

DISTRIBUCIÓN DE LA POROSIDAD DE UN SUELO FRANCO ARCILLOSO (ALFISOL) EN CONDICIONES SEMIÁRIDAS DESPUÉS DE 15 AÑOS BAJO SIEMBRA DIRECTA

CECILIA ISABEL CERISOLA¹; MIRTA G GARCÍA² & ROBERTO R FILGUEIRA³

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Calles 60 y 119, CC 31 - (1900) La Plata-Buenos Aires, Argentina.
Email: ¹ccerisola@infovia.com.ar ²roussygarcia@infovia.com.ar ³filgueira@infovia.com.ar. ⁽³⁾ Investigador del CONICET.

Recibido: 01/07/05

Aceptado: 19/09/05

RESUMEN

A partir de un estudio más amplio sobre evolución de las propiedades físicas de un suelo sometido a tres sistemas de labranza, se realizó, en dos campañas consecutivas, un seguimiento de la distribución de la porosidad del suelo según su origen, en parcelas cultivadas bajo siembra directa continua durante 15 años. En el ensayo se consideró un trayecto de 2 metros de longitud, perpendicular a la dirección de las labores, donde se realizaron mediciones de densidad aparente seca y contenido de humedad. El cultivo extensivo de secano (cereal), en cada una de las dos campañas, fue cebada de ciclo corto y de ciclo largo. El calendario de la toma de datos de las variables medidas se fijó en 5 fechas por campaña. La porosidad estructural del suelo, debida principalmente a la alternancia de ciclos de humectación-deseccación, fue calculada cada 5 cm y hasta 35 cm de profundidad. Este proceso de fisuración natural resulta suficiente para asegurar un buen drenaje y facilitar el desarrollo radicular de las plantas, siempre y cuando el contenido de humedad se mantenga dentro de la capacidad de retención de agua.

Palabras clave.

SOIL POROSITY DISTRIBUTION OF A CLAY LOAM SOIL (ALFISOL) IN SEMI-ARID CONDITIONS AFTER 15 YEARS UNDER DIRECT DRILLING

ABSTRACT

On a long-term essay under direct drilling, the evolution of the physical properties of a clay loam soil, such as distribution by origin of soil porosity, has been assessed during two growing seasons. The grain crops in each growing season were spring barley and winter barley, respectively. Soil physical properties were measured on a 2 m length transect located on a perpendicular line to the direction of vehicular traffic for field operations. Five sampling opportunities in each crop cycle, were used to measure the variables. Structural soil porosity, due principally to shrinkage and swelling cycles, was assessed in the 0 to 35 cm depth soil profile. This natural process seemed to be sufficient to guarantee good drainage and normal crop development, unless in the moisture content range included in field capacity.

Key words. Direct drilling, structural soil porosity, moisture content, water-air filled porosity

INTRODUCCIÓN

El estudio de la evolución de la estructura de un suelo sometido a acciones mecánicas y climáticas puede abordarse a partir de un seguimiento de las propiedades físicas que lo caracterizan. Entre estas propiedades, la más importante es la porosidad, ya que relaciona el volumen de suelo que exploran las raíces con el volumen disponible para el agua y el aire que requieren en su desarrollo. De este modo, al comparar diferentes estados estructurales, cuando el contenido de agua y/o la textura del suelo son variables, resulta más adecuado realizar una distinción entre el espacio poroso de origen textural y el de origen estructural que no la simple determinación de la porosidad total (Guerif, 1987). Desde el punto de vista agronómico, procesos como la compactación conducen a una modificación del volumen de poros del suelo que afecta, en mayor o menor medida, el desarrollo del cultivo. De ese volumen dependen tanto los fenómenos de

transferencia de calor, gases, agua y solutos, como las propiedades mecánicas de resistencia a la penetración y resistencia a la rotura (Sánchez-Girón, 1996).

La utilización del llamado "Modelo Capilar" (Thomsson, 1978), fundamentado en valores arbitrarios del diámetro de poros, puede resultar útil para explicar la retención o circulación de agua en el suelo, pero no a los efectos de prever la evolución de este espacio poroso bajo las acciones propias que conducen a la implantación y desarrollo de un cultivo. Se trata de diferenciar, en el volumen total de poros, diferentes fracciones que resultan de la acción de alguno de los factores de variación de ese volumen. Es decir, clasificar los poros según su origen (Stengel, 1979).

La Escuela francesa define dos grandes grupos de factores de variación de la porosidad total (**PT**) del suelo: 1) **la constitución granulométrica** (mineralógica y

orgánica), que condiciona la forma de agrupamiento de las partículas elementales del suelo, generando así un sistema de porosidad que puede ser calificado de **textural (Ptx)** y 2) **los antecedentes** (climáticos, biológicos y mecánicos) sobre el suelo, de cuyas acciones resulta un segundo sistema de porosidad, llamado **estructural (PE)**. La porosidad textural depende, pues, de la constitución mineral y orgánica del material y de su contenido en agua. La puesta a punto de una técnica para construir las curvas de expansión-contracción que caracterizan al suelo, permite determinar su porosidad textural (Monnier *et al.*, 1973). Las muestras de agregados de suelo de 2-3 mm de diámetro, contienen un volumen suficientemente pequeño y mantienen constante su porosidad. Esto hace suponer que su origen es textural (Guerif, 1987). La porosidad estructural queda calculada por diferencia, $PE = PT - Ptx$, cuando ambas están referidas a un mismo volumen aparente de suelo. Esto permite aplicarla en el estudio de los efectos que las diferentes técnicas de manejo, para la implantación de cultivos, tienen sobre las propiedades físicas del suelo. Los orígenes de la porosidad estructural son complejos y la principal dificultad para determinarla surge de la propia definición: diferencia entre la porosidad total y la porosidad textural. En suelos no labrados se genera, principalmente, por acciones biológicas y fenómenos de expansión-contracción. Según Stengel (1986), la porosidad estructural de un suelo que no se labra alcanza, a partir del tercer año, un equilibrio que depende de la humedad del mismo.

Otros autores, no pertenecientes a la Escuela francesa, han realizado estudios sobre la porosidad de los suelos sometidos a distintas técnicas de labranza. Así, refiriéndose a los sistemas de no laboreo, Ehlers (1976) y Goss *et al.* (1978), han demostrado una mayor rapidez de infiltración del agua de lluvia en estos sistemas que en los de laboreo convencional. Dowdell *et al.* (1979), encontraron que con el no laboreo son mayores las concentraciones de oxígeno en el invierno, y Ellis & Barnes (1980), que en algunos suelos las raíces exploran horizontes más profundos del perfil del suelo. La economía del agua resulta decisiva en zonas semiáridas, donde las precipitaciones son insuficientes y erráticas. Al respecto, Unger (2002), considera muy importante el almacenaje de agua en el suelo para minimizar los efectos adversos de su escasez durante el desarrollo del cultivo. Para este mismo autor, la cantidad de agua almacenada depende de la textura del suelo y su profundidad. La presencia de residuos disminuye la velocidad de escurrimiento del flujo, favoreciendo la infiltración, a la vez que esta cubierta reduce las pérdidas por evaporación.

