

MOVIMIENTO DEL AGUA EN ARGIUDOLES DE LA PAMPA ONDULADA CON DIFERENTE MINERALOGÍA DE ARCILLAS

MARIO GUILLERMO CASTIGLIONI⁽¹⁾; HÉCTOR JOSÉ MARÍA MORRÁS⁽²⁾; OSCAR JOSÉ SANTANATOGLIA⁽¹⁾; MARÍA VICTORIA ALTINIER⁽³⁾ & DANIEL TESSIER⁽³⁾

⁽¹⁾Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453, (1417) Capital Federal, República Argentina, castigli@mail.agro.uba.ar;

⁽²⁾Instituto de Suelos INTA-CIRN (1712) Castelar; ⁽³⁾INRA-Unité de Science du Sol, Versailles, Francia

Recibido: 10/04/07

Aceptado: 01/06/07

RESUMEN

Los suelos zonales de la Pampa Ondulada son Argiudoles Típicos y Vérticos los cuales se diferencian en la composición mineralógica de su fracción arcilla. El objetivo del presente trabajo fue analizar las vinculaciones entre la tasa de movimiento del agua edáfica con algunos atributos relacionados con la composición mineralógica de la fracción arcilla, en distintos suelos representativos de la región mencionada. Se tomaron muestras de los horizontes A, BA/BE, Bt y BC de dos Argiudoles Típicos y de un Argiudol Vértico, realizando sobre las mismas determinaciones relacionadas con la cantidad y tipo de las arcillas presentes. A su vez mediante diferentes técnicas se evaluaron el sistema poroso del suelo y el movimiento de agua edáfica. En los horizontes Bt, aquellos parámetros que integran el tipo y el contenido de arcillas, como el COLE y la CIC, mostraron estar mejor vinculados con el movimiento de agua edáfica que cuando se consideró únicamente el porcentaje de arcilla. La distinta porosidad estructural generada dentro de los agregados de los horizontes Bt, originó diferencias en su difusividad y conductividad hidráulica no saturada, a contenidos de humedad por encima del 50% de saturación. En aquellos horizontes con mayor actividad biológica y menor contenido de arcilla, el movimiento de agua se realizó en forma independiente de las características de las arcillas presentes.

Palabras clave. esmectitas, COLE, carbono edáfico, porosidad, movimiento de agua.

WATER MOVEMENT IN SOME ARGIUDDLs OF THE ROLLING PAMPA DIFFERING IN THEIR CLAY MINERALOGY

ABSTRACT

Typic and Vertic Argiudolls, which differ in the composition of their clay fraction, are the zonal soils in the Rolling Pampa of Argentina. The aim of this work has been to analyze the relationship between water movement and diverse soil properties in some representative soils of the Rolling Pampa, differing in their clay mineralogy. The A, BA/BE, Bt and BC horizons of two Typic and one Vertic Argiudolls were sampled and a number of properties related with clay content and clay type were measured. Soil porosity and soil water movement were also evaluated through different techniques. In the Bt horizons, those parameters integrating clay type together with clay content, as COLE and CEC, have shown a better relationship with soil water movement than considering clay quantity alone. Clods from Bt horizons of studied soils have shown to differ in their internal structural porosity and this led to different diffusivity and unsaturated (at 50% water holding capacity) hydraulic conductivity results. In upper soil horizons, characterized by a lower clay content and a greater biological activity, water movement was not related to clay mineralogy.

Key words. Smectite, COLE, soil carbon, porosity, water movement.

INTRODUCCIÓN

En el nordeste de la provincia de Buenos Aires, en los ambientes positivos de los dominios edáficos 7 y 8 (INTA, 1989), se desarrollan Argiudoles Típicos y Vérticos que ocupan una superficie de 14.642 km² y 2.832 km², respectivamente. Estos suelos son los más productivos del área, diferenciándose en su mineralogía de arcillas (Morrás *et al.*, 2002).

Con el avance tecnológico, los modelos de simulación de movimiento de agua edáfica y de dinámica de nutrientes, se han convertido en una herramienta importante para estimar el efecto de las diferentes prácticas de manejo del suelo sobre el crecimiento de los cultivos y la calidad del ambiente (van Alpen *et al.*, 2001). La aplicación de estos modelos está condicionada por el conocimiento de parámetros hidráulicos básicos, los que pueden ser me-

dados en forma directa o estimados por métodos indirectos, teniendo en cuenta propiedades del suelo de fácil determinación (Wosten *et al.*, 2001). En este sentido, son varios los autores que mencionan que la mineralogía de arcillas podría ser un parámetro edáfico a tener en cuenta en el desarrollo de modelos de flujo de agua en el suelo (Pachepsky *et al.*, 1998).

Si bien la medición directa de la mineralogía de arcillas requiere de equipo especializado, hay parámetros edáficos que pueden ser utilizados como indicadores del mineral de arcilla presente. Yule & Ritchie (1980) mencionan que la CIC integra en forma conjunta la actividad y la cantidad de arcilla del suelo; Hammel *et al.* (1983) desarrollaron una función que toma en consideración a los límites plástico y líquido y cuyo objetivo es predecir la superficie específica de los constituyentes del suelo y los minerales de arcilla presentes; Means & Parcher (1965) sostienen que el número de actividad (cociente entre el índice de plasticidad y el contenido de arcilla) es un indicador de la calidad de arcilla del suelo, mientras que Imbellone & Giménez (1990) resaltan que el COLE refleja la composición granulométrica y mineralógica edáficas.

La expansión de los suelos es una propiedad dinámica que afecta la distribución de poros al variar su contenido hídrico. Dichas modificaciones no pueden ser detectadas a través de la técnica por desorción de agua. La utilización de un líquido no polar como el querosene, para la medición del volumen del suelo, no altera la distribución de poros por contracción (Sasal & Andriulo, 2003). Métodos de laboratorio que utilizan este fluido permiten distinguir: 1) la porosidad textural, determinada sobre agregados artificiales que presentan solamente poros resultantes de la distribución espacial de las partículas elementales y 2) la porosidad estructural (grietas y bioporos), formada dentro y entre los agregados naturales (Stengel, 1988).

Pese a la importancia que se le ha asignado a la mineralogía de los suelos sobre sus características hidrológicas, no hay estudios que hayan analizado su incidencia en el comportamiento hidrológico de Argiudoles de la Pampa Ondulada, diferenciados mineralógicamente.

