

## RELACIONES MATEMÁTICAS ENTRE LA RESISTENCIA MECÁNICA A LA PENETRACIÓN Y EL CONTENIDO HÍDRICO EN UN VERTISOL

J. Cerana<sup>1</sup>, M. Wilson<sup>1y2</sup>, O. Pozzolo<sup>1y3</sup>, J.J. De Battista<sup>3</sup>, S. Rivarola<sup>1</sup> y E. Díaz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Agropecuarias UNER, Ruta 11 km 10.5 (3100) Paraná, Entre Ríos, República Argentina; jcerana@fca.uner.edu.ar

<sup>2</sup> Estación Experimental Agropecuaria, INTA Paraná, Ruta 11 km 12.5 (3100). Paraná, Entre Ríos, República Argentina; mwilson@parana.inta.