

DETERMINACIÓN DEL INTERVALO HÍDRICO ÓPTIMO EN USTOLES DE LA REGIÓN SEMIÁRIDA PAMPEANA

ROMINA FERNÁNDEZ^{1*}; ALBERTO QUIROGA¹⁻²; CARLOS LOBARTINI³ & ELKE NOELLEMEYER²

Recibido: 11-11-16

Recibido con revisiones: 31-08-17

Aceptado: 03-09-17

RESUMEN

En la región semiárida pampeana el intervalo hídrico óptimo (IHO) no ha sido utilizado para valorar cambios en la calidad del suelo relacionados al manejo. El objetivo del trabajo fue caracterizar y evaluar el IHO en un suelo bajo uso en vegetación natural con gramíneas perennes (VN) y bajo uso agrícola (A). El estudio se desarrolló en Paleustoles petrocálcicos de la planicie con tosca de la Región Semiárida Pampeana Central. En un suelo VN y otro bajo uso A, y en estrato superior, medio e inferior del perfil respectivamente, se determinó, arcilla, limo, porosidad total, contenido de carbono, nitrógeno y el IHO. El uso A condicionó los valores del IHO en los dos primeros estratos y presentó mayores diferencias entre profundidades con respecto al suelo en VN. Los valores promedios del IHO para el suelo VN fueron 0,14; 0,15 y 0,15 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ y en el suelo A de 0,06, 0,01 y 0,18 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ en estratos superior, medio e inferior respectivamente. En ambos usos, el límite húmedo del IHO fue el contenido hídrico en capacidad de campo. El límite seco en el suelo A lo representó la curva de resistencia a la penetración, en cambio en el suelo VN el límite seco correspondió a la curva de punto de marchitez. Se observó que el IHO correlacionó con carbono y nitrógeno en el estrato superior e inferior, mientras que en el estrato medio del perfil esta relación no fue importante. En general se puede inferir que el intervalo hídrico óptimo fue un indicador sensible que reflejó los cambios en el sistema poroso del suelo bajo el uso agrícola con respecto a un suelo de similar textura bajo vegetación natural.

Palabras clave. Uso del suelo, resistencia a la penetración, densidad aparente, agua disponible.

DETERMINATION OF LEAST LIMITING WATER RANGE IN USTOLLS OF THE SEMIARID PAMPAS

ABSTRACT

The Least Limiting Water Range (IHO) has not been used in the semiarid Pampas to describe the soil quality changes related to management. The objective of this work was to characterize and evaluate the IHO in soils under natural grassland vegetation (VN) and agriculture (A). The study was carried out on petrocalcic Paleustolls in the calcic plains of the central semiarid Pampas. Clay and silt, carbon and nitrogen contents, total porosity and IHO were determined on samples from upper, medium, and lower soil profile layers of a VN and an A soil. Agriculture affected IHO in the upper and medium layer, and showed more differences among layers than VN. Average IHO values for VN were 0.14, 0.15 y 0.15 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, and 0.06, 0.01 y 0.18 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ in the A soil for the upper, medium and lower layers, respectively. In both soils the IHO moist limit was determined by field capacity moisture contents, whereas the dry limit was defined by the penetration resistance curve in A and by the permanent wilting point moisture in VN. A positive relation between IHO and total soil carbon and nitrogen was observed for the upper and lower depth layers, while in the medium depth layer this relationship was not important. In general terms, it is concluded that the Least Limiting Water Range was a sensitive indicator which reflected the changes in the soil porous system under agricultural use compared to a soil with similar texture under natural vegetation.

Key words. Soil use, penetration resistance, bulk density, water availability.

1. INTA Anguil

2. Facultad de Agronomía, UNLPam

3. Departamento Agronomía, UNSur

* Autor de contacto: fernandez.romina@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

Los indicadores de calidad física de suelos más utilizados, tales como densidad aparente, resistencia a la penetración, porosidad total y agua disponible no alcanzan a representar la estructura edáfica en sus aspectos funcionales (Hagan *et al.*, 1959; Benjamin *et al.*, 2003). El concepto de agua útil propuesto por Veiheymeyer & Hendrickson (1931) describe el agua comprendida entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente, y presume que el agua se encuentra totalmente disponible para los cultivos (Kirkham, 2005). Este concepto está basado en la energía potencial del agua en el suelo y no considera otras propiedades físicas que afectan la absorción del agua por las raíces de las plantas (Asgarzadeh *et al.*, 2010). Escaso suministro de oxígeno, baja conductividad hidráulica, alta resistencia a la penetración afectan el crecimiento de las raíces y por ende inciden sobre la absorción de agua (Letey, 1985; Da Silva *et al.*, 1994). En tal sentido existe controversia sobre la definición del agua útil (Hagan *et al.*, 1959), ya que según lo expresó Letey (1985), el crecimiento del cultivo se puede ver afectado antes de que el agua del suelo alcance el punto de marchitez permanente.

El intervalo hídrico óptimo (IHO) ha sido propuesto como una variable integradora que refleja la influencia del agua edáfica y algunas propiedades físicas sobre el crecimiento de los cultivos (Letey, 1985; Da Silva *et al.*, 1994; Topp *et al.*, 1994; Leão *et al.*, 2006) y fue más sensible que el contenido de agua útil para detectar la degradación estructural de los suelos (Asgarzadeh *et al.*, 2010; Benjamin & Karlen, 2014). Este indicador tendría la potencialidad de identificar las condiciones físicas que afectan la funcionalidad de los procesos físicos, químicos y biológicos. El IHO se define como el rango de agua del suelo en el cual el crecimiento de las plantas no se encuentra limitado por el potencial agua (-0,03 MPa a -1,5 MPa), por la aireación (> de 10% de macroporos), ni por la resistencia a la penetración (< 2 MPa) (Da Silva *et al.*, 1994). El IHO está delimitado por el suministro de oxígeno en el límite húmedo y/o por el suministro de agua o la resistencia mecánica en el límite seco. En un suelo compactado, Boone *et al.* (1987) demostraron que las restricciones al crecimiento de las plantas por excesiva resistencia o reducida difusión de oxígeno fueron dependientes de la variabilidad del agua disponible. Tormena *et al.* (1998) encontraron que menores IHO se relacionaron con alta resistencia a la penetración. El IHO ha sido identificado como un indicador más sensible que la densidad aparente y el agua disponible para detectar, describir y cuantificar los efectos de las variacio-

nes en la estructura del suelo sobre las limitaciones físicas para el crecimiento de las plantas (Letey, 1985; Da Silva *et al.*, 1994; Tormena *et al.*, 1998; Lapen *et al.*, 2004; Leao *et al.*, 2006). Cuando aumenta la compactación, el IHO disminuye, siendo la resistencia a la penetración el factor más limitante para el crecimiento de las raíces (Da Silva *et al.*, 1994). Se ha comprobado que el IHO fue influenciado por el contenido de materia orgánica, la estructura y la composición granulométrica de los suelos, como también por la biomasa aérea y de raíces producida por los distintos cultivos de la rotación (Da Silva *et al.*, 1994; Da Silva & Kay, 1997; Kay *et al.*, 1997; Stirzaker, 1997; Benjamin *et al.*, 2003; Pilatti *et al.*, 2012; Benjamin *et al.*, 2013; Benjamin & Karlen, 2014; Imhoff *et al.*, 2016; Tormena *et al.*, 2016). Sin embargo el IHO no brinda información acerca de la captación y transmisión del agua en el suelo, por lo que Pilatti & Orellana (2012) proponen incorporar a los estudios propiedades físico-hídricas tales como conductividad hidráulica e infiltración.

En la Argentina, este indicador ha sido estudiado en suelos de la región pampeana húmeda (Wilson & Cerana, 2004; Imhoff *et al.*, 2006; Uberto, 2008; Damiano & Moschini, 2011; Minetti, 2012; Pilatti *et al.*, 2012) con resultados promisorios, ya que fue lo suficientemente sensible para detectar diferencias entre manejos y condiciones climáticas. Aunque Imhoff *et al.* (2016) señalan que existe poca información acerca de las relaciones entre el IHO e indicadores de compactación en suelos de la Argentina.