Para Ellis *et al.* (1979), la explicación más probable del aumento de poros continuos en los suelos no labrados está asociada a las grietas que se producen entre los

elementos estructurales. Barnes & Ellis (1979) creen que puede deberse también a una mayor actividad de las lombrices. Este aspecto también fue cuantificado por De Battista *et al.* (1997), quienes encontraron por debajo de la capa superficial cubierta por rastrojo de soja, una zona de gran porosidad estructural por acción de las lombrices.

Por otro lado, otros autores [Bonne *et al.*, (1976); Pidgeon & Soane (1977); Gantzer & Blake (1978) y Lindstrom *et al.*, (1984)], coincidieron en señalar dos características de los suelos bajo siembra directa con relación a sistemas convencionales: los valores de densidad aparente del suelo son superiores y el volumen de los grandes poros (con diámetros equivalentes mayores a 50 mm), o de los poros de transmisión, resulta menor en los horizontes superficiales. No obstante, para Henderson (1979), siempre que las condiciones físicas del suelo sean favorables para el desarrollo de las raíces, la porosidad presente debe garantizar el agua y aire necesarios, el laboreo no tiene efecto alguno sobre el cultivo.

La hipótesis de este trabajo admite que un volumen escaso de poros estructurales, en sistemas bajo siembra directa, es capaz de asegurar el equilibrio de agua y aire en las capas superficiales del suelo y un desarrollo satisfactorio del cultivo, siempre y cuando el contenido de humedad se mantenga dentro de la capacidad de retención, comprendida entre el contenido de humedad del suelo a capacidad de campo (CC, 0,33 bar) y el correspondiente al punto de marchitez permanente (PMP, 15 bar).

Los objetivos de este estudio fueron: realizar un seguimiento, a lo largo de dos campañas agrícolas, de la porosidad estructural y textural del suelo; evaluar los contenidos de aire y agua que permitieron la implantación, desarrollo y producción final de un cultivo extensivo de cereal en régimen de secano bajo siembra directa de larga duración.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del ensayo. Finca "El Encín", situada en la localidad de Alcalá de Henares, Comunidad Autónoma de Madrid, España. Su altitud media sobre el nivel del mar es de 610 m y sus Coordenadas geográficas: 40° 31' de Latitud Norte y 3° 17' de Longitud Oeste.

Suelo. Clasificado como Alfisol, Grupo Haploxeralf, Subgrupo Vértico. Este tipo de suelos se caracteriza por la presencia de grandes grietas cuando se deseca. El perfil descrito presentó la siguiente secuencia de horizontes: Ap (0-18 cm), AB (18-55 cm), B1t (55-82 cm), B2t (82-120 cm) y BC (120-150 cm). Los contenidos de materia orgánica fueron los habituales en los suelos de secano de la zona donde se ha practicado una agricultura continua cerealista (Tabla 1). Con el objeto de conocer si las tres parcelas seleccionadas se encontraban sobre un suelo homogéneo, se abrieron calicatas, una por cada parcela en estudio. Se tomaron muestras

de los primeros 40 cm del perfil, a intervalos de 5 cm, con el fin de conocer el análisis granulométrico (Tabla 1). Dado que los porcentajes resultaron muy similares, evidenciaron homogeneidad textural de los tres perfiles hasta la profundidad de 40 cm, se consideró este límite inferior para la realización de todas las medidas que afectan a las propiedades físicas del suelo estudiado. Promediando los valores de arcilla, limo, arena fina y arena gruesa de los perfiles correspondientes a las tres parcelas, el suelo de este ensayo, según el triángulo textural USDA, correspondió a un franco arcilloso (Tabla 1).

Clima. Corresponde a mediterráneo seco con una media anual de precipitación de 470 mm. Las dos campañas estudiadas no se desviaron significativamente de la media anual. Cabe destacar que el período que comprende la implantación y desarrollo del cultivo (cebada de ciclo corto y largo, en la primera y segunda campaña, respectivamente), otoño - invierno - primavera, registró 400 mm, volumen de precipitación que también coincide con los registros medios.

Cultivo. En la primera campaña, se decidió sembrar una cebada de primavera (*Hordeum vulgare* L. var. Hassan), a razón de 180 kg/ha, y en la segunda campaña, una cebada de invierno (*Hordeum vulgare* L. var. Barbarrosa), a razón de 200 kg/ha. Ambas variedades y dosis de siembra son las recomendadas por el Servicio de Extensión Agraria de la Comunidad Autónoma de Madrid para la comarca natural donde se encuentra ubicada la Finca "El Encín".

Parcelas, toma de datos y calendario de muestreo. En un ensayo donde se comparaban tres sistemas de labranza, distribuidos con un diseño de bloques completamente aleatorizados, se escogieron las tres parcelas (cada una de 30 m x 12 m) que llevaban 15 años bajo siembra directa. La toma de datos se realizó sobre un trayecto de 2 m de longitud, perpendicular a la dirección de las labores. Estos trayectos fueron consecutivos y paralelos entre sí, abarcando siempre el mismo ancho, a fin de detectar la evolución de las propiedades estudiadas. Esta metodología permite reducir la heterogeneidad natural del suelo y no dispersar los datos en una gran superficie. Según Dexter (1988), concentrando las observacio-

Tabla 1. Resultado del análisis granulométrico y contenido de materia orgánica, efectuado en cada una de las tres parcelas, de 5 a 40 cm.

Table 1. Result of the soil particle analysis and organic matter in each one of the three plots, in the 5 to 40 cm depth range.

Parcela/ Profundidad (cm)	GRANULOMETRÍA (%)				MATERIA ORGÁNICA (%)
	Arena gruesa	Arena fina	Limo	Arcilla	
Parcela 1					
5	16,5	27,1	29,5	26,9	1,23
10	14,4	24,5	34,4	26,7	1,20
15	15,9	25,5	30,6	28,0	1,21
20	16,9	27,1	29,0	27,1	0,50
25	13,7	25,3	34,3	26,7	0,51
30	17,6	25,6	30,6	26,2	0,52
35	13,0	26,1	34,0	26,9	0,48
40	12,3	24,8	35,1	27,7	0,47
Parcela 2					
5	20,4	24,4	27,7	27,5	0,79
10	18,2	25,1	29,7	27,0	0,80
15	19,1	25,9	28,7	26,3	0,78
20	19,1	25,5	29,1	26,4	0,60
25	19,4	25,5	26,3	28,9	0,62
30	18,8	26,0	27,4	27,8	0,63
35	14,9	23,7	32,3	29,1	0,61
40	10,9	22,7	36,3	30,2	0,60
Parcela 3					
5	18,0	25,4	28,3	28,3	1,05
10	18,3	24,8	28,1	28,8	1,09
15	18,2	25,1	28,0	28,7	1,07
20	19,1	24,5	28,9	27,4	0,73
25	16,6	26,3	30,2	26,9	0,74
30	18,6	25,4	30,1	26,0	0,72
35	17,0	26,7	29,5	26,8	0,70
40	14,6	25,9	30,3	29,1	0,70
Promedio y desviación estándar	16,72 ± 2,51	25,37 ± 1,00	30,35 ± 2,67	27,55 ± 1,11	Promedio 0-15 cm: 1,02 % Promedio 20-40 cm: 0,61%

nes en el trayecto de 2 m se reducen las diferencias debidas a la variabilidad espacial de las diferentes propiedades del suelo que definen la estructura del mismo.