El objetivo del presente trabajo fue estudiar el comportamiento de algunas propiedades relacionadas con el movimiento del agua edáfica en los distintos horizontes de diferentes Argiudoles de la Pampa Ondulada, estableciendo su vinculación con la porosidad del suelo y con algunos parámetros que responden a la composición mineralógica de la fracción arcilla.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó a campo y en laboratorio sobre muestras extraídas de tres suelos ubicados dentro de un sector de unas 450 hectáreas localizadas en el partido de Hurlingham, provincia de Buenos Aires, perteneciente al Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias del INTA. La selección de estos perfiles respondió a su diferente composición mineralógica en la fracción arcilla, y a que no habían sido alterados por el uso antrópico durante al menos los últimos 10 años. El perfil 1 es un Argiudol Típico, el perfil 2 es un Argiudol Vértico, en tanto el perfil 3 es un Argiudol Típico con características composicionales y morfológicas intermedias entre los dos suelos anteriores. El análisis mineralógico se efectuó por difracción de rayos X y la estimación semicuantitativa de las especies presentes se realizó mediante el programa de descomposición de espectros DECOMPXR (Lanson, 1993).

Como se puede ver en la Figura 1, en la zona de reflexión correspondiente a las esmectitas (reflexiones en 14,9 a 16 Å, ubicadas entre 6 y 7° 2-theta), el suelo 2 presenta picos más desarrollados en los horizontes Bt, BC y C respecto al suelo 1, siendo éstos similares entre los Bt de los suelos 2 y 3. Por su parte, las reflexiones de este mineral son parecidas en los BC y C de los suelos 1 y 3. Respecto a los horizontes A, la estimación semicuantitativa de las especies minerales presentes dio como resultado que los porcentajes de esmectita de estos horizontes fueron 44, 52 y 29% para los suelos 1, 2 y 3, respectivamente. De acuerdo a lo mencionado, los contenidos de esmectita en los horizontes A y C disminuyen en el siguiente orden: suelo 2 > suelo 1 > suelo 3. En los horizontes Bt, por el contrario, los contenidos de esta arcilla son mayores en los suelos 2 y 3 respecto al 1.

Otros resultados analíticos (granulometría, CIC y carbono orgánico) se presentan en Tabla 1.

Las determinaciones realizadas correspondieron a aquellas propiedades relacionadas directamente con la actividad de las arcillas, con la porosidad del suelo y con el movimiento de agua.

a. Propiedades ligadas a la actividad de las arcillas

COLE (Grossman *et al.*, 1968): $COLE = (V_{30}/V_d)^{1/3} - 1$ (1)

V_{30} : volumen ocupado por los agregados con un contenido de humedad correspondiente a un potencial mátrico de 30kPa

V_d : volumen ocupado por los agregados secados a estufa a 105 °C

Límite líquido (Means & Parcher, 1965). Se utilizó el dispositivo diseñado por A. Casagrande (1932). Para cada horizonte se trabajó con seis contenidos de humedad diferentes, confeccionándose un gráfico en el que figuraron el contenido hídrico del suelo en ordenadas y en abscisas, en escala logarítmica, el número de vueltas a la cual se cerró la hendidura abierta en la mezcla suelo-agua. A los puntos así graficados se ajustó una recta de regresión, cuya expresión matemática sirvió para determinar el límite líquido, que es el contenido de humedad del suelo cuando la hendidura se cierra a los 25 golpes de la copa sobre la base del dispositivo.

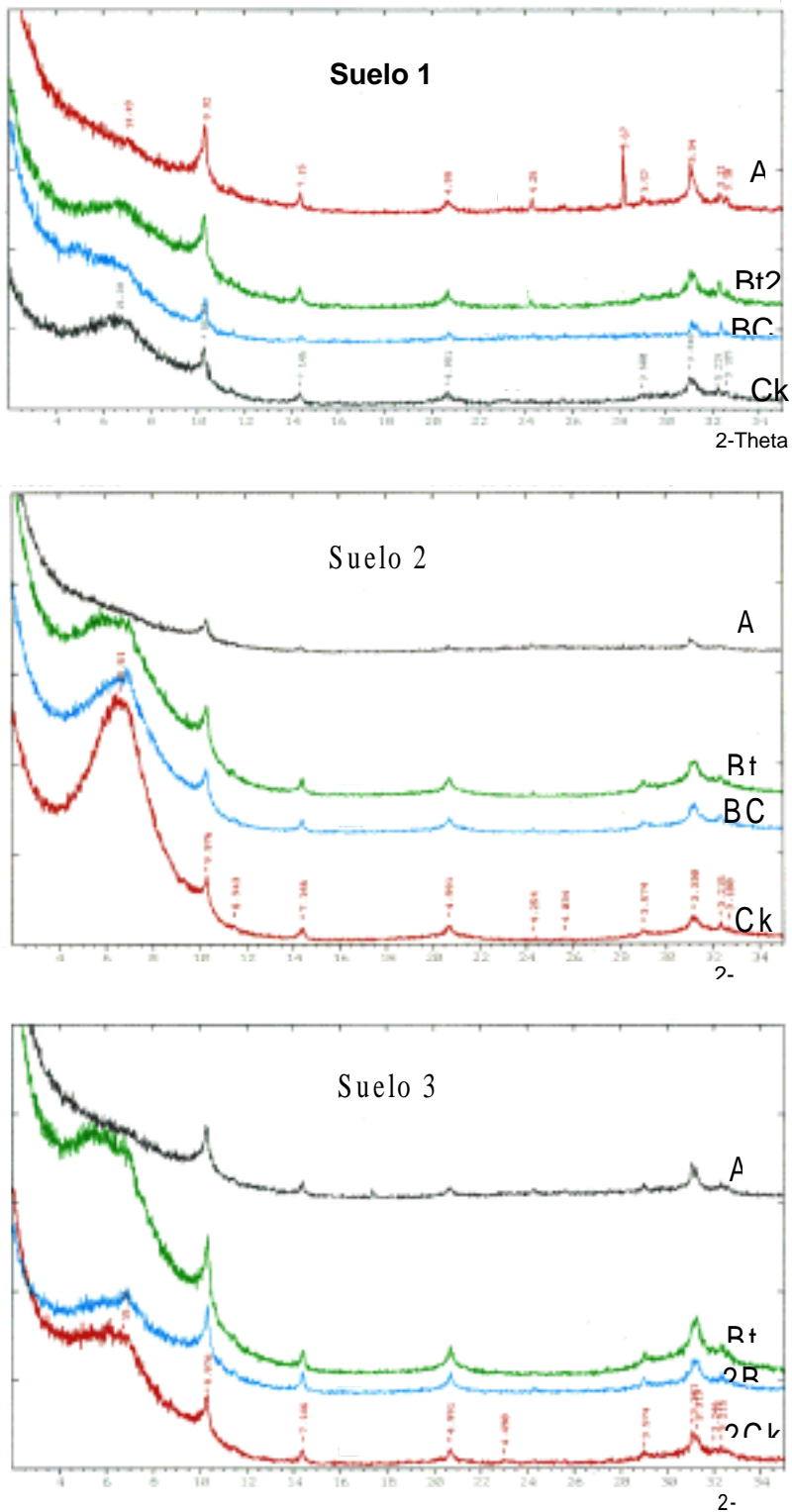


Figura 1. Diagramas de difracción de RX de arcillas naturales orientadas, correspondientes a los horizontes principales de los tres suelos estudiados. Las cifras en sentido vertical (en Å) corresponden a picos relevantes de componentes de la fracción.