Específicamente, en la región semiárida pampeana este indicador no ha sido utilizado para valorar cambios en la calidad del suelo influenciados por el manejo.

Se planteó como hipótesis que el intervalo hídrico óptimo sería un indicador sensible que refleja los cambios en el sistema poroso del suelo bajo el uso agrícola en Paleustoles, sobre todo por el efecto de la compactación en el límite seco. Por lo cual, el objetivo fue caracterizar y evaluar el intervalo hídrico óptimo en suelos bajo uso agrícola y en suelos bajo vegetación natural con gramíneas perennes de la región semiárida pampeana.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló sobre Paleustoles petrocalcicos (USDA NRCS, 2014a) ubicados en el sur de la planicie con tosca de la región semiárida pampeana (Fig 1).

Se seleccionaron 2 suelos por diferencias en las prácticas de producción, uno de ellos con vegetación de gramíneas permanentes y el otro en agricultura, ambos por más de 50 años.

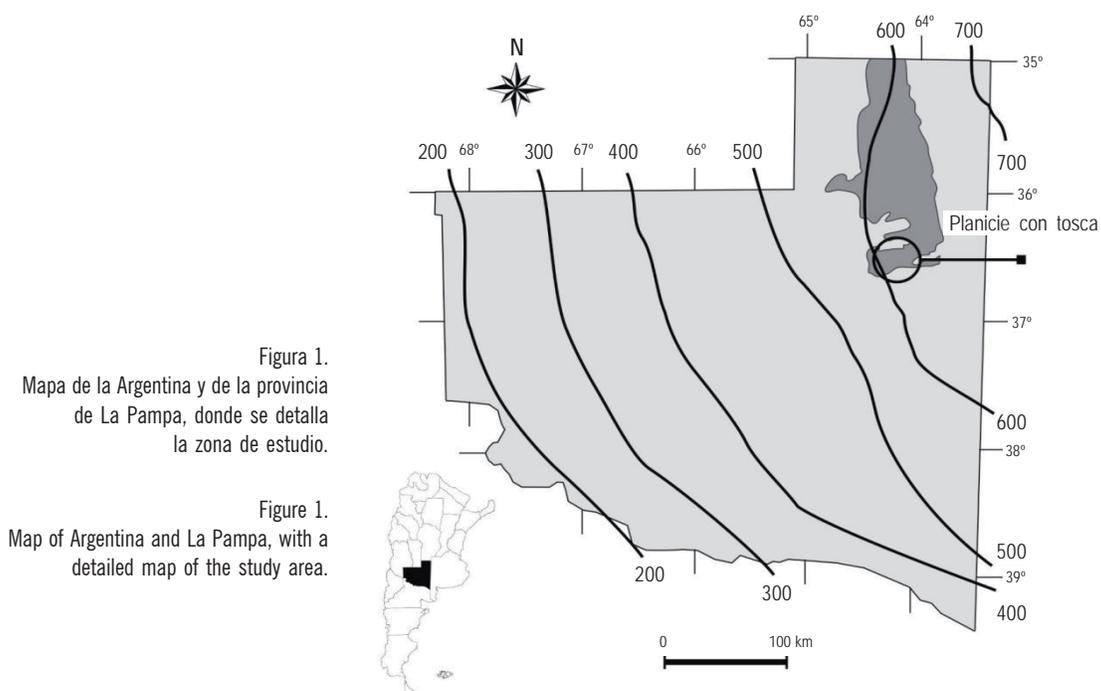


Figura 1.
Mapa de la Argentina y de la provincia
de La Pampa, donde se detalla
la zona de estudio.

Figure 1.
Map of Argentina and La Pampa, with a
detailed map of the study area.

El suelo con vegetación de gramíneas permanentes (VN), de pastizales naturales presentó *Stipa tenuis*, *Poa ligularis*, *Bromus brevis*, *Piptochaetium napostaense* y se encuentra localizado en las coordenadas 36°25'03.67''S, 64°03'08.55''O a 164 m sobre el nivel del mar. El suelo agrícola (A) localizado en las coordenadas 36°25'37.87''S, 64°02'27.51''O a 164 m sobre el nivel del mar, fue utilizado en siembra directa no continua que alternó con labranza de discos, y los cultivos más frecuentes fueron trigo (*Triticum aestivum*), girasol (*Helianthus annuus*), maíz (*Zea mays*), sorgo (*Sorghum bicolor*), cebada (*Hordeum vulgare*).

En cada suelo se muestrearon tres perfiles equidistantes 10 metros cada uno. En cada perfil fueron considerados tres estratos, estrato superior a 0-6 cm de profundidad relacionado con la captación del agua de las precipitaciones, estrato medio a 18-23 cm de profundidad donde mayormente ocurren las densificaciones de suelo y estrato inferior a 40-46 cm de profundidad que representaría las características del material parental ya que corresponde al horizonte C. Se extrajeron muestras disturbadas de los tres estratos y sobre suelo seco al aire y tamizado por 2 mm, se determinaron las siguientes variables:

- Contenido de arcilla y limo mediante el método de la pipeta de Robinson (Gee & Bauder, 1986) y contenido de arena por tamizado. En cada perfil de suelo se tomó una muestra, compuesta de 3 submuestras por estrato.
- Contenido de carbono y nitrógeno total por combustión seca (LECO Truspec™). En cada perfil de suelo se tomaron 2 mues-

tras compuestas de 3 submuestras por cada estrato de profundidad.

- La curva de retención hídrica se determinó mediante la mesa de tensión y el equipo de tensión de Richard (Klute & Klute, 1986). En cada perfil de suelo se extrajeron 5 cilindros de acero inoxidable de 6 cm de diámetro por 5 cm de altura, por estrato de profundidad. Las muestras en los cilindros fueron saturadas por capilaridad y cada cilindro fue calibrado a una tensión diferente: 5, 10, 33, 100, 500 KPa. Para la determinación del contenido de agua en 5 y 10 KPa se utilizó una mesa de tensión formada por una capa de arena de 8 cm de espesor sobre la cual se colocaron los cilindros. Para la determinación del contenido de agua a 33, 100, 500 y 1500 KPa se utilizó un equipo de olla de presión y placas cerámicas. Para la determinación del contenido de humedad a 1500 KPa se utilizó muestra disturbada, tamizada por 2 mm. Una vez alcanzado el equilibrio, las muestras fueron pesadas y a cada cilindro se le registraron 3 lecturas de resistencia a la penetración con penetrómetro digital de laboratorio de 60° de ángulo de cono y 4,9 mm de diámetro basal (Bradford, 1980). Luego, las muestras se secaron en estufa a 105 °C hasta peso constante a fin de determinar el contenido de agua y la densidad aparente (Black & Hartge, 1986) a cada potencial mátrico de la curva de retención hídrica.
- De cada cilindro se calculó la porosidad total (PT) considerando el contenido de humedad de la muestra de suelo saturada (P_{hs}) y la muestra de suelo seco (P_s), de acuerdo con la siguiente ecuación, PT: $((P_{hs}-P_s)/P_s) * 100$.

Para determinar el IHO es necesario obtener curvas de retención de agua, de resistencia a la penetración y de porosidad de aireación (Tormena *et al.*, 1998). Estas curvas se obtienen a través de expresiones matemáticas denominadas funciones de pedotransferencia, que permiten relacionar diferentes características y propiedades de los suelos (Bouma & Van Lanen, 1987).

El ajuste de la curva de retención por medio del procedimiento descrito por Da Silva *et al.* (1994) permite incorporar la densidad aparente (DA) para estimar la humedad del suelo. De tal manera que se utilizó la ecuación 1 mediante un algoritmo simplificado desarrollado en hoja de cálculo Excel (Leao & Da Silva *et al.*, 2004) para estimar los contenidos de agua en capacidad de campo a 33 KPa (curva de CC) y punto de marchitez permanente a 1500 KPa (curva de PMP).