El calendario de la toma de datos se fijó en 5 fechas por campaña, coincidiendo con el momento de instalación del cultivo (siembra), el crecimiento vegetativo del cereal (invierno), el período de encañado (primavera), una vez finalizada la recolección (cosecha) y después de las primeras lluvias (otoño).

Las operaciones culturales consistieron en la aplicación de un herbicida total, seguido de la operación conjunta de siembra y fertilización, una segunda aplicación de fertilizante nitrogenado en el período de macollaje del cultivo y, finalmente, la operación de cosecha.

Las variables medidas en campo fueron: densidad aparente del suelo (das), mediante un equipo de radiación gamma por atenuación, y contenido de humedad gravimétrico (%H). Sobre el trayecto de 2 m de longitud se practicaron 10 orificios, distanciados a 22 cm que es la separación entre los brazos de la sonda, con una barrena especialmente diseñada y la ayuda de una base de hierro para conseguir esta separación. Se extrajeron muestras de suelo cada 5 cm hasta 35 cm de profundidad en cada uno de los orificios y se obtuvo el contenido de humedad por diferencia de pesadas después de secar las muestras en estufa durante 48 horas a 105 °C. Contabilizando las tres parcelas del ensayo, esto dio un total de 30 muestras de humedad y 27 valores de densidad aparente, medida entre dos orificios consecutivos, en cada fecha y a cada profundidad estudiada por campaña.

En laboratorio se determinaron: la densidad real o del sólido, d_r , por picnometría al agua, obteniéndose un valor de 2,71 g/cm³; la curva de retención de humedad del suelo, o curva de pF, por la técnica de presión sobre una placa cerámica (Richards, 1928) y la curva de expansión-contracción del suelo. En la construcción de ambas curvas, representativas del suelo en estudio, se utilizaron muestras de agregados tamizados entre 2-3 mm de tamaño, que garantizan la ausencia de poros estructurales en su interior. Para

la curva de retención de humedad se trabajó con muestras de, aproximadamente, 80 g de agregados, sometidos a diferentes presiones después de haberlos saturado con agua al vacío. En la Figura 1 se representa esta curva característica. Para la curva de expansión-contracción, se usaron 2 g de agregados por muestra a diferentes contenidos de humedad, que permitieron conocer en cada punto como variaba su volumen específico, o volumen máscico, V_m . También se conoce el V_m como la inversa de la densidad de agregados, 1/dag (cm³/g). La metodología que se ha seguido constituye una variante de la técnica de porosimetría al keroseno en terrones, ya descrita por Hènin y colaboradores en 1969 (Monnier *et al.*, 1973). Consiste en saturar, con un líquido convenientemente elegido, la porosidad de una muestra de tierra de peso seco conocido y medir su volumen aparente por pesada hidrostática en el mismo líquido. Es suficiente que el llenado de los poros con el líquido (keroseno de densidad conocida) alcance una proporción estable, sumergiendo la muestra alrededor de 1 hora, a fin de evitar que el llenado aumente en el curso de la pesada hidrostática. Esta técnica evita que se modifique la distribución de la porosidad por contracción, al utilizar un líquido no polar (Sasal & Andriulo, 2003). La curva obtenida apenas si varía con el tiempo y está ligada al contenido de humedad mediante una curva de contracción que también es estable con el tiempo, por ser estables el material coloidal, orgánico e inorgánico, del suelo. La curva teórica puede verse en la Figura 2. En ella se distinguen tres tramos. El tramo **I** coincide con la recta de saturación que representa un sistema saturado teórico de dos componentes (sólido y agua), de manera que la pérdida de una cierta cantidad de agua supone una reducción equivalente del volumen de poros. Este tramo, también denominado zona de contracción normal, se obtiene con muestras de mayor tamaño, donde está presente la porosidad estructural. El tramo **II**, contracción residual, se inicia cuando se alcanza el contenido de humedad correspondiente al punto A o punto de entrada de aire en el interior de los poros de los agregados; la contracción de los mismos continúa pero en menor medida que el agua que pierden. Esta segunda zona, también llamada estructural (Stirk,

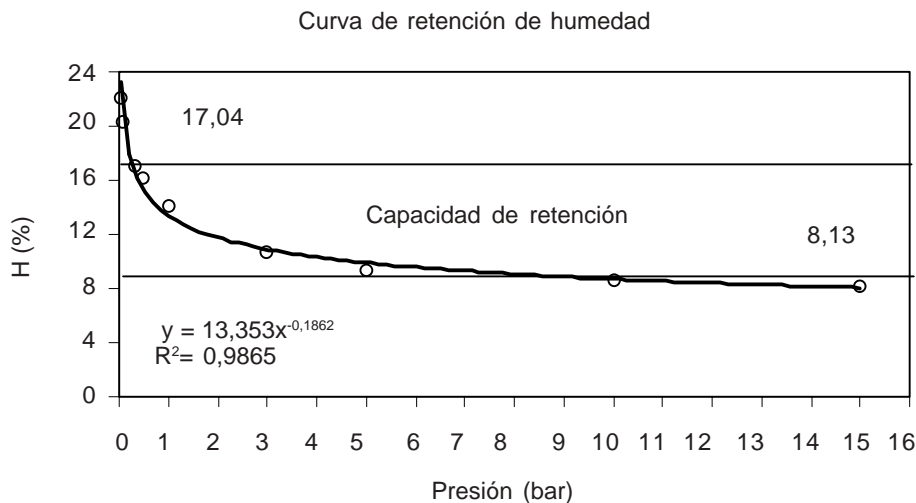


Figura 1. Curva típica de retención hídrica del suelo obtenida en este trabajo. Los círculos representan los datos experimentales y la línea la función obtenida en el ajuste.

Figure 1. A typical soil water retention curve obtained in this work. Open circles, are experimental data and the line represents the fitted function.