Figure 1. XRD diffraction diagrams of oriented natural clay samples from the main horizons of the three studied soils. Vertical figures (in Å) are relevant peaks of minerals in the fraction.

Tabla 1. Datos analíticos correspondientes a los suelos estudiados.
Table 1. Analytical data of the studied soils.

Suelo	Horizonte	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	C.O. (g kg ⁻¹)	CIC (cmol kg ⁻¹)
1	A	24,6	49,3	26,1	17,2	20,5
1	Bt1	55,9	34,0	10,1	6,4	42,0
1	Bt2	42,4	40,5	17,1	2,5	29,6
1	Bt3	39,3	43,7	17,0	1,0	27,1
1	BCK	32,3	41,5	26,2	0,8	23,4
2	A	29,7	48,9	21,4	22,9	22,6
2	BA	35,0	48,8	16,2	16,8	26,1
2	Bt1	52,0	32,2	15,8	6,8	44,6
2	Bt2	40,2	49,1	10,7	3,4	39,0
2	BCK	39,8	45,2	15,0	1,3	37,7
3	A	29,0	49,9	21,1	21,4	24,3
3	BE	36,9	46,7	16,4	14,3	22,3
3	Bt1	49,7	38,6	11,7	7,3	37,6
3	Bt2	50,2	37,3	12,5	3,7	39,6
3	2BCK3	30,6	51,1	18,3	0,4	31,8

Límite plástico (Means & Parcher, 1965). Se determinó el contenido de humedad del suelo cuando la muestra, al ser amasada en la palma de la mano formando un rollo de 3 mm de diámetro, se fracturó en pequeños trozos.

Índice plástico (Means & Parcher, 1965): Surgió de la diferencia en el contenido de humedad del suelo entre el límite líquido y el límite plástico.

Número de actividad

(Means & Parcher, 1965): $A = \text{índice plástico} / \text{arcilla} (\%)$ (2)

Curvas características de contracción realizadas con agregados naturales (Mc Garry & Malafant, 1987). Se utilizaron entre 30 y 40 agregados naturales de 3 a 10 cm³ de volumen. Los agregados se humedecieron por capilaridad y posteriormente se dejaron secar al aire durante tiempos variables, para provocar en ellos diferentes contenidos hídricos. Después de este desecamiento parcial, y habiéndolos pesado para poder determinar su contenido de humedad, se colocaron en un recipiente con querosene durante 24 hs. Se determinó su volumen aplicando el principio de Arquímedes, se secaron en estufa a 105 °C y se pesaron. Con los datos de volumen específico y el contenido de humedad gravimétrica de los agregados se confeccionó un gráfico de puntos. Se buscó la función que mejor ajustara en forma global a la relación volumen específico/humedad gravimétrica de cada horizonte.

Curvas características de contracción realizadas con agregados artificiales (Warkentin, 1993). El volumen específico determinado sobre estos agregados resulta únicamente del ensamble de las partículas elementales, ya que para su obtención se destruye todo vestigio de estructura. Esto provoca un sistema de porosidad al que se puede calificar de textural (Stengel, 1979). Para su obtención se hizo una mezcla de suelo tamizado por malla de 300 µm y agua hasta obtener una pasta homogénea, la cual se colocó en pequeños moldes de plástico de aproximadamente 4 cm³. Se calculó el volumen de estos agregados (3 por horizonte) a distintos contenidos hídricos, a partir de mediciones hechas con calibre. Con la información obtenida se realizó el mismo tipo de gráfico realizado con agregados naturales. Se siguió esta metodología, en vez de trabajar con agregados de 2 a 3 mm como propone Stengel (1979), ya que de esta manera es más sencillo obtener la variación de este tipo de porosidad con el contenido hídrico, habiéndose comprobado que los resultados obtenidos mediante los dos procedimientos son similares (Castiglioni, 2005).

b. Propiedades relacionadas con la porosidad del suelo

Porosidad total (Danielson & Sutherland, 1986). Para la obtención de las muestras no disturbadas se utilizó un cilindro de 225 cm³ y la porosidad total (St) se determinó mediante la fórmula:

$$St = (1 - p_b/p_p) 100 \quad (3)$$

(p_p) densidad de partícula

(p_b) densidad aparente.

Distribución por tamaño de poros (Danielson & Sutherland, 1986). Para esta determinación se tomaron tres muestras por horizonte con cilindros metálicos de 4,75 cm de diámetro y 3 cm de altura, siendo las tensiones aplicadas las siguientes (en kPa): 5 y 1.500, con lo cual se determinó el volumen de poros mayores a 60 μm , entre 60 y 0,2 μm y menores a 0,2 μm .

Porosidad textural (Stengel, 1979). $P_t = (1 - p_c/p_p) 100$ (4)

Pt: porosidad textural (%)

p_c : densidad aparente de los agregados artificiales (Mg m^{-3})

p_p : densidad de partícula (Mg m^{-3})

Porosidad de agregados naturales

(Stengel, 1979). $P_a = (1 - p_c/p_p) 100$ (5)

Pa: porosidad de los agregados naturales (%)

p_c : densidad aparente de los agregados naturales (Mg m^{-3})

p_p : densidad de partícula (Mg m^{-3})

Porosidad estructural. Se determinó la porosidad estructural formada entre y dentro de los agregados (Stengel, 1988). La primera se obtuvo por diferencia entre la porosidad total y la porosidad de los agregados naturales, mientras que la segunda se obtuvo restando a la porosidad de los agregados naturales la correspondiente a la porosidad textural.