Ecuación 1:

$$\theta: \exp^{(d+e*DA)} * (\psi^f)$$

θ : contenido volumétrico de agua ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

DA: densidad aparente (g cm^{-3}).

ψ : potencial (KPa).

d, e, f: Son los parámetros de ajuste de la curva de retención hídrica del suelo

La resistencia a la penetración es influenciada por la DA y el contenido de agua del suelo (θ) por lo que una relación funcional entre resistencia a la penetración, DA y θ puede ser identificada como curva de resistencia del suelo (RP) (Da Silva & Kay, 1997; Tormena *et al.*, 1998). Esta curva fue ajustada por medio de un modelo no lineal propuesto por Busscher (1990) adoptando los procedimientos descritos por Da Silva *et al.* (1994). Para determinar el contenido hídrico del suelo en el que se alcanza un valor de resistencia a la penetración de 2 MPa considerado restrictivo para el crecimiento de las raíces (Taylor *et al.*, 1966) se utilizó la ecuación 3.

Ecuación 2:

$$\text{RP}: a \theta^b \text{DA}^c$$

Ecuación 3:

$$\theta: (\text{RP}/(a*DA^c))^{1/b}$$

RP: resistencia a la penetración (MPa).

θ : contenido volumétrico de agua ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

DA: densidad aparente (g cm^{-3}).

a, b, c son los parámetros de ajustes de la curva de resistencia a la penetración.

El contenido hídrico del suelo comprendido a 10% de porosidad de aireación, considerado adecuado para los cultivos, se determinó por medio de la ecuación 4.

Ecuación 4:

$$\theta_{PA} : [(1-DA/DP)-0,10]$$

DA: densidad aparente (g cm^{-3})

DP: densidad de las partículas (g cm^{-3})

DP= 2,65 g cm^{-3}

El IHO se calculó según la metodología propuesta por Da Silva *et al.* (1994) a partir de la diferencia entre el límite superior (definido como el menor valor entre las curvas de CC y PA) y el límite inferior (definido como el mayor valor entre las curvas de PMP y RP) para cada valor de DA.

Los resultados de carbono, nitrógeno e IHO se analizaron estadísticamente mediante ANOVA y las diferencias entre medias a través del test de Tukey ($p < 0,10$). Además se utilizó análisis multivariado en el programa InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2013), para obtener una representación gráfica de las variables edáficas en el plano de las dos primeras componentes principales.

RESULTADOS

La clase textural de los suelos fue relativamente homogénea y varió entre franco y franco arenoso (Tabla 1). El contenido de carbono y nitrógeno fue menor en suelo agrícola con respecto al suelo en vegetación natural, y disminuyó con la profundidad del perfil.

Los parámetros de ajuste obtenidos de las curvas de retención hídrica del suelo tomaron diferentes valores entre estratos para un mismo suelo como también entre usos (Tabla 2). Los parámetros "d" y "e" tuvieron mayor rango en el estrato superior que en los estratos medio e inferior, en cambio el parámetro "f" presentó mayor valor negativo en profundidad. En general, las ecuaciones obtenidas dieron como resultado un ajuste aceptable con R^2 entre 40 y 90% en vegetación natural y entre 50 y 86% bajo uso agrícola.

Los coeficientes de ajuste del modelo de RP (Ecuación 2) se presentan en la Tabla 3. Los coeficientes de la densidad aparente ("a" y "c") presentaron valores positivos mientras que el coeficiente de humedad "b" tuvo valores negativos, por lo cual se afirma que la resistencia a la penetración varió positivamente con la densidad aparente y negativamente con los contenidos de agua. Los R^2 obtenidos se encontraron entre 49 y 95% en vegetación natural y entre el 51 y 87% para el uso agrícola.

Tabla 1. Caracterización de los suelos bajo vegetación natural (VN) y agrícola (A). Letras distintas indican diferencias significativas entre usos para el mismo estrato. Porosidad total (PT), densidad aparente (DA).

Table 1. Soil characterization under natural vegetation (VN) and agriculture (A). Different letters indicate significant differences between soil uses for the same depth layer. Total porosity (PT), bulk density (DA).

Uso	Estrato	Secuencia de horizontes	Espesor de horizontes	A+L (%)	Carbono (g kg ⁻¹)	Nitrógeno (g kg ⁻¹)	PT (%)	DA (g cm ⁻³)
VN	Superior	A	0-17	50,3	69,2 A	7,4 A	68	0,85
	Medio	AC	18-40	39,1	7,9B	0,9 A	56	1,10
	Inferior	C	40-80	37,5	4,7 B	0,4 B	48	1,13
		Ckm	80+					
A	Superior	A	0,15	58	14,0 B	1,4 B	46	1,22
	Medio	AC	15-40	57,9	9,3 A	0,8 A	39	1,24
	Inferior	C	40-70	56,1	7,7 A	0,6 A	50	1,11
		Ckm	70+					

Tabla 2. Parámetros de ajuste de la curva de retención hídrica del suelo.

Table 2. Parameters of fit for the water retention curve.

Parámetros	Estrato superior	
	A	VN
d	-7,79	-1,88
e	4,80	0,11
f	-0,15	-0,15
R²	79	82
	Estrato medio	
	A	VN
d	-1,77	-2,92
e	-0,09	0,64
f	-0,16	-0,23
R²	67	87
	Estrato inferior	
	A	VN
d	-2,72	-3,15
e	0,28	0,25
f	-0,30	-0,37
R²	77	78

Tabla 3. Parámetros de ajuste de la curva de resistencia a la penetración.

Table 3. Parameters of fit for the penetration resistance curve.

Parámetros	Estrato superior	
	A	VN
a	0,14	1,02
b	-0,69	-0,23
c	7,10	1,63
R²	51	49
	Estrato medio	
	A	VN
a	0,13	0,12
b	-1,17	-0,62
c	5,67	4,73
R²	87	72
	Estrato inferior	
	A	VN
d	0,21	0,04
e	-0,94	-1,20
c	-0,57	4,43
R²	71	95

Suelo bajo vegetación natural

En el estrato superior, medio e inferior del perfil del suelo en VN, mayores valores en la DA resultaron en incrementos en la curva de RP y disminución en la de PA, mientras que las curvas hídricas se mantuvieron estables (Fig 2a,b y c, respectivamente). El límite superior del IHO para los tres estratos fue la curva de CC, y el límite inferior estuvo representado por la curva de PMP en los estratos superior y medio, en cambio en el estrato inferior la curva de RP

representó el límite inferior. Con mayores valores en la DA, el IHO se mantuvo estable en el estrato superior (Fig 3a), aumentó en el estrato medio (Fig 3b) y disminuyó en el estrato inferior (Fig 3c).