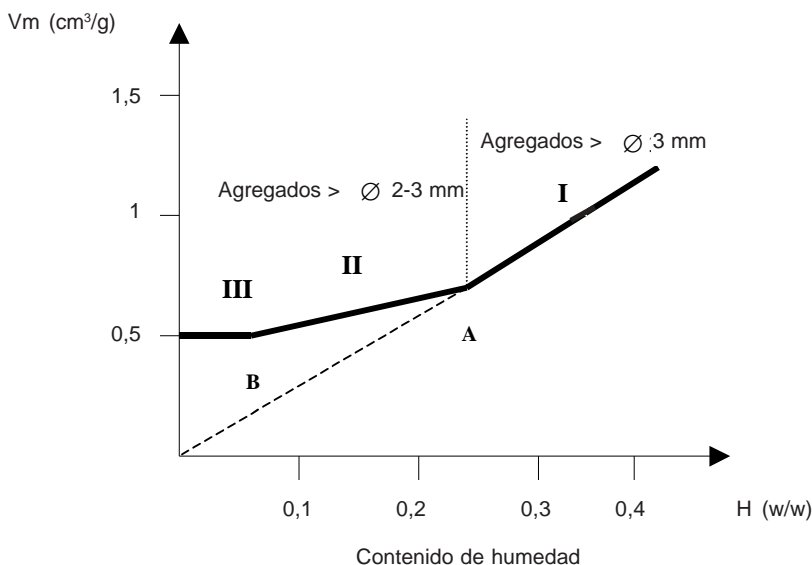


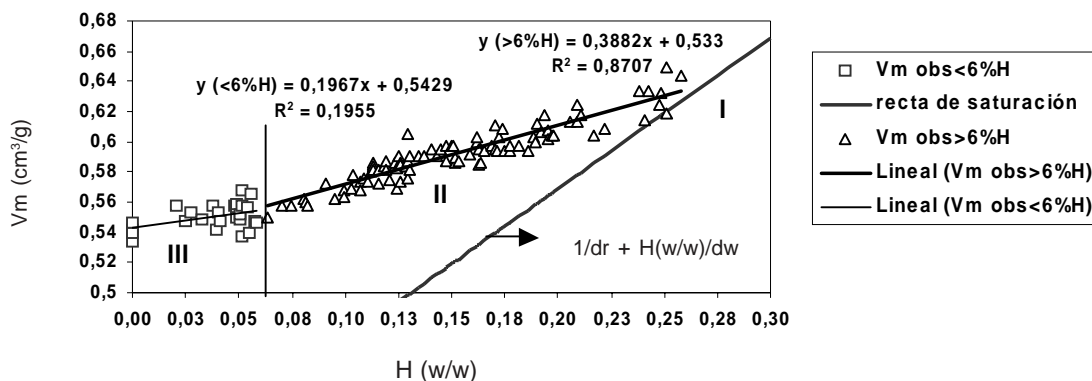
Figura 2. Evolución teórica de la contracción del volumen de los agregados de 2-3 mm de diámetro en función del contenido hídrico. Vm = volumen másico

Figure 2. Theoretical evolution of aggregate volume shrinkage upon water content. Vm = specific volume

1954; Mc Garry & Daniells, 1987; Mc Garr & Malafant 1987; Coughlan *et al.*, 1991, citados por Barbosa *et al.*, 1999 y Cosentino & Pecorari, 2002), está presente en suelos arcillosos como los Vertisoles. Cuando el contenido de humedad llega al punto **B**, límite de contracción, se inicia el tramo **III**, donde toda pérdida de humedad tiene lugar sin una reducción del volumen de poros texturales de los agregados.

En la curva obtenida a partir de los datos experimentales se identificaron los tramos II y III, representados en la Figura 3, que se ajustaron mediante líneas de regresión. El límite entre ambos tramos, punto B de la curva teórica, estaba situado en valores de contenido de humedad mayores al 6%, tramo II, y menores o iguales al 6%, tramo III. Debido a la dificultad de fijar objetivamente el límite entre ambos tramos, se calculó la expresión de regresión

Curva expansión - contracción con valores observados (0-40 cm)



Vm: volumen másico - H(w/w): contenido de humedad gravimétrico - dr: densidad real - dw: densidad del agua

Figura 3. Evolución de la contracción, con dos tramos, obtenida experimentalmente. La regresión se ha hecho en los dos tramos.
Figure 3. Soil volume shrinkage, with two sections, obtained from experimental data. The fitting of data was performed in two the sections.

con todos los valores, obteniéndose la curva de contracción de la Figura 4.

A partir de la Figura 5, que representa un volumen aparente de suelo, se dedujeron las expresiones matemáticas que permitieron calcular la **PE** y **Ptx**, así como el Índice de poros estructurales (**IPE**) y texturales (**IPTx**). La suma de ambos índices corresponde al Índice de poros totales (**IPT**), también llamado Índice de Vacío (**e**). El Índice de agua (**Iw**) se define como la relación entre el volumen de agua (**Vw**), presente en los poros texturales, y el volumen del sólido (**Vs**), y el Índice de aire (**Ia**), se calculó por diferencia entre el Índice de poros texturales (**IPTx**) y el Índice de agua (**Iw**).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al analizar los valores obtenidos en la curva de expansión-contracción del suelo (Figura 3), se observó que el tramo recto, o de no contracción, podía acotarse a contenidos de humedad iguales o inferiores al 6%. En este tramo, el **Vm**, o inversa de la densidad de agregados, **1/dag**, se ajustó a la siguiente expresión:

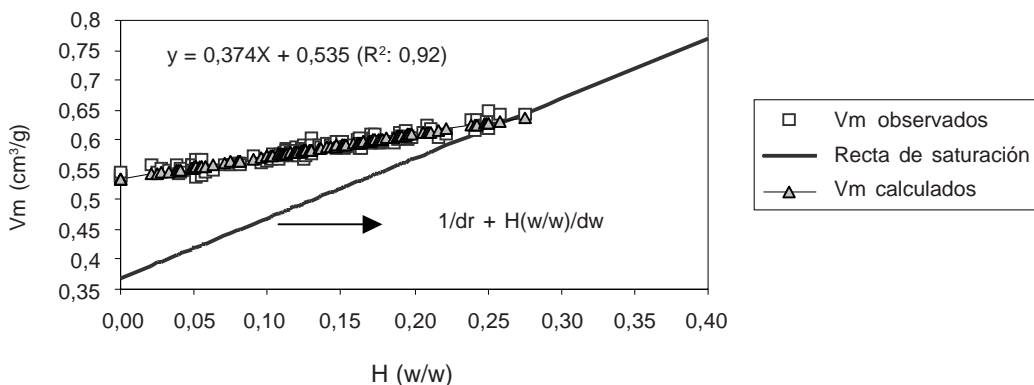
$$\frac{1}{dag} = 0,1967 H + 0,543 \text{ (cm}^3\text{/g)}$$

con un $R^2 = 0,20$, mientras que el tramo de contracción residual, para contenidos de humedad mayores al 6%, quedaba expresado por:

$$\frac{1}{dag} = 0,388 H + 0,533$$

con un $R^2=0,87$. La pendiente de esta recta, 0,388, indica una contracción menor en relación con el agua que se pierde por secado. Esto se debe a la aparición de una porosidad de aire (ausente si la pendiente fuera la unidad), capaz de intervenir en la recuperación estructural del suelo por agrietamiento y formación de fisuras. En el tramo III o de no retracción, la pendiente es aún menor, 0,1967, como resultado del proceso de contracción irreversible. En esta zona de la curva, el volumen permanece prácticamente invariable con la pérdida de agua, creando así poros llenos de aire. Al prolongar la recta de saturación hasta el punto donde corta el eje de ordenadas, los valores ubicados entre este punto (0,37 cm³/g) y el correspondiente al Vm del tramo de no retracción de la curva (0,54 cm³/g), representan el volumen de poros ocupados por el aire (0,17 cm³/g). Este volumen, expresado como Índice de poros texturales (Iptx), es 0,46. Corresponde a la proporción de aire (aproximadamente 1/3 del volumen de los agregados) que tiene el espacio poroso cuando el contenido de humedad desciende por debajo del 6% (w/w). El Vm en el punto de saturación de la curva (27% H) es 0,64 cm³/g y el espacio poroso ocupa un volumen de 0,27cm³/g, que expresado como IPTx es 0,73. Entre ambos contenidos extremos de humedad sólo se produce una reducción de porosidad del 27%. Dicho de otra manera, al disminuir el contenido de agua, aumentan los puntos de contacto entre el esqueleto y la arcilla, formando porosidad lacunar o textural (Pecorari, 2002). El esqueleto, constituido por un 42% de arena, permite multiplicar los puntos de contacto con la fracción arcillosa, confiriéndole características de rigidez (Towner, 1988). Así, cuando el suelo se seca (primavera y verano), como consecuencia de las escasas precipitaciones, es

Curva expansión - contracción con valores observados y calculados



Vm: volumen másico - H(w/w): contenido de humedad gravimétrico - dr: densidad real - dw: densidad del agua

Figura 4. Evolución de la contracción con el conjunto de los datos. El ajuste se ha hecho considerando que hay un solo tramo. Figure 4. Soil volume shrinkage with all experimental data. The fitting of data was performed considering only one section

posible visualizar grandes grietas. Esta regeneración natural de la estructura permite la circulación de agua y aire así como la exploración radicular, mientras que la porosidad textural garantiza el necesario equilibrio en la fase porosa.

Debido a la dificultad de fijar objetivamente el punto B, límite entre ambos tramos, y no habiendo obtenido muestras en el ensayo a campo con contenidos de humedad por debajo del punto de marchitez permanente, PMP, equivalente a 8,13% a 15 bar, se calculó la expresión de regresión con todos los valores, obteniéndose la siguiente ecuación con un $R^2=0,92$ (Figura 4):

$$\frac{1}{\text{dag}} = 0,374 * H + 0,535$$

donde:

1/dag = volumen másico de los agregados

dag = densidad de los agregados

H = contenido de humedad del suelo expresado en tanto por uno

A partir de esta regresión, es posible calcular la porosidad textural (Ptx) de las muestras obtenidas en campo a distintos contenidos de humedad. Conociendo la porosidad total (PT), por valores de densidad aparente seca (das), se obtiene por diferencia la porosidad estructural, $PE=PT-Ptx$.

En cuanto al análisis de la PE, obtenida en cada profundidad a lo largo del trayecto y en las dos campañas agrícolas, se observó que en las dos fechas iniciales, siembra e invierno, se registraron los valores más bajos de PE. Superficialmente, a 5 cm, las rodadas correspondientes a la operación de siembra pueden haber provocado compactación. Pecorari (1998), considera que la capa superior de los suelos cultivados sufre esfuerzos mecánicos ejercidos por las máquinas y los agentes naturales (impacto de la gota de lluvia, ciclos de humedecimiento y secado). Para este mismo autor sus efectos son contradictorios (fragmentación y compactación) y heterogéneamente distribuidos.

En ambas campañas, los valores obtenidos de PE, oscilaron entre el 5% y el 10% en los primeros estadios de desarrollo del cultivo (Tabla 2). Este mismo suelo bajo labranza convencional, registró en el momento de la siembra, valores de PE entre 25%, a 35 cm, y 38% en los primeros 15 cm. Al considerar los valores medios de todo el perfil (0-35 cm), la PE en siembra directa, alcanzó el 6,65% y el 5,08% en las fechas de siembra e invierno de la primera campaña y de 4,83% y 6,50% en las mismas fechas de la segunda campaña (Tabla 2). Por su parte, el laboreo

convencional, en el mismo periodo, presentó una PE media de 35% y 12% en la primera campaña y de 33% y 14% en la segunda campaña.

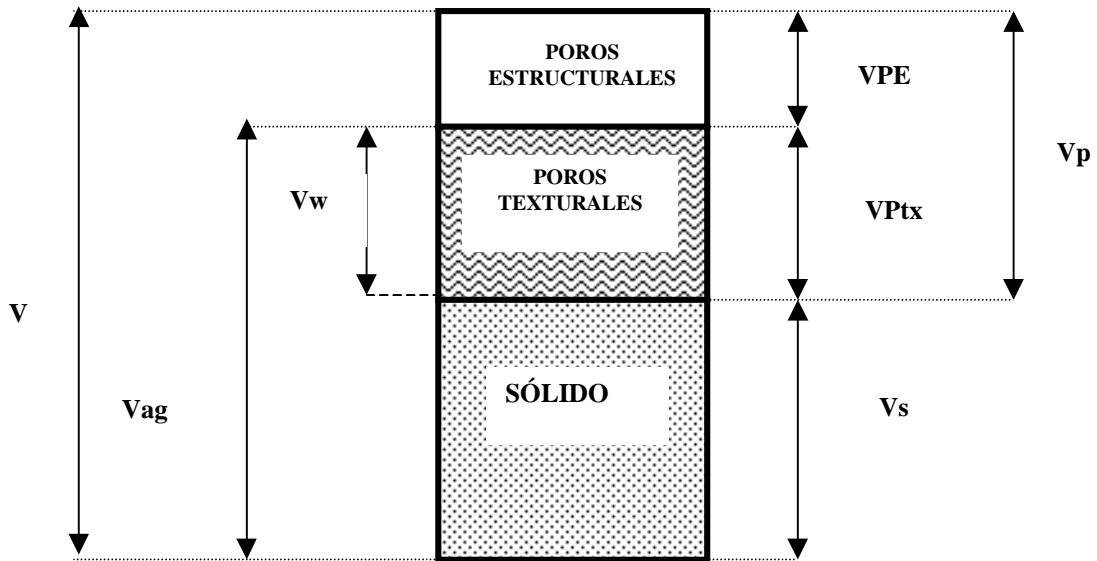
Estos menores porcentajes de PE, en siembra directa, coincidieron con las fechas en que el suelo estaba más húmedo y compactado: siembra e invierno (Tabla 3), mientras que los elevados valores en el laboreo convencional se debieron a las operaciones de labranza. Siguiendo con el análisis de la PE en siembra directa, este comportamiento fue atribuido a una disminución del volumen de poros estructurales, ya que, al aumentar el contenido de agua, aumenta el volumen de la arcilla expansiva (montmorillonita) presente en el suelo. A esto habría que sumarle, según Pagliai (1987), el estrés físico producido por las precipitaciones que incrementan la compactación del suelo, reduciendo, principalmente, los grandes poros que caracterizan a la PE.