c. Propiedades relacionadas con el movimiento de agua del suelo

Difusividad (Arya *et al.*, 1975). Se tomaron 5 muestras de cada horizonte con cilindros de hierro galvanizado (largo: 5,9 cm; diámetro interior: 4,2 cm). Luego de saturadas con agua, estas muestras fueron sometidas durante 20' a una corriente de aire caliente (80-90 °C) sobre uno de los extremos destapados del cilindro. Se cortó luego la muestra de suelo en pequeñas secciones de menos de 2 mm de espesor, las que fueron pesadas inmediatamente y secadas en estufa (105 °C) para determinar su contenido de humedad. Se graficó la relación contenido de humedad volumétrica de cada una de las secciones de cilindro cortadas, respecto a la distancia de cada una de ellas a la superficie que recibió el flujo de calor. Debido a la forma sigmoideal en que se distribuyeron los puntos de dicha relación en el gráfico, para cada horizonte se ajustaron estos resultados a la ecuación de Hill:

$$Y = ax^b / (c^b + x^b) \quad (6)$$

Posteriormente se hallaron las derivadas e integrales de las curvas ajustadas, para distintos contenidos de humedad volumétrica. Con esta información se calculó la difusividad en función de distintos contenidos hídricos del suelo, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$D_{(\theta_x)} : 1/2t \left(\frac{d_x}{d_\theta} \right)_{\theta_x} \int_{\theta_x}^{\theta_i} x d_\theta \quad (7)$$

$D_{(\theta)}$ ($\text{cm}^2 \text{min}^{-1}$): difusividad en función del contenido de agua

θ_i : contenido de agua inicial

x: distancia

t: tiempo de exposición de la muestra a la corriente de aire caliente

$\left(\frac{d_x}{d_\theta} \right)_{\theta_x}$: derivada de la curva distancia a la superficie evaporante-contenido de agua del suelo, para un determinado contenido de agua del suelo (θ_x).

$\int_{\theta_x}^{\theta_i} x d_\theta$: integral definida de la curva anterior entre el contenido inicial de agua de la muestra y un contenido de humedad determinado.

Tasa de desecación. Con la información obtenida en laboratorio para la determinación de la difusividad, se graficó la pérdida de agua acumulada de cada cilindro de suelo, en función de la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde el inicio del secado. Se utilizó la pendiente de la recta de regresión ajustada a estos resultados, para comparar el ritmo de secado entre los distintos horizontes.

Conductividad hidráulica no saturada (Arya *et al.*, 1975). Con los valores de difusividad, y a partir de la curva característica de humedad de cada horizonte, se calculó la conductividad hidráulica en función del contenido de humedad mediante la ecuación:

$$K_{(\theta)} = D_{(\theta)} \left(\frac{d_\theta}{dh} \right) \quad (8)$$

$K_{(\theta)}$ (cm h^{-1}): conductividad hidráulica no saturada.

$D_{(\theta)}$: difusividad en función del contenido de agua.

d_θ/dh : inversa de la derivada de la curva característica de humedad para un valor de θ .

Conductividad hidráulica saturada (Klute & Dirksen, 1986). Se tomaron tres muestras por horizonte con cilindro y se aplicó el método de la carga de agua variable.

Tasa de infiltración (Lin *et al.*, 1996). Se utilizó un permeámetro de disco de 15 cm de diámetro siguiendo la metodología mencionada en la bibliografía (Lin *et al.*, 1996). Se realizaron 4 determinaciones en los horizontes A y BA/BE de los tres suelos, eliminándose la vegetación presente, buscando que la

superficie del terreno estuviera lo suficientemente nivelada y lisa. Para establecer un buen contacto entre la base del disco y el suelo, se colocó una pequeña capa de arena húmeda entre ellos. Las mediciones se hicieron sin aplicar tensión sobre la placa y se leyó la diferencia de altura en el reservorio de agua cada minuto, hasta llegar a una tasa de infiltración constante.

d. Análisis estadístico

Mediante análisis de varianza se compararon los resultados de las propiedades hidrológicas anteriormente detalladas entre horizontes similares. También se hicieron análisis de correlación y regresión para determinar el grado de vinculación entre las propiedades analizadas (Snedecor & Cochran, 1989).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

HORIZONTES ARGÍLICOS

Tasa de desecación

Los horizontes Bt del suelo 1 fueron los que más rápidamente perdieron agua ($P < 0,05$) ante la aplicación de una corriente de aire caliente, presentando la relación pérdida de agua acumulada-raíz cuadrada del tiempo de secado, una pendiente de 0,94 para el Bt1 y de 0,95 para el Bt2. En los horizontes Bt1 de los suelos 2 y 3, los valores de dicha pendiente fueron 0,84 y 0,85, respectivamente, mientras que en los Bt2 fue de 0,83 para los dos suelos. Esta mayor tasa de evaporación en los horizontes argílicos del suelo 1 se correspondió con la presencia de un mayor volumen de poros superiores a los $60 \mu\text{m}$ (7,46 y 9,87%), mientras que los otros dos suelos presentaron valores menores (4 al 6%), siendo el coeficiente de correlación entre ambas variables 0,83 ($P < 0,02$). Esta mayor macroporosidad se originó a pesar de que los horizontes Bt del suelo 1 tuvieran mayor contenido de arcilla respecto a los del suelo 2 (Tabla 1). Dado que el suelo 1 tiene un menor contenido de esmectitas que el suelo 2 (Figura 1), la estabilidad de sus macroporos habría sido mayor, influenciando los resultados obtenidos.

Difusividad y conductividad hidráulica no saturada

Del análisis de la Figura 2 se desprende que las diferencias entre horizontes, en la difusividad y conductividad hidráulica no saturada, se manifestaron en mayor medida con el aumento de la humedad edáfica. Los

resultados representados en dicha Figura se explican tanto por los distintos contenidos de arcilla, ya que los horizontes Bt2 presentaron siempre mayor tasa de movimiento de agua que los Bt1, como por su calidad, ya que el suelo 1 presentó dentro de cada grupo de horizontes (Bt1 y Bt2) los mayores valores para estas propiedades.

Los análisis de correlación efectuados entre el contenido y calidad de las arcillas con la difusividad y conductividad hidráulica no saturada refuerzan lo anterior. En este sentido, los coeficientes de correlación obtenidos por la CIC, el COLE, los límites líquido y plástico estuvieron entre $-0,91$ y $-0,97$ ($P < 0,01$), mientras que para el contenido de arcilla fueron de $-0,76$ ($P < 0,05$) y $-0,72$ ($P < 0,07$). Estos resultados se observaron para contenidos de agua edáfica de $0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (saturación relativa: 70 al 85%), siendo similares a los obtenidos con humedades de suelo de $0,30$ y $0,35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (saturación relativa: 50 al 65%). Por lo señalado, se infiere que el uso de parámetros que incluyen la información conjunta de la cantidad y calidad de las arcillas, es de mayor utilidad en planteos de desarrollo de modelos de predicción de movimiento de agua edáfica, que la utilización exclusiva del porcentaje de arcilla.