Suelo bajo uso agrícola

En el estrato superior del suelo A mayores valores en la DA incrementaron en mayor grado la RP y dieron lugar a disminución en la PA (Fig 4a). La curva de RP, fue el límite

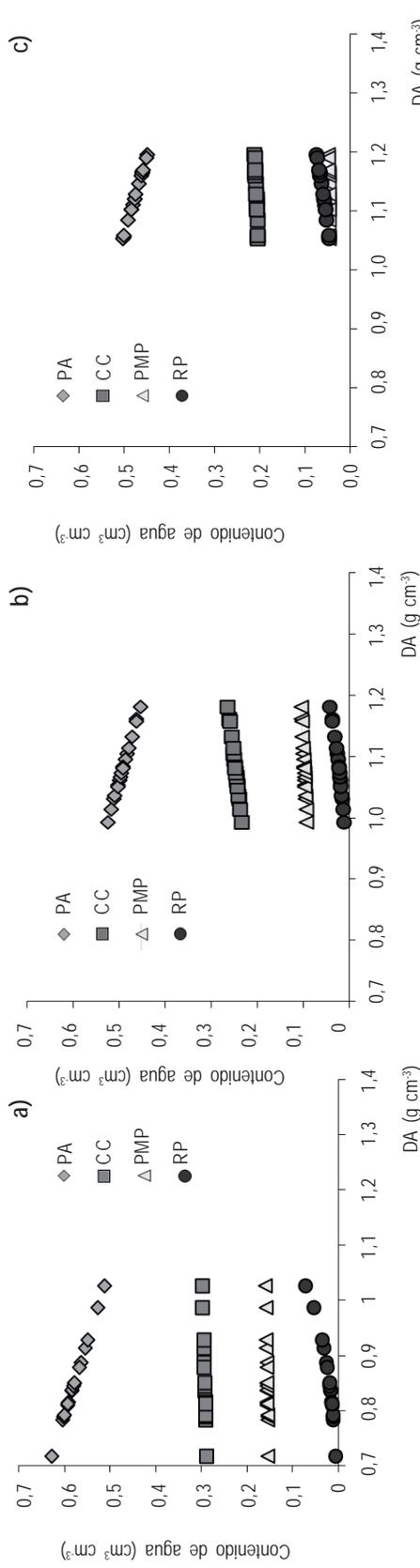


Figura 2. Variación del contenido hídrico volumétrico con la densidad aparente, curvas de porosidad de aireación (PA), capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y resistencia a la penetración (RP), en un suelo bajo uso en vegetación natural en estrato a) superior, b) medio y c) inferior.
 Figure 2. Variation of soil volumetric moisture contents with bulk density (DA), air-filled pore space (PA), field capacity (CC), permanent wilting point (PMP), and penetration resistance (RP) in a soil under natural vegetation in upper (a), medium (b), and lower (c) depth layers of the profile.

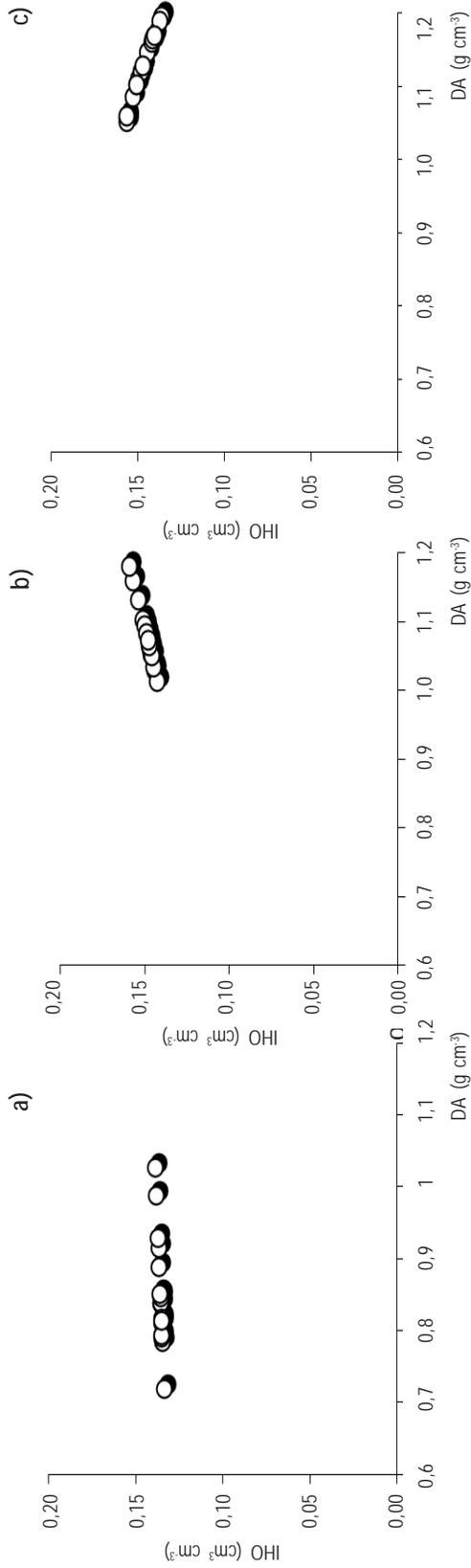


Figura 3. Variación del intervalo hídrico óptimo (IHO) en función de la densidad del suelo bajo uso en vegetación natural en estrato a) superior, b) medio y c) inferior del perfil de suelo.
 Figure 3. Variation of the least limiting water range (IHO) as function of bulk density (DA) in a soil under natural vegetation in upper (a), medium (b), and lower (c) depth layers of the profile.

inferior del IHO a partir de $1,17 \text{ g cm}^{-3}$. En el estrato medio del perfil la curva de RP y PA mostraron similar comportamiento que en el estrato superior ante incrementos en la DA, mientras que la curva de CC y PMP se mantuvieron relativamente constantes (Fig 4b). El límite inferior del IHO para todas las DA medidas fue la curva de RP. En el estrato inferior del perfil, a medida que la DA aumentó, las curvas de CC, PMP y RP se mantuvieron relativamente constantes, aunque el límite inferior del IHO para cada densidad aparente estuvo dado por la curva de RP y no por el contenido hídrico en PMP (Fig 4c). La relación funcional entre el IHO y la densidad del suelo se presenta en la Figura 5. En el estrato superior (Fig 5a) el IHO se relacionó positivamente con la DA hasta $1,15 \text{ g cm}^{-3}$ y negativamente para valores superiores. Para el estrato medio del perfil (Fig 5b), el IHO se relacionó negativamente con la DA y valores superiores a $1,22 \text{ g cm}^{-3}$ de DA definido como densidad crítica (Tormena *et al.*, 1999) condujo a contenidos de IHO de $0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

En el estrato inferior del perfil (Fig 5c) el IHO aumentó con la densidad del suelo, registrándose el valor máximo en $1,32 \text{ g cm}^{-3}$.

Bajo uso agrícola y en los tres estratos considerados se comprobó que el límite superior del IHO fue el contenido hídrico en CC, no obstante, la tendencia en algunos estratos fue a una importante disminución en la curva de PA.

Comparación del IHO entre suelos en vegetación natural y agrícola.

Los valores promedios del IHO se muestran en la Figura 6. El uso A condicionó los valores del IHO en los dos primeros estratos y presentó mayores diferencias entre profundidades con respecto al suelo en vegetación natural. En el estrato superior los rangos del IHO fueron $0,03$ a $0,08 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ bajo uso A y $0,13$ a $0,14 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en VN. En el estrato medio también se comprobó el efecto del uso del suelo sobre el IHO, con un rango en suelos A de $0,00$ a $0,05 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ y en VN de $0,14$ a $0,17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

El suelo bajo uso VN presentó pocas diferencias entre los tres estratos evaluados. En cambio bajo uso A mayores valores de IHO se obtuvieron en el estrato inferior con respecto a los dos superiores.

Relación entre el IHO y propiedades edáficas influenciadas por distintas prácticas de uso

La relación entre el IHO y la densidad aparente dependió principalmente del uso del suelo pero también del

estrato evaluado. En suelo bajo VN el IHO no se relacionó con los valores obtenidos de DA, ya que el estrato superior presentó menores valores de DA con respecto a los estratos medio e inferior, pero los IHO fueron similares entre sí. En cambio, el uso agrícola se comportó de manera diferente: los valores de DA presentaron menor amplitud que en VN, pero los valores del IHO por estrato fueron muy distintos, en el estrato medio fueron bajos, mientras que los obtenidos en el estrato inferior fueron altos, y similares a los hallados en el uso VN.

La matriz de correlación entre el IHO con variables relacionadas a la compactación y fertilidad del suelo se presenta en la Tabla 4. En términos generales, para el estrato superior se observó que el carbono (C), nitrógeno (N) y arena fina ($50\text{-}250 \mu\text{m}$) fueron las variables que influenciaron positivamente sobre IHO, mientras que los contenidos de arcilla, limo y en menor medida la DA presentaron relación negativa. En el estrato medio, la porosidad total (PT), arena fina y arcilla presentaron las relaciones más altas, comprobándose menores valores del IHO a mayores contenidos de arcilla. En el estrato inferior, las variables que más se relacionaron con el IHO fueron limo, arcilla, C, N y PT, mientras que arena fina y DA influenciaron negativamente.