En las fechas correspondientes al final de ambas campañas: verano y otoño y también en la de primavera, los porcentajes de PE fueron mayores que al inicio de la misma: siembra e invierno. El incremento de estos porcentajes en más del 100%, no puede atribuirse a que el suelo esté mejor estructurado al final de la campaña, sino a la presencia de grietas, generadas por los ciclos de humectación-dsecación, que se sucedieron en el Alfisol que se estudia. La porosidad estructural encontrada fue, pues, predominantemente de origen climático (Tabla 2).

Si bien el incremento de la PE, a medida que el suelo se secaba, presentó la misma tendencia en las dos campañas, las variaciones encontradas entre ellas en algunas fechas (primavera y verano) es lógico atribuir las a la variabilidad del suelo y a la formación de grietas por desecamiento del mismo (Cerisola, 1993).

Al analizar este comportamiento a través del Índice de poros totales (IPT), se observó que el Índice de poros texturales (Iptx) presentaba pequeñas variaciones en función del contenido hídrico, mientras que el Índice de poros estructurales (IPE), fluctuaba a lo largo de ambas campañas (Figura 6). La estabilidad de la porosidad textural, frente a las acciones compactadoras externas, permite considerar este análisis del espacio poroso en los estudios de compactación del suelo y en sus efectos sobre el desarrollo del cultivo. Fies & Zimmer (1982) y Guerif (1987), citados por Sánchez-Girón (1996), comprobaron que dentro del intervalo de presiones al que se encuentran sometidos los suelos agrícolas, excepto en los casos donde la textura es muy arenosa, la porosidad textural se mantiene estable.

El suelo en estudio nunca llegó a saturarse, por lo que, prácticamente, no se registraron valores de humedad por encima de la capacidad de campo (17,04% a 0,33 bar). En la Figura 7, se muestra a través del IPT, como se repararieron los volúmenes de aire y agua en el espacio poroso



V = volumen total

V_p = volumen de poros

V_{ag} = volumen de agregados

V_s = volumen de sólido

V_{PE} = volumen de poros estructurales

V_{Ptx} = volumen de poros texturales

V_w = volumen de agua

$$\text{Porosidad total} = PT = \frac{V_p}{V} = 1 - \frac{d_{as}}{d_r}$$

$$\text{Índice de poros totales} = IPT = \frac{V_p}{V_s} = \frac{d_r}{d_{as}} - 1$$

$$\text{Porosidad estructural} = PE = \frac{V_{PE}}{V} = 1 - \frac{d_{as}}{d_{ag}}$$

$$\text{Índice de poros estructurales} = IPE = \frac{V_{PE}}{V_s} = d_r \left(\frac{1}{d_{as}} - \frac{1}{d_{ag}} \right)$$

$$\text{Porosidad textural} = Ptx = \frac{V_{Ptx}}{V} = d_{as} \left(\frac{1}{d_{ag}} - \frac{1}{d_r} \right)$$

$$\text{Índice de poros texturales} = Iptx = \frac{V_{Ptx}}{V_s} = \frac{d_r}{d_{ag}} - 1$$

$$\text{Índice de agua} = I_w = \frac{V_w}{V_s} = d_r \quad H(\%)$$

$$\text{Índice de aire} = I_a = Iptx - I_w$$

d_{as} : densidad aparente seca; d_r : densidad real; d_{ag} : densidad de agregados;
 $H(\%)$: contenido de humedad gravimétrico (w/w)

Figura 5. Representación del volumen aparente de suelo y ecuaciones del sistema de porosidad utilizado.

Figure 5. Representation of the bulk volume of soil and equations defining the porosity system used .

Tabla 2. Valores medios de porosidad estructural, PE (%), a cada una de las profundidades estudiadas, en cada época de muestreo y a lo largo de las dos campañas agrícolas.

Table 2. Mean values of soil structural porosity, PE (%), at every studied depth and time of sampling, throughout two growing seasons.

lera. campaña	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm	media
Siembra	1,79	5,09	8,58	10,76	5,23	5,85	9,28	6,65 (±3,06)
Invierno	1,58	4,78	6,86	8,21	4,76	2,99	6,34	5,08 (±2,29)
Primavera	14,03	9,07	12,73	14,97	14,55	6,95	6,73	11,29 (±3,61)
Cosecha	18,70	16,31	16,97	18,22	15,83	12,78	9,68	15,50 (±3,21)
Otoño	5,09	9,29	13,85	13,81	9,54	10,29	13,85	10,82 (±3,28)
2da.campaña								
Siembra	1,27	3,09	6,28	8,37	3,79	3,76	7,26	4,83 (±2,53)
Invierno	4,49	4,85	7,70	10,32	11,83	2,96	3,37	6,50 (±3,50)
Primavera	21,87	21,37	22,93	21,58	18,10	16,55	16,96	19,91 (±2,62)
Cosecha	13,22	10,51	13,02	12,74	8,45	6,58	7,14	10,24 (±2,86)
Otoño	13,07	12,33	13,31	12,58	9,07	8,83	9,29	11,21 (±2,04)

Valores entre paréntesis corresponden a desvíos estándar
Values in parenthesis correspond to standard deviation

Tabla 3. Valores medios de densidad aparente seca, das, (g/cm³) y contenido de humedad gravimétrico (%H), a cada profundidad estudiada, en cada época de muestreo y en las dos campañas agrícolas.

Table 3. Mean values of soil bulk density, das, (g/cm³) and moisture content (%H), at every studied depth and time of sampling, throughout two growing seasons.