Kutilek (1996) señaló que aún en condiciones no saturadas, la conductividad hidráulica se incrementa sensiblemente cuando algunos poros, formados entre los agregados de los horizontes arcillosos, conducen parte del agua. En la Tabla 2 se observa que en todos los horizontes Bt analizados, la porosidad total del suelo por encima del 50% de saturación, se debió a la formada dentro de los agregados, por lo cual se infiere que las diferencias en el movimiento de agua señaladas previamente no fueron causadas por variaciones en el volumen de poros entre agregados.

Dichas diferencias tampoco respondieron a un comportamiento hídrico distinto de las matrices de estos horizontes, ya que de acuerdo a lo manifestado precedentemente (Figura 2), los valores de difusividad y conductividad hidráulica no saturada tendieron a acercarse a bajos contenidos hídricos, que es cuando predomina el proceso de difusión a través de pequeños poros.

En el presente trabajo, los horizontes Bt1 y Bt2 del suelo 2 presentaron valores de COLE (0,162 y 0,114) mayores ($P < 0,05$) que los correspondientes al suelo 1 (0,131 y 0,080). Esta mas intensa densificación, ante el desecamiento de los agregados del suelo con mayor contenido de esmectitas (Castiglioni *et al.*, 2005), no influyó en el movimiento de agua cuando el suelo presentó bajos valores de contenido hídrico. Lo mencionado quedó también evidenciado al observar que los coeficientes de

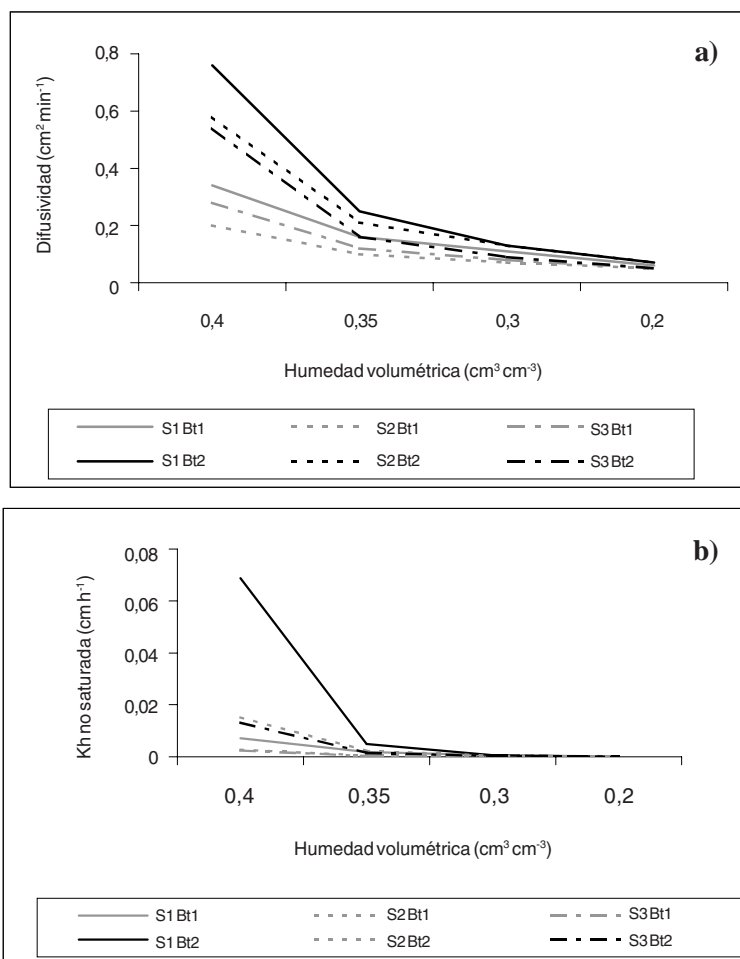


Figura 2. Difusividad (a) y conductividad hidráulica (b) de los horizontes argílicos a diferentes contenidos de humedad.

Figure 2. Diffusivity (a) and unsaturated hydraulic conductivity (b) of argilic horizons at different soil water content.

Tabla 2. Contenido de humedad, saturación relativa, porosidad total y de agregados naturales correspondientes a los horizontes argílicos.

Table 2. Water content, relative water saturation, total porosity and aggregates porosity in the argilic horizons.

Suelo/ Horizonte	Humedad edáfica (Mg Mg ⁻¹)	Saturación relativa (%)	Porosidad total (%)	Porosidad de agregados (%)
S1 Bt1	0,27	52	47	47
S1 Bt2	0,24	55	45	47
S2 Bt1	0,26	53	46	48
S2 Bt2	0,32	82	51	52
S3 Bt1	0,33	72	50	53
S3 Bt2	0,32	69	48	53

correlación entre la tasa de movimiento de agua, a una saturación relativa inferior del 50%, y las propiedades ligadas al tipo de arcilla presente fueron bajos y sin significancia estadística.

En las Figuras 3 y 4 se observan las curvas de contracción de agregados naturales (agregado) y artificiales (textural), correspondientes a los horizontes argílicos de los suelos 1 y 2. La correspondiente a los agregados artificiales expresa la manera en que se dilata o contrae la matriz del suelo en función de su contenido de humedad, y por lo tanto el espacio comprendido entre las curvas “agregado” y “textural” de un mismo horizonte da una idea del volumen ocupado por los poros estructurales formados dentro de los agregados.

Se observa en dichas figuras que ambos horizontes presentaron un aumento en el volumen de sus poros texturales por la incorporación de agua entre partículas y entre las láminas que conforman las partículas. Stengel (1988) también menciona modificaciones de la porosidad textural con la variación en el contenido hídrico del suelo. En consecuencia, y de acuerdo a como los agregados naturales acompañen este cambio de volumen, los poros estructurales formados dentro de los agregados modificarán o no su espacio ocupado.