La Figura 7 muestra la distribución de los sitios evaluados en el plano de las dos primeras componentes principales para los estratos superior, medio e inferior. Para el

Tabla 4. Coeficientes de correlación en estratos superior, medio e inferior bajo uso agrícola y vegetación natural, para las relaciones entre el intervalo hídrico óptimo (IHO) y carbono (C), nitrógeno (N), densidad aparente (DA), porosidad total (PT), arcilla (Ar), limo (li) y arena fina (AF).

Table 4. Correlation coefficients in upper, medium and lower depth layers in agricultural and natural vegetation soil profiles for relationships between the least limiting water range (IHO) and carbon (C), nitrogen (N), bulk density (DA), total porosity (PT), clay (Ar), silt (Li) and fine sand (AF).

Estrato	IHO		
	Superior	Medio	Inferior
Variables			
C	0,98	-0,83	0,99
N	0,98	0,33	0,95
DA	-0,99	-0,97	-0,55
PT	1,00	1,00	0,91
Ar	-0,91	-0,99	0,99
Li	-1,00	-1,00	1,00
AF	0,99	1,00	-1,00

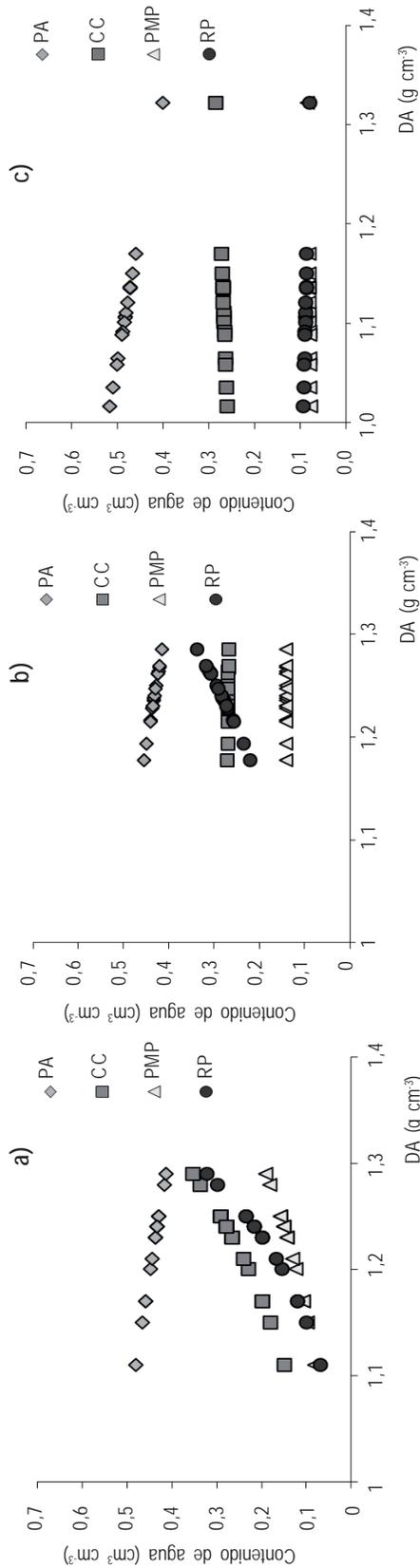


Figura 4. Variación del contenido hídrico volumétrico con la densidad aparente, curvas de porosidad de aireación (PA), capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y resistencia a la penetración (RP), en suelo bajo uso agrícola en estrato a) superior, b) medio y c) inferior.

Figure 4. Variation of soil volumetric moisture contents with bulk density (DA), air-filled pore space (PA), field capacity (CC), permanent wilting point (PMP), and penetration resistance (RP) in a soil under agriculture in upper (a), medium (b), and lower (c) depth layers of the profile.

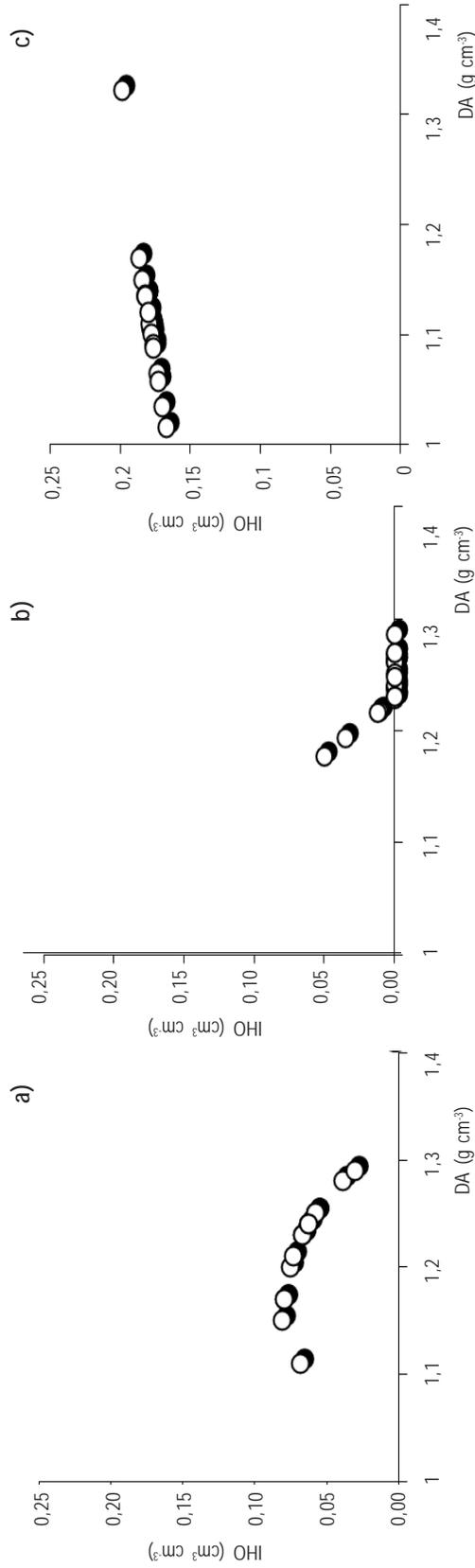


Figura 5. Variación del intervalo hídrico óptimo (IHO) en función de la densidad aparente del suelo bajo uso agrícola en estrato a) superior, b) medio y c) inferior del perfil de suelo.

Figure 5. Variation of the least limiting water range (IHO) as function of bulk density (DA) in a soil under agriculture in upper (a), medium (b), and lower (c) depth layers of the profile.

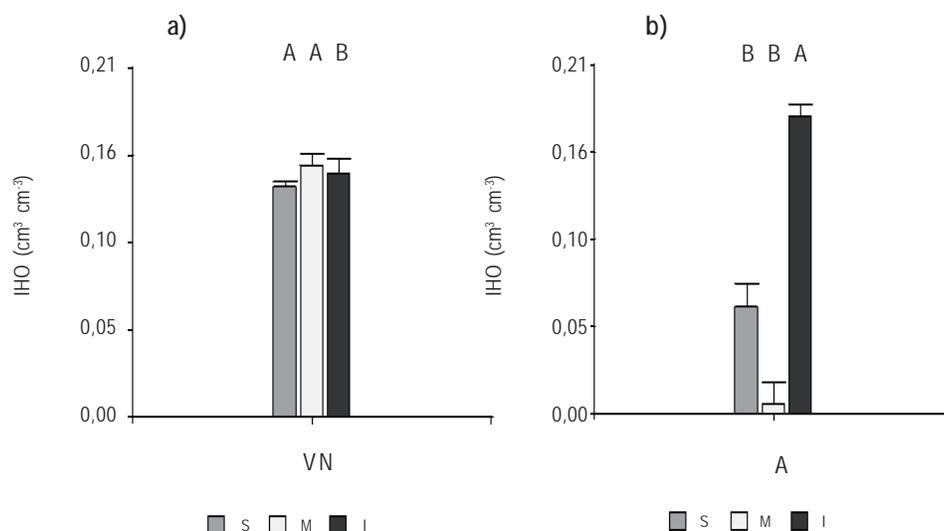


Figura 6. Intervalo hídrico óptimo (IHO) en estrato superior (S), medio (M) e inferior (I), para suelos bajo uso a) vegetación natural y b) agrícola. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre uso para el mismo estrato.