Campaña 1	5 cm		10 cm		15 cm		20 cm		25 cm		30 cm		35 cm	
	das	%H	das	%H	das	%H	das	%H	das	%H	das	%H	das	%H
Siembra	1,70	14,67	1,63	13,68	1,57	13,41	1,53	13,21	1,63	13,09	1,63	12,16	1,58	10,84
Invierno	1,66	17,82	1,70	15,72	1,59	14,58	1,57	14,64	1,66	13,81	1,70	13,81	1,61	15,07
Primavera	1,55	6,07	1,65	7,76	1,55	7,77	1,51	7,83	1,52	8,01	1,65	8,71	1,67	8,89
Cosecha	1,51	2,05	1,56	3,14	1,51	4,15	1,48	5,46	1,51	6,46	1,56	7,02	1,62	6,68
Otoño	1,60	16,44	1,54	15,23	1,46	15,06	1,47	14,75	1,54	14,51	1,54	13,05	1,52	9,38
Campaña 2	5 cm		10 cm		15 cm		20 cm		25 cm		30 cm		35 cm	
Siembra	1,73	15,02	1,66	14,03	1,60	13,70	1,57	13,43	1,66	13,49	1,67	12,46	1,62	10,99
Invierno	1,65	12,55	1,65	12,34	1,60	12,29	1,55	12,31	1,60	12,55	1,69	12,58	1,71	12,59
Primavera	1,39	7,18	1,39	8,96	1,36	9,49	1,38	9,91	1,43	10,28	1,46	10,44	1,45	10,34
Cosecha	1,57	4,76	1,61	6,44	1,56	6,36	1,57	6,47	1,65	6,27	1,68	6,73	1,67	7,07
Otoño	1,47	15,42	1,50	14,23	1,48	13,82	1,51	13,90	1,59	13,88	1,59	13,73	1,56	13,12

en las dos campañas. La evolución que experimentó este espacio fue la misma en los dos años considerados.

En la Tabla 4, se resumen las producciones obtenidas y los valores de peso medio de cosecha (g) por planta establecida, bajo siembra directa y laboreo convencional. Conseguir un buen establecimiento del cultivo es uno de los factores que inciden directamente en la obtención de rendimientos elevados. Siguiendo este criterio, se

intentó alcanzar el mismo número de plantas establecidas en los dos sistemas. Sin embargo, resultó más difícil obtenerlo en siembra directa, donde la presencia de rastrojo y paja de cereal del cultivo antecesor (monocultivo de cebada), dificultaron el trabajo de los abresurcos de las máquinas de siembra directa. El cultivo de cebada de ciclo corto (cebada de primavera) tuvo más dificultades en siembra directa que en laboreo convencional. Esto se

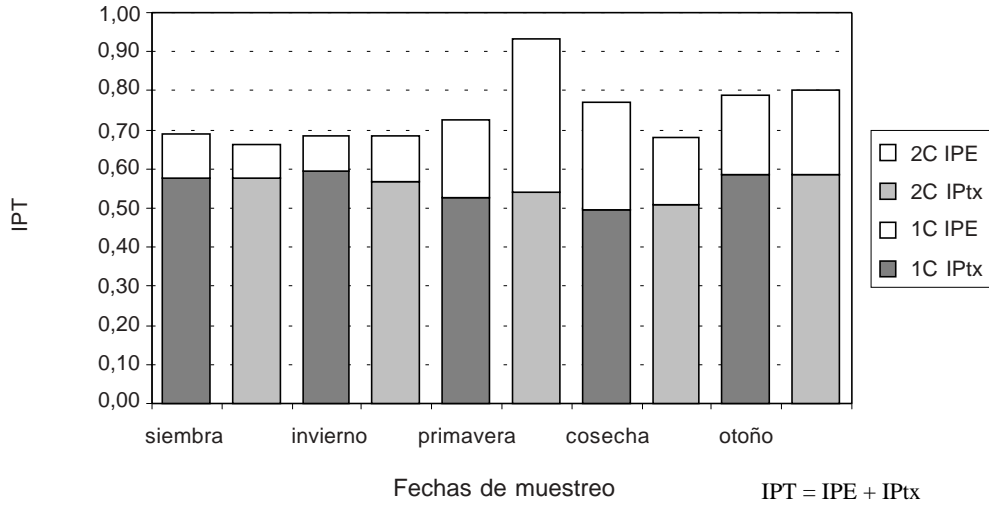


Figura 6. Evolución del Índice de poros totales (IPT) a lo largo del ciclo agrícola en la primera (1C) y segunda (2C) campaña.
Figure 6. Evolution of the total pore Index (IPT) throughout the agricultural cycle during the first (1C) and second (2C) growing seasons.

Tabla 4. Producciones obtenidas (kg/ha) y peso medio de cosecha (g) por planta establecida, en ambas campañas agrícolas, bajo siembra directa (SD) y con labranza convencional (LC) como referencia.

Table 4. Obtained productions (kg/ha) and average weight of harvest (g) by established plant, in both growing seasons, under direct drilling (SD) and with conventional tillage (LC) as a reference.

CAMPAÑA	CULTIVO	PRODUCCIONES (kg/ha)		GRAMOS DE COSECHA POR PLANTA ESTABLECIDA	
		SD	LC	SD	LC
PRIMERA	CEBADA DE PRIMAVERA	2.741	3.672	0,760	1,010
SEGUNDA	CEBADA DE INVIERNO	4.486	4.095	0,957	0,792

debió, principalmente, a un retraso fenológico con relación al sistema labrado. En la cebada de ciclo largo (cebada de invierno), para un mismo número de plantas establecidas por unidad de superficie, las producciones obtenidas pueden considerarse iguales.

CONCLUSIONES

Las técnicas de no laboreo o siembra directa, pueden ver compensados sus bajos porcentajes de porosidad

estructural con procesos de fisuración, debidos a la alternancia de ciclos de humectación-desección, que resultan suficientes para asegurar un buen balance aire-agua y facilitar el desarrollo de las plantas.

La porosidad encontrada en el suelo estudiado y no labrado fue predominantemente de origen textural. Este hecho no ha impedido una adecuada aireación del terreno y un buen desarrollo del cultivo, ya que los contenidos de humedad del suelo nunca alcanzaron valores tan elevados como para saturar a los poros texturales.