En este sentido, en la Figura 3 se observa que el horizonte Bt1 del suelo 2 siempre presentó una menor porosidad estructural dentro de los agregados respecto al suelo 1, lo cual se agudizó con el aumento en su con-

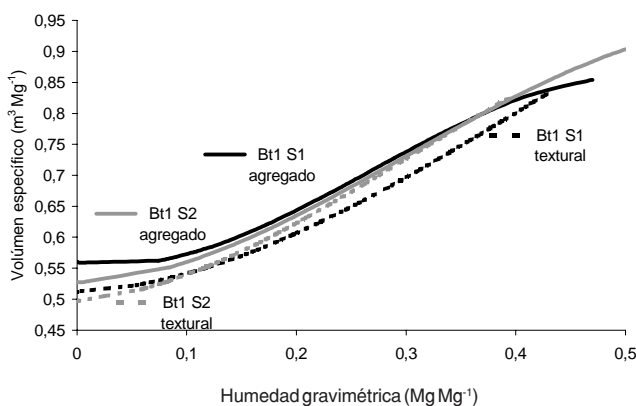


Figura 3. Curvas de contracción de agregados naturales y reconstruidos de los horizontes Bt1 de los suelos 1 y 2.

Figure 3. Shrinkage curves of natural and reconstructed soil aggregates in Bt1 horizons of soils 1 and 2.

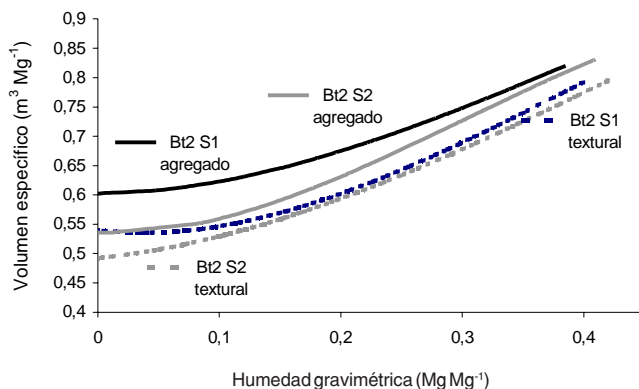


Figura 4. Curvas de contracción de agregados naturales y reconstruidos de los horizontes Bt2 de los suelos 1 y 2.

Figure 4. Shrinkage curves of natural and reconstructed soil aggregates in Bt2 horizons of soils 1 and 2.

tenido hídrico edáfico, debido al fuerte incremento en la porosidad textural del horizonte con mayor presencia de esmectitas.

De acuerdo a todo lo mencionado precedentemente, se infiere que la menor difusividad y conductividad hidráulica no saturada de los horizontes Bt del suelo 2, determinadas a contenidos hídricos superiores al 50% de saturación, fue ocasionada por el diferente comportamiento de la porosidad estructural formada dentro de los agregados.

Los horizontes argílicos del suelo 3 mostraron un comportamiento intermedio al visualizado en los otros dos suelos, lo cual concuerda con otras determinaciones físicas hechas en estos horizontes (Castiglioni, 2005). Esto se debe a que si bien los Bt del suelo 3 presentan cantidades similares de esmectita respecto a los del suelo 2, también manifiestan otras características composicionales distintas (Figura 1).

Conductividad hidráulica saturada

Dada la muy baja permeabilidad obtenida en laboratorio (menor a $0,03 \text{ cm h}^{-1}$) no se pudieron detectar diferencias en esta propiedad entre horizontes.

Favré *et al.* (1997) observaron en Vertisoles de Senegal, que el paso preferencial del agua por grietas ocu-

rría durante un tiempo muy corto debido a un rápido cierre de las mismas. Como ya se mencionara previamente, en estos horizontes no se observaron grietas de desecación por encima de la humedad edáfica del 50% de saturación. La metodología empleada para la determinación de la conductividad hidráulica saturada presupone el previo humedecimiento del suelo, y por lo tanto su medición se realizó sobre suelos totalmente expandidos, sin la posibilidad de que ocurra el paso preferencial del agua en ninguno de ellos, por lo cual su diferente capacidad de contracción-expansión mencionada anteriormente no influyó en esta propiedad.

HORIZONTES BC

Tasa de desecación, difusividad y conductividad hidráulica saturada y no saturada

El horizonte BC correspondiente al suelo 2 presentó al mismo tiempo mayor cantidad de arcilla y de esmectitas (Tabla 1; Figura 1) que los otros dos suelos, por lo cual mostró menores valores en estas propiedades (Figura 5). Por lo señalado, y a diferencia de lo ocurrido con los horizontes argílicos, no se pudieron discriminar los efectos de la calidad de arcilla sobre las mismas.

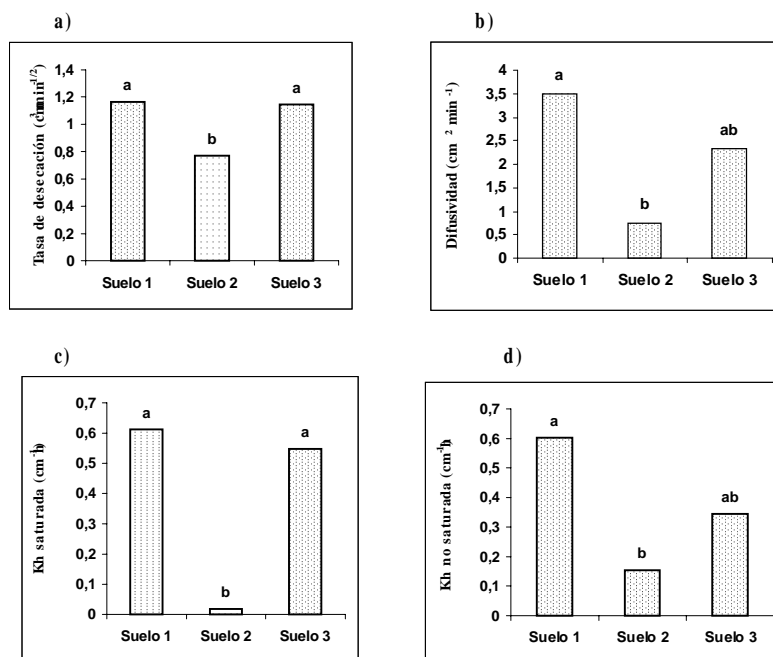


Figura 5. a) Tasa de desecación; b) Difusividad; c) Conductividad hidráulica saturada y d) Conductividad hidráulica no saturada de los horizontes BC.

Figure 5. a) Drying rate; b) Diffusivity; c) saturated hydraulic conductivity and d) unsaturated hydraulic conductivity of BC horizons.