Figure 6. Least limiting water range (IHO) in upper (S), medium (M) and lower (I) depth layers of profile for a) natural vegetation and b) agriculture soils. Letters indicate statistically significant differences between soil uses for the same depth layer.

estrato superior la componente principal 1 explicó el 96,5% de la variabilidad y la componente principal 2 el 3,2%, resultando en un 99,7% de la variabilidad total de los datos (Fig 7a). Las variables que definieron positivamente la componente 1 fueron IHO, PT, C, N y arena fina, mientras que las variables que estuvieron asociadas negativamente fueron DA, arcilla y limo. Para la componente principal 2 se encontró una relación positiva con arcilla.

En el estrato medio (Fig 7b) la componente principal 1 explicó el 84,3% de la variabilidad y la componente principal 2 el 14,3%, resultando en un 98,6% de la variabilidad total de los datos. Las variables que definieron positivamente la componente 1 fueron C, arcilla, limo y DA, mientras que aquellas que estuvieron asociadas negativamente fueron IHO, PT y arena fina. Para la componente principal 2 se encontraron relaciones positivas con N y en menor medida con C.

En estrato inferior (Fig 7c) la componente principal 1 explicó el 88,8% de la variabilidad y la componente principal 2 el 9,5%, resultando un 98,3% de la variabilidad total de los datos. Las variables que definieron positivamente la componente 1 fueron DA y arena fina y negativas IHO, C, N, PT, arcilla y limo. La componente principal 2 se relacionó DA.

Las variables que más se relacionaron en el uso A, en estrato superior y medio del perfil, fueron los contenidos

de limo y DA, mientras que en VN fueron el IHO, y la PT. En cambio en estrato inferior el uso A se relacionó mayormente con el IHO, C y N, mientras que VN se asoció con arena fina.

DISCUSIÓN

En el suelo A los valores del IHO representan un 52 y 96% menos para los estratos superior y medio respectivamente, en cambio, en el estrato inferior el IHO fue un 22% mayor con respecto a VN. Los valores del IHO obtenidos en este estudio se encuentran dentro de los rangos reportados por la bibliografía en suelos de distinta composición granulométrica. En suelos arcillosos se han obtenido valores entre 0-0,17 cm³ cm⁻³ (Cecagno *et al.*, 2016), 0-0,14 (Lima *et al.*, 2012) y 0-0,11 cm³ cm⁻³ (Tormena *et al.*, 1999); en suelo franco arcillosos 0,03-0,11 cm³ cm⁻³ (Safadoust *et al.*, 2014), franco limosos 0-0,19 cm³ cm⁻³ (Minetti, 2012), 0,11-0,18 cm³ cm⁻³ (Pilatti & Orellana 1993) y 0,15-0,20 cm³ cm⁻³ (Damiano & Moschini, 2011), francos 0,-0,17 cm³ cm⁻³ (Imhoff *et al.*, 2016), 0,05-0,13 cm³ cm⁻³ (Benjamin *et al.*, 2003), y en suelo franco arenoso 0,05-0,20 cm³ cm⁻³ (Chen *et al.*, 2014) y 0,08- 0,11 cm³ cm⁻³ (Safadoust *et al.*, 2014).

Orellana & Pilatti (1998) concluyeron que suelos con altos IHO presentaron resiliencia al estrés ambiental. Profundizando en estos aspectos Pilatti & Orellana (2012)

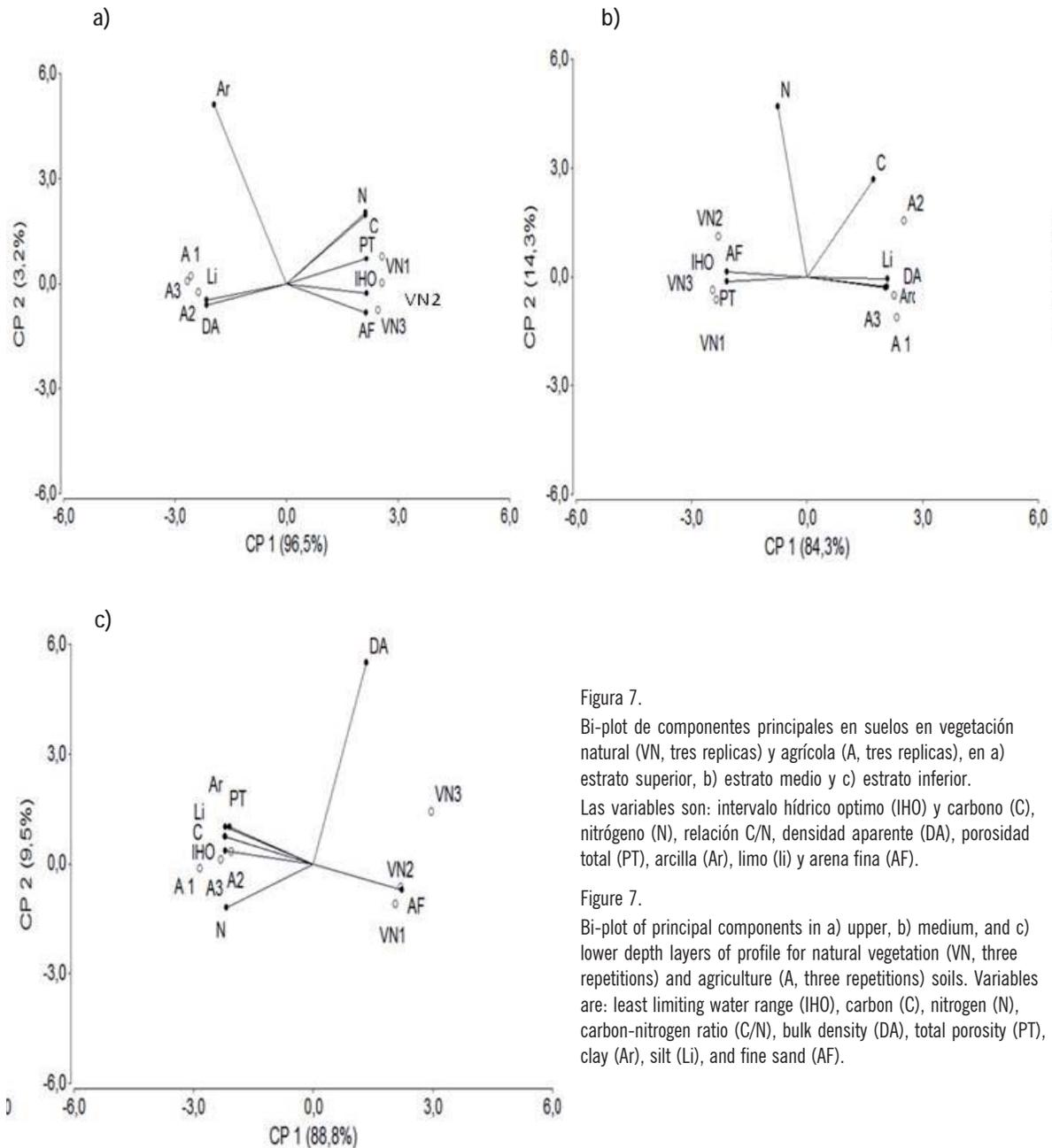


Figura 7.

Bi-plot de componentes principales en suelos en vegetación natural (VN, tres replicas) y agrícola (A, tres replicas), en a) estrato superior, b) estrato medio y c) estrato inferior.

