conditions, residue cover and weed control on water storage during fallow. *Agr. Water Manag.* 95: 1028–1040. doi:10.1016/j.agwat.2008.03.010
- Gili, A; C Álvarez; R Bagnato & E Noellemeier. 2017. Comparison of three methods for delineating management zones for site-specific crop management. *Comput. Electron. Agric.* 139: 213–223. doi:10.1016/j.compag.2017.05.022
- Gregoret, MC; J Dardanelli; R Bongiovanni & M Díaz-Zorita. 2006. Modelo de respuesta sitio-específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un haplustol. *Ci. Suelo (Argentina)* 24: 147–159.
- Gregory, PJ; LP Simmonds & CJ Pilbeam. 2000. Soil type, climatic regime, and the response of water use efficiency to Crop Management. *Agron. J.* 92: 814–820.
- Huggins, DR; GW Randall & MP Russell. 2001. Subsurface Drain Losses of Water and Nitrate following Conversion of Perennials to Row Crops. *Agron. J.* 93: 477–486.
- INTA, UNLPam, Gobierno de La Pampa. 1980. Inventario de los recursos naturales de la Provincia de La Pampa.
- Journel, AG & CJ Huijbregts. 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press, London, 600 p.
- Katerji, N & M Mastrorilli. 2009. The effect of soil texture on the water use efficiency of irrigated crops: Results of a multi-year experiment carried out in the Mediterranean region. *Eur. J. Agron.* 30: 95–100. doi:10.1016/j.eja.2008.07.009
- Kravchenko, AN & DG Bullock. 2000. Correlation of Corn and Soybean Grain Yield with Topography and Soil Properties. *Agron. J.* 92: 75–83. doi:10.1007/s100870050010
- Krige, DG. 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *J. of the Chem., Metal. Mining Soc. of South Africa* 52 (6): 119–139.
- Kumhálová, J; F Kumhála; M Kroulík & Š Matejková. 2011. The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. *Precis. Agric.* 12: 813–830. doi:10.1007/s11119-011-9221-x
- Nasta, P & JB Gates. 2013. Plot-scale modeling of soil water dynamics and impacts of drought conditions beneath rainfed maize in Eastern Nebraska. *Agric. Water. Manage* 128: 120–130.
- Noellemeier, E; R Fernández & A Quiroga. 2013. Crop and Tillage Effects on Water Productivity of Dryland Agriculture in Argentina. *Agriculture* 3: 1–11. doi:10.3390/agriculture3010001
- Pachepsky, Y; W Rawls & H Lin. 2006. Hydropedology and pedotransfer functions. *Geoderma* 131: 308–316. doi:10.1016/j.geoderma.2005.03.012
- R Development Core Team. 2015. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Roudier, P; B Tisseyre; H Poilvé & JM Roger. 2008. Management zone delineation using a modified watershed algorithm. *Precis. Agric.* 9: 233–250. doi:10.1007/s11119-008-9067-z
- Schoeneberger, PJ & DA Wysocki. 2005. Hydrology of soils and deep regolith: a nexus between soil geography, ecosystems and land management. *Geoderma* 126: 117–128. doi:10.1016/j.geoderma.2004.11.010
- Solon, J; M Degorski & E Roozielinska. 2007. Vegetation response to a topographical-soil gradient. *Catena* 71: 309–320. doi:10.1016/j.catena.2007.01.006
- Stroosnijder, L; D Moore; A Alharbi; E Argaman; B Biazin & E van den Elsen. 2012. Improving water use efficiency in drylands. *Curr. Opin. Environ. Sustainability* 4: 497–506. doi:10.1016/j.cosust.2012.08.011
- Tagarakis, A; V Liakos; S Fountas; S Koundouras & TA Gemtos. 2012. Management zones delineation using fuzzy clustering techniques in grapevines. *Precis. Agric.* 14: 18–39. doi:10.1007/s11119-012-9275-4
- Urricariet, S; M Niborski & CM Kvolek. 2011. Atributos del suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la pampa arenosa. *Ci. Suelo (Argentina)* 29: 49–59.