HORIZONTES A Y BA/BE

Distribución por tamaños de poro, tasa de desecación y COLE

En la Tabla 3 se puede observar que los valores de COLE de los horizontes A no respondieron a lo esperado, ya que de acuerdo a lo mencionado previamente, la estimación semicuantitativa de las especies minerales presentes en estos horizontes, mostraba al suelo 2 con un mayor contenido de esmectitas y por lo tanto debería ser el de mayor COLE. El diferente contenido de carbono de estos horizontes pudo haber alterado el ordenamiento esperado de estos resultados (Tabla 1). Castiglioni *et al.* (2005) al analizar la pendiente de la zona de contracción residual (Mc Garry & Malafant, 1987) de los horizontes A, BA, BC y C de estos mismos suelos, confirmaron que la materia orgánica edáfica disminuía la tasa de pérdida de volumen de los agregados cuando estos se secaban. Por lo mencionado, no se consideró al COLE como un indicador del tipo de arcilla presente en los horizontes superficiales. Respecto a las restantes propiedades mostradas en la Tabla 3, se ve que el volumen ocupado por los poros menores a los 0,2 μm , fue la única que mostró diferencias entre los horizontes A.

Al analizar en forma conjunta a los horizontes A y BA, se pudo comprobar que la tasa de desecación de los horizontes superficiales y subsuperficiales estuvo influida positivamente por la porosidad estructural formada entre los agregados (coeficiente de correlación 0,98; $p < 0,01$) y por la relación contenido de carbono/contenido de arcilla (coeficiente de correlación 0,88; $P < 0,05$), mientras que correlacionó en forma negativa con el vo-

lumen de poros menores a 0,2 μm (coeficiente de correlación $-0,98$; $P < 0,01$).

De acuerdo a estos resultados puede inferirse que la pérdida de agua del suelo por evaporación aumentará en la medida que los poros mayores a 0,2 μm sean más estables. Esto último se lograría a partir de una alta relación contenido de carbono/contenido de arcilla, la que le conferiría mayor rigidez al sistema de meso y macroporos. Kay & VandenBygaart (2002), también resaltan que las diferentes formas de la materia orgánica estabilizan los poros y por lo tanto incrementan la persistencia de los mismos cuando son sometidos a distintos tipos de estrés.

Conductividad hidráulica no saturada y saturada

De la misma manera que lo manifestado con la tasa de desecación, la conductividad hidráulica no saturada, estimada a una humedad edáfica entre 0,30 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ y 0,35 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, estuvo vinculada con el carbono orgánico y con la relación carbono orgánico/arcilla (Figura 6).

De acuerdo a los resultados obtenidos, el movimiento de agua a flujo no saturado de los horizontes A y BA/BE estuvo determinado primeramente por su contenido de arcilla (Tabla 1), mientras que cuando este fue similar, la relación carbono/arcilla fue el parámetro que explicó las diferencias encontradas. A su vez el ordenamiento observado en la tasa de movimiento de agua no respondió a la cantidad de esmectitas presente en cada horizonte, ya que de acuerdo a lo manifestado para los horizontes argílicos, el horizonte superficial del suelo 2 tendría

Tabla 3. COLE, volumen ocupado por distintos tamaños de poros (% v/v) y tasa de desecación ($\text{cm}^3 \text{min}^{-1/2}$) correspondiente a los horizontes A y BA/BE

Table 3. COLE, volumen of pores classified by size (% v/v) and dessication rate ($\text{cm}^3 \text{min}^{-1/2}$) of A and BA/BE horizons.

Suelo/ Horizonte	COLE	Volumen de poros mayores a 60 μm	Volumen de poros de entre 60 y 0,2 μm	Volumen de poros menores a 0,2 μm	Tasa de desecación
S1 A	0,037 ab	9,12 a	19,08 a	12,44 b	1,342 a
S2 A	0,027 a	6,68 a	20,50 a	14,42 a	1,256 a
S3 A	0,041 b	4,91 a	20,33 a	13,28 c	1,372 a
S2 BA	0,068 A	7,32 B	35,62 A	16,30 B	1,147 A
S3 BE	0,062 B	9,43 A	21,17 B	19,49 A	0,777 B

Diferencias entre letras minúsculas: diferencias significativas al 0,05 para los horizontes A

Diferencias entre letras mayúsculas: diferencias significativas al 0,05 para los horizontes BA/BE

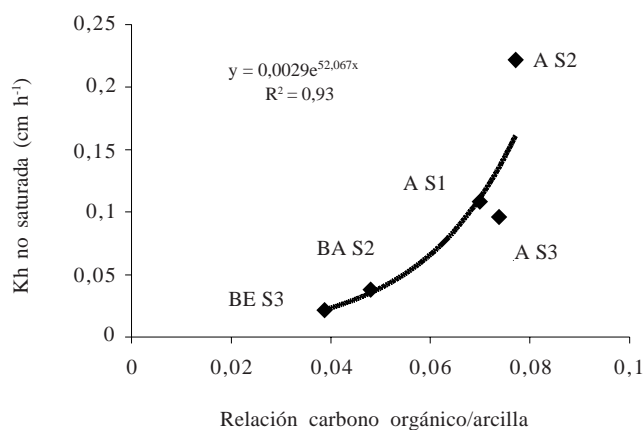


Figura 6. Relación entre la conductividad hidráulica no saturada y la relación carbono orgánico/arcilla
 Figure 6. Relationship between unsaturated hydraulic conductivity and organic carbon/clay content ratio.

que haber tenido una conductividad hidráulica no saturada menor a la de los otros dos suelos.

Debido a la alta variabilidad encontrada en la conductividad hidráulica saturada, no se pudo establecer alguna vinculación entre esta y las restantes propiedades analizadas.

Tasa de infiltración

La tasa de infiltración fue similar entre los horizontes BA y BE de los suelos 2 y 3, independientemente de la porosidad estructural formada entre sus agregados (Figura 7). Contrariamente, el movimiento de agua de los horizontes A dependió en forma significativa de este tipo de porosidad (Figura 7).

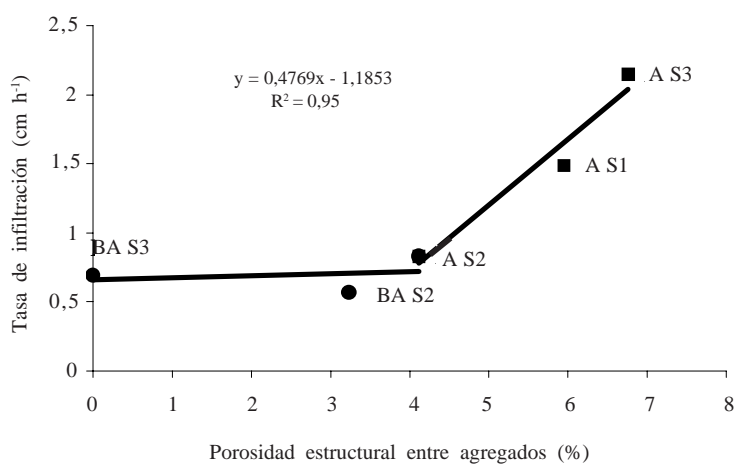


Figura 7. Relación de la tasa de infiltración con la porosidad estructural formada entre los agregados.
 Figure 7. Relationship between infiltration rate and inter-aggregate structural porosity.