Las variables son: intervalo hídrico óptimo (IHO) y carbono (C), nitrógeno (N), relación C/N, densidad aparente (DA), porosidad total (PT), arcilla (Ar), limo (li) y arena fina (AF).

Figure 7.

Bi-plot of principal components in a) upper, b) medium, and c) lower depth layers of profile for natural vegetation (VN, three repetitions) and agriculture (A, three repetitions) soils. Variables are: least limiting water range (IHO), carbon (C), nitrogen (N), carbon-nitrogen ratio (C/N), bulk density (DA), total porosity (PT), clay (Ar), silt (li), and fine sand (AF).

evaluaron la calidad física de Argiudoles bajo vegetación natural y obtuvieron valores del IHO de $0,19 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, sugiriendo que estos suelos con mayores contenidos de C con respecto a situaciones agrícolas, ofrecen buen estado físico para el establecimiento, exploración y actividad radical.

Los resultados del presente estudio demuestran que también en Paleustoles de la región semiárida pampeana

bajo vegetación natural fue posible alcanzar valores del IHO similares a los hallados en la región húmeda pampeana con granulometrías más finas.

La compactación altera la porosidad total del suelo y la distribución del tamaño de los poros, de tal manera que se produce una disminución de los macroporos y un aumento de los microporos, lo cual debería manifestarse en los valores de densidad aparente (Hamza & Anderson,

2005; Kay *et al.*, 1997). En promedio el suelo A presentó mayores valores de DA con respecto a VN, sin embargo los valores de DA en suelos agrícolas no superaron $1,40 \text{ g cm}^{-3}$, y por ende en suelos de textura franca no reflejarían limitaciones en el sistema poroso (USDA NRCS, 2014b). Pero los datos obtenidos reflejaron que la variación en la DA presentó un importante impacto sobre las curvas de resistencia a la penetración, principalmente en el suelo agrícola. La curva de RP fue el límite inferior del IHO bajo agricultura en el estrato superior y medio, mientras que en el estrato inferior ésta se encontró próxima a la de PMP y constituyó el límite inferior del IHO a un valor considerablemente menor de DA ($1,17 \text{ g cm}^{-3}$). Estos resultados estarían indicando que los cultivos serán afectados por la elevada resistencia a la penetración antes de que el suelo alcance el punto de marchitez permanente, lo cual significa que las raíces no podrán aprovechar el agua físicamente disponible comprendida entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente, aún a un valor de DA considerado bajo ($1,17 \text{ g cm}^{-3}$). Por lo consiguiente se podría estipular que la DA no sería un buen indicador de calidad en estos suelos, como ya fue observado para otras regiones climáticas y tipos de suelos por Benjamín *et al.* (2003); Logsdon & Karlen (2004); Dexter *et al.* (2007) y Asgarzadeh *et al.* (2010).

En ambos usos, en los tres estratos evaluados, el límite superior del IHO fue el contenido hídrico en CC, lo cual demostraría que dentro del rango de las DA medidas no existirían problemas de falta de oxígeno para las raíces de los cultivos, aún a densidades aparentes altas. Estos resultados podrían explicarse por la composición granulométrica de los suelos en estudio, siendo de textura franco y franco arenoso (Tabla 1), teniendo en cuenta que no se han reportado limitaciones en la porosidad de aireación en suelos de texturas arenoso franco (Safadoust *et al.*, 2014; Cecagno *et al.*, 2016). En cambio en suelos con granulometrías más finas esto ha sido observado frecuentemente. Estudios realizados por Micucci & Taboada (2006) y Taboada *et al.*, (2008) han permitido saber que los suelos limosos pampeanos poseen baja porosidad estructural, responsable de la aireación, perjudicando el contenido de agua disponible.

Tormena *et al.* (1999) y Lima *et al.* (2012) concluyeron que en un suelo arcilloso el límite superior del IHO fue dado por la curva de CC, mientras que en un suelo limoso (Minetti, 2012), otro arcilloso (Topp *et al.*, 1994) y otro franco arcilloso (Safadoust *et al.*, 2014) la curva de PA reemplazó en el límite superior a la curva de CC.

En el suelo bajo VN el IHO estuvo definido entre la curva de CC y la de PMP en los tres estratos, en cambio bajo uso A el límite inferior no correspondió a la curva de PMP para todas las DA medidas. En este sentido se obtuvo que la curva de CC representó el límite superior y la curva de RP el límite inferior a partir de $1,17 \text{ g cm}^{-3}$ de DA (en estrato superior y medio). El IHO disminuyó bajo uso agrícola en los estratos superior y medio con mayores valores de DA, lo cual implicaría que estas profundidades se encuentran más afectadas por la compactación del suelo.

A nivel general se puede expresar que las propiedades edáficas que influenciaron en mayor grado sobre el IHO variaron entre el uso del suelo y el estrato considerado. Por ejemplo, el suelo en VN presentó en los 3 estratos diferentes contenidos de C y N pero los valores hallados del IHO fueron similares entre sí. De la misma manera bajo uso A, el estrato inferior con menor contenido de C y N (Tabla 1) fue el que presentó mayor IHO. Sin embargo, en términos generales, se observó que el IHO correlacionó con C y N en el estrato superior e inferior, mientras que en el estrato medio los contenidos de arcilla, arena finas, PT y DA influenciaron en mayor grado sobre el IHO. Esto indicaría que el estrato medio de estos suelos representó un espesor diferente con respecto a los demás, donde se producirían los procesos de densificación y compactación a causa del uso. La complejidad de las relaciones entre IHO y otras variables edáficas que representan la fertilidad y estructura están evidentes en los bi-plot de los análisis de componentes principales donde se pudo observar que la asociación entre las variables tomó distintos patrones de acuerdo al estrato de profundidad.

En suelos de similar granulometría algunos autores han obtenido relaciones positivas entre el IHO y los contenidos de C (Kay *et al.*, 1997). Estudios más recientes demostraron que el IHO además de estar afectado por los contenidos de C, se relacionó con DA, arcilla y carbonato de calcio (Safadoust *et al.*, 2014). Imhoff *et al.* (2016) proponen que la textura, el C y el contenido de agua son los factores más importantes que controlan la degradación física de los suelos. Esto se condice con los resultados de este estudio, que indicaron que en suelos de similar textura a mayores contenidos de C el IHO adquiere los valores más altos, ya que en promedio este fue mayor en suelos en vegetación natural ($0,15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) con respecto al uso agrícola ($0,08 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

Puede inferirse que la producción de los cultivos en suelos con IHO más bajos dependerá en mayor medida de

la distribución y cantidad de las precipitaciones durante el ciclo. En condiciones climáticas con precipitaciones frecuentes, las propiedades físicas que limitan la disponibilidad de agua no serían perjudiciales para el crecimiento y el desarrollo del cultivo, cuando el IHO es condicionado en su límite inferior por la RP. Mientras que en ciclos más secos, con menor frecuencia de precipitaciones, la resistencia a la penetración antes que el agua útil limitaría la producción de los cultivos. El estudio del IHO en zonas semiáridas es reciente, no existen antecedentes sobre las interacciones entre el sistema poroso y el desarrollo y actividad de las raíces de los cultivos.

CONCLUSIONES

Estos resultados preliminares para Ustoles de la región semiárida pampeana muestran que el intervalo hídrico óptimo resultó un indicador sensible que reflejó los cambios en el sistema poroso del suelo bajo uso agrícola con respecto a un suelo de similar granulometría bajo vegetación natural.

En ambos usos, el límite superior del IHO fue el contenido hídrico en CC, lo cual demostraría que no existirían restricciones por falta de oxígeno para las raíces de los cultivos. El límite inferior en suelos A lo representó la curva de RP, indicando procesos de densificación y compactación a causa del uso, principalmente en el estrato medio del perfil. En cambio en el suelo bajo uso en VN el límite inferior correspondió la curva de PMP, no mostrando limitaciones de compactación que dificulten la absorción del agua por parte de los cultivos.