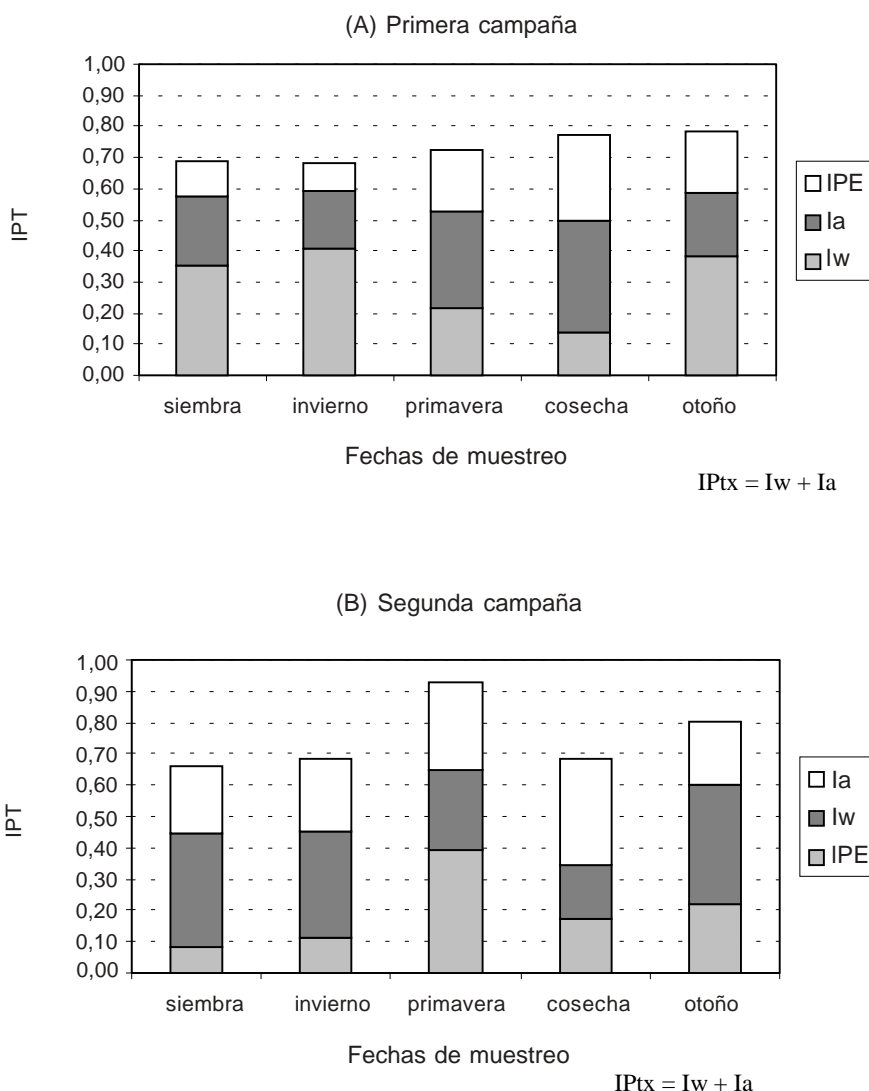


Figura 7. Representación de los volúmenes ocupados por el agua (Iw), el aire (Ia), y los poros estructurales (IPE), cuya suma representa el Índice de poros totales (IPT) del suelo, en la primera (A) y segunda (B) campaña.

Figure 7. Representation of the volumes occupied by the water (Iw), air (Ia) and structural pores (IPE); their sum represents the total pore Index (IPT) of soil during the first (A) and (B) second growing season.

BIBLIOGRAFÍA

- Barbosa, OA; MA Taboada & DJ Cosentino. 1999. Contracción al secado de agregados en diferentes fases de degradación de un suelo franco limoso de La Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo* 17 (1):1-7
- Barnes, BT & Ellis FB. 1979. The effects of different methods of cultivation and direct drilling and disposal of straw residues on populations of earthworms. *J. Soil Sci.* 30: 669-679.
- Bonne FR, Slager S, Miedma R, Eleveld R. 1976. Some influences of zero tillage on the structure and stability of a fine textured levee soil. *Neth. J. Agric. Sci.* 24: 105-119.
- Cerisola C. 1993. Estudio evolutivo de aspectos físicos y estructurales del suelo bajo diferentes técnicas de laboreo en la implantación de cultivos extensivos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 352 páginas.
- Cosentino, DJ & C Pecorari. 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la Región Pampeana. *Ciencia del suelo* 20 (1): 9-16.
- De Battista, JJ; C Pecorari & R Albrecht. 1997. Evaluación del estado estructural en suelos con agricultura continua en siembra directa. INTA, EEA Rafaela. Información Técnica N° 205. 12 páginas.

- Dexter, AR. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Research* 11: 199-238
- Dowdell, RJ; R Crees; JR Burford & RQ Cannell. 1979. Oxygen concentrations in a clay soils after ploughing or direct drilling. *J. Soil Sci.* 30: 239-245.
- Ehlers, W. 1976. Water infiltration and redistribution in tilled and untilled loess soil. *Göttingen Bodenkd. Ver.* 44: 137-156.
- Ellis, FB; JG Elliot; F Pollard; RQ Cannell & BT Barnes. 1979. Comparison of direct drilling, reduced cultivation and ploughing on the growth of cereal. *J. Agric. Sci.* 93: 391-401.
- Ellis, FB & BT Barnes. 1980. Growth and development of root systems of winter cereals growth after different tillage methods including direct drilling. *Plant and Soil* 55: 283-295.
- Gantzer, CJ & GR Blake. 1978. Physical characteristics of Le Sueurs clay loam soil following no till and conventional tillage. *Agron. J.* 70: 853-857.
- Goss, MJ; KR Howse & W Harris. 1978. Effects of cultivation on soil water retention and water use by cereals in clay soils. *J. Soil Sci.* 29: 475-488.
- Guerif, J. 1987. L'analyse de la porosité: Application à l'étude du compactage des sols. Soil Compaction and Regeneration. Monnier and Goss editors. CEE pbl. 165 pp: 1-13
- Henderson, DW. 1979. Soil management in semiarid environments. *In: Crop productivity in arid and semiarid environments.* Hall A.E. (ed). Ecol. Studies N° 35. Springer Verlong: 224-237.
- Lindstrom, MJ; WB Voorhees & CA Onstad. 1984. Tillage system and residue cover effects on infiltration in northwestern corn belt soil. *I. Soil Water Conservation* 39: 64-69.
- Monnier, G; P Stengel & JC Fies. 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. Agron.* 24(5): 533-545.
- Pagliai, M. 1987. Micromorphometric and micromorphological investigations on the effect of compaction by pressures and deformations resulting from tillage and wheel traffic. Soil Compaction and Regeneration. Monnier and Goss editors. CEE pbl. 165 pp.
- Pecorari, C. 1998. Guía conceptual para elaborar metodologías de evaluaciones físicas de suelos. Siembra Directa. Editorial Hemisferio Sur S.A. pp: 35-55.
- Pidgeon, JD & BD Soane. 1977. Effects of tillage and direct drilling on soil properties during the growing season in a long-term barley monoculture system. *J. Agric. Sci. Camb.* 88: 431-442.
- Richards, LA. 1928. The usefulness of capillary potential to soil moisture and plant investigators. *Journal Agric. Research* 37: 719-742
- Sánchez Girón Renedo, V. 1996. Dinámica y Mecánica de suelos. Ediciones Agrotécnicas, S.L. Madrid
- 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): 74-78.
- Stengel, P. 1979. Utilization de l'analyse des systèmes de porosité pour la caracterization de l'état physique du sol *in situ.* *Ann. Agron.* 30 (1): 27-51.
- Stengel, P. 1986. Simplification du travail du sol en rotation céréalières: conséquences physiques. Les rotations céréalières intensives. Dixannées d'études concertées INRA-ONIC-ITCF, 1973-1983. INRA, Paris.
- Thomasson, HM. 1978. Towards on objective classification of soil structure. *J. Soil Sci.* 29 (1): 38-46.
- Towner, GD. 1988. The influence of sand and silt-size particles on the cracking during drying of small clay dominated aggregates. *J. Soil Science* 39: 347-356.
- Unger, PW. 2002. Conservation tillage for improving dryland crop yields. *Ciencia del Suelo* 20 (1): 1-8.