La porosidad edáfica puede ser generada por factores abióticos como las labranzas, el tráfico de maquinarias y el proceso de contracción y expansión del suelo, como por la actividad biológica: crecimiento y descomposición de las raíces y la formación de canales por las lombrices (Kay & VandenBygaart, 2002). En el presente trabajo, considerando que estos suelos no habían sido disturbados en los últimos años y que además se observó un efecto regulador de la materia orgánica sobre su capacidad de contracción, la distinta porosidad estructural formada entre los agregados seguramente respondió en mayor medida al efecto de factores biológicos del suelo.

De manera diferente a lo señalado para los horizontes argílicos, en estos horizontes superficiales el movimiento hídrico se daría en forma independiente a las características de las arcillas presentes, influyendo de manera más relevante el contenido de carbono, su relación con la cantidad de arcilla presente y de acuerdo a la porosidad estructural formada entre los agregados.

CONCLUSIONES

Aquellos parámetros que integran el tipo y contenido de arcillas, mostraron estar mejor vinculados con el movimiento de agua edáfica de los horizontes argílicos que cuando se consideró únicamente el porcentaje de arcilla.

La distinta porosidad estructural generada dentro de los agregados de los horizontes Bt, originó diferencias en su difusividad y conductividad hidráulica no saturada a contenidos de humedad por encima del 50% de saturación.

En aquellos horizontes con mayor actividad biológica, el movimiento de agua se realizó en forma independiente a las características de las arcillas presentes, siendo los parámetros relevantes la relación carbono/arcilla y la porosidad estructural formada entre los agregados.

BIBLIOGRAFÍA

- Arya, LM; DA Farell & GR Blake. 1975. A field study of soil water depletion patterns in presence of growing soybean roots: I Determination of hydraulic properties of the soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39: 424-430.
- Casagrande, A. 1932. Research on the Atterberg limits of soils. *Public Roads* 13: 121-130.
- Castiglioni, MG. 2005. Influencia de la organización y composición del espacio poroso y la matriz en la dinámica hídrica de distintos Argiudoles de la Pampa Ondulada. Tesis de Maestría. Escuela para Graduados Alberto Soriano. FAUBA.
- Castiglioni, MG; HJM Morrás; OJ Santanatoglia & MV Altinier. 2005. Contracción de agregados de Argiudoles de la Pampa Ondulada diferenciados en su mineralogía de arcillas. *Ciencia del Suelo* 23(1): 13-22
- Danielson, RE & PL Sutherland. 1986. Porosity. In: A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* 2nd. Ed. *Agronomy* 9: 443-461.
- Favre, F; P Boivin & MCS Wopereis. 1997. Water movement and soil swelling in a dry, cracked Vertisol. *Geoderma* 78: 113-123.
- Grossman, RB; BR Brasher; DP Franzmeier & JL Walker. 1968. Linear extensibility as calculated from natural-clod bulk density measurements. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32: 570-573.
- Hammel, JE; ME Sumner & J Burema. 1983. Atterberg limits as indices of external surface areas of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 1054-1056.
- Imbellone, PA & JE Giménez. 1990. Propiedades físicas, mineralógicas y micromorfológicas de suelos con características vérticas del partido de La Plata (Provincia de Buenos Aires). *Ciencia del Suelo* 8(2): 231-236.
- INTA. 1989. Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires. Secretaría de Agricultura y Ganadería. CIRN. Instituto de Evaluación de las Tierras. Pp 139-152
- Kay, BD & AJ VandenBygaart. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil & Tillage Research* 66: 107-118.
- Klute, A & C Dirsken. 1986. Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory methods In: A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* 2nd. Ed. *Agronomy* 9: 687-734.
- Kutilek, M 1996. Water relation and water management of vertisols. In: N Ahmad and A. Mermut (eds.). *Vertisols and technologies for their management.* Elsevier pp 201-230.
- Lanson, B. 1993. DECOMPXR, X-ray diffraction pattern. ERM, Poitiers, France, 48 pp.
- Lin, HS; KJ McInnes; LP Wilding & CT Hallmark. 1996. Effective porosity and flow rate with infiltration at low tensions into a well structured subsoil. *Trans. of the ASAE* 39(1): 131-133.
- Mc Garry, D & KWJ Malafant. 1987. The analysis of volume change in unconfined units of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 290-297.
- Means, RE & JV Parcher. 1965. Plasticity. In: *Physical properties of soils.* Prentice-Hall of India Ltd. Pags. 68-84.
- Morrás, H; M Altinier; M Castiglioni; C Grasticini; G Ciari & G. Cruzate. 2002. Composición mineralógica y heterogeneidad espacial de sedimentos loessicos superficiales en la Pampa Ondulada". XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn, provincia del Chubut, Argentina. (Resumen Expandido editado en CD)
- Pachepsky, Ya A; WJ Rawls; D Gimenez & JPC Watt. 1998. Use of soil penetration resistance and group method of data handling to improve soil water retention estimates. *Soil Till. Res.* 49: 117-128.

- Sasal, MC & AE Andriulo. 2003. Comparación de dos métodos para determinar la distribución de la porosidad edáfica en dos sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo* 21(2): 74-77.
- Snedecor, GW & WG Cochran. 1989. Statistical methods. 8th Edn (Iowa State University Press/AMES).
- Stengel, P. 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Annales agronomiques* 30(1): 27-51.
- Stengel, P. 1988. Análisis de la porosidad en horizontes de un suelo Brunizem en distintas condiciones de manejo y su relación con el crecimiento de las raíces de Maíz. Informe Técnico N° 211. INTA Pergamino.
- van Alphen, BJ; HWG Bootink & J Bouma. 2001. Combining pedotransfer functions with physical measurements to improve the estimation of soil hydraulic properties. *Geoderma* 103: 133-147.
- Warkentin, BP. 1993. Soil shrinkage. *In: Soil Sampling and Methods of Analysis*. M.R. Carter (ed). Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers 513-518.
- Wosten, JHM; Ya A Pachepsky & WJ Rawls. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. of Hydrol.* 251: 123-150.
- Yule, DF & JT Ritchie. 1980. Soil shrinkage relationships of Texas Vertisols: I. Small core. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 1285-1291.