BIBLIOGRAFÍA

- Asgarzadeh, H; M Mosaddeghi; A Mahboubi; A Nosrati & A Dexter. 2010. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. *Plant and Soil* 335: 229-244.
- Benjamin, J; D Nielsen & M Vigil. 2003. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma* 116: 137-148.
- Benjamin, J; D Nielsen; M Vigil; M Mikha; F Calderon. 2013. A Comparison of Two Models to Evaluate Soil Physical Property Effects on Corn Root Growth. *Agronomy Journal* 105-713.
- Benjamin, J & D Karlen. 2014. LLWR Techniques for Quantifying Potential Soil Compaction Consequences of Crop Residue Removal. *Bioenergy Research* 7: 468480.
- Blacke, G & K Hartge, 1986. Bulk density. En: *Methods of Soil Analysis-Physical and Mineralogical Methods 2^{ne} ed.* (Ed. Klute, A) Am. Soc. Agron. Madison, USA, p. 363-375.
- Boone, F; H Van Der Werf; B Kroesbergen; B Ten Hag & A Boers. 1987. The effect of compaction of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage. II. Soil conditions and plant growth. *Neth. J. Agric. Res.* 35: 113-128.
- Bouma, J & H van Lanen. 1987. Transfer functions and threshold values from soil characteristics to land qualities. In: *Quantified land evaluation, ProcWorkshop ISSS/SSSA, Washington, DC.* ITC Publ., Enschede, the Netherlands. 106-111.
- Bradford, J. 1980. The penetration resistance in a soil with well-defined structural units. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 601-606.
- Busscher, W. 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water-content. *Transactions of the Asae v. 33:* 519-524.
- Cecagno, D; S Ely; V Gigante; D Costa; I Anghinoni; T Robinson; A Posselt; J Miguel; P Ivonir; F Balerini; J Rodrigo; P Cesar & D Carvalho. 2016. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. *Soil Till. Res* 156: 54-62.
- Chen, G; R Weil & R Hill. 2014. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil Till. Res.* 136: 61-69.
- Damiano, F & R Moschini. 2011. Intervalo hídrico óptimo en suelos argiudoles plantados con eucaliptus dunnii Maiden. *Ciencia del Suelo* 29: 1-11.
- Da Silva, A & B Kay. 1997. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 877-883.
- Da Silva, A; B Kay & E Perfect. 1994. Characterization of the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1775-1781.
- Dexter, A; E Czyż & O Gałę. 2007. A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil Till. Res.* 93: 412-419.
- Di Rienzo, J; F Casanoves; M Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & C Robledo. 2013. Infostat - Software estadístico. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina [WWW Document]. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Gee, G; J Bauder. 1986. Particle-size Analysis, in: *Methods of Soil Analysis: Part 1-Physical and Mineralogical Methods.* Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, pp. 383-411.
- Hagan, R; Y Badia & M Russell. 1959. Interpretation of Plant Response to Soil Moisture Regimes. *Adv. Agron.* 11: 77-97.
- Hamza, M & W Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82: 121-145.
- Imhoff, S; J Gay; A Grioni & P Ghiberto. 2006. Calidad física de Argiudoles de Santa Fe determinada por medio del Intervalo Hídrico Óptimo. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de suelos de la región andina, 2006, Salta. Resúmenes.
- Imhoff, S; A Da Silva; P Ghiberto & C Tormena. 2016. Physical Quality Indicators and Mechanical Behavior of Agricultural Soils of Argentina. *PLOS One* 1-21.
- Kay, B; A Da Silva & J Baldock. 1997. Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: predictions using pedotransfer functions. *Can. J. Soil Sci.* 77: 655-667.
- Klute, A & A Klute. 1986. Water Retention: Laboratory Methods, in: *Methods of Soil Analysis: Part 1-Physical and Mineralogical Methods.* Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, pp. 635-662.

- Kirkham, M. 2005. Principles of Soil and Plant Water Relations. Elsevier Academic Press, p. 500.
- Lapen, D; G Topp; E Gregorich & W Curnoe. 2004. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. *Soil Till. Res.* 78: 151-170.
- Leão, T & A Da Silva. 2004. A simplified Excel® algorithm for estimating the least limiting water range of soils. *Scientia Agricola* 61: 649-654.
- Leão, T; A Da Silva; M Macedo; S Imhoff & V Euclides. 2006. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. *Soil Till. Res.* 88: 279-285.
- Letey, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.* 1: 277-294.
- Lima, C; E Miola; L Timm; E Pauletto & A Da Silva. 2012. Soil compressibility and least limiting water range of a constructed soil under cover crops after coal mining in Southern Brazil. *Soil Till. Res.* 124: 190-195.
- Logsdon, S & D Karlen. 2004. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. *Soil Till. Res.* 78: 143-149.
- Micucci, F & M Taboada. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 86: 152-162.
- Minetti, M. 2012. Influencia de propiedades físico químicas de un Argiudol del Centro de Santa Fe en la aparición de manchones improductivos de alfalfa. Tesis Doctoral en Ciencias Biológicas de la Universidad Nac. del Litoral.
- Orellana, J & M Pilatti. 1998. Indicadores Edáficos en Agricultura Sostenible. I) Selección de variables relevantes. Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. Pp. 233-224. Villa Carlos Paz, Córdoba.
- Pilatti, M & J Orellana. 1993. Posibles indicadores edáficos de estabilidad: II. El intervalo hídrico óptimo. Comisión I. Actas XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Pp. 21-22. Mendoza, Argentina.
- Pilatti, M & J Orellana. 2012. Suelos ideales para agricultura sostenible. *Revista FAVE* 11: 65-88.
- Pilatti, M; J Orellana; S Imhoff & A Da Silva. 2012. Actualización de los límites críticos del intervalo hídrico óptimo. *Rev Ciencia del Suelo* 30: 9-21.
- Safadoust, A; P Feizee; A Mahboubi; B Gharabaghi; M Mosaddeghi & B Ahrens. 2014. Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. *Agricultural Water Management* 136: 34-41.
- Stirzaker, R. 1997. Processing tomato response to soil compaction and fumigation. *Aust J Exp Agric* 37: 47-483.
- Taboada, M; F Damiano & F Micucci. 2008. Capítulo 3 Aspectos físicos que condicionan la disponibilidad de agua para los cultivos. En: Fertilidad física de los suelos. M. A. Taboada; C. R. Álvarez (eds), 31-66.
- Taylor, H; G Roberson & J Parker. 1966. Soil strength-root penetration relations to medium to course- textured soil materials. *Soil Sci.* 102: 18-22.
- Topp, G; Y Galganov; K Wires & J Culley. 1994. Non limiting water range (NLWR): An approach for assessing soil structure. Technical report 2, Soil Quality Evaluation Program, p 36. Agriculture and AgriFood Canada, Ottawa.
- Tormena, C; A Da Silva & P Libardi. 1998. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo* 22: 573-581.
- Tormena, C; A Da Silva & P Libardi. 1999. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the limiting water range approach. *Soil Till. Res.* 52: 223-232.
- Tormena, C; D Karlen; S Logsdon & M Cherubin. 2016. Corn stover harvest and tillage impacts on near-surface soil physical quality. *Soil Till. Res.* in press.
- Uberto, M. 2008. Calibración y validación de un modelo de simulación para el cultivo de maní en el área centro sur de Córdoba. Tesis Maestría en Producción Vegetal (FAV, UNRC) 125 pp.
- USDA, NRCS. 2014a. Claves para la Taxonomía de Suelos.
- USDA, NRCS. 2014b. Soil Health- Guides for Educators Soil Bulk Density, Moisture, Aeration. 1-11.
- Veihmeyer, F & A Hendrickson. 1931. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. *Soil Sci.* 32: 181-193.
- Wilson, M. & J.R. Cerana . 2004. Mediciones Físicas En Suelos Con Características Vérticas. *Revista Científica Agropecuaria* 8: 11-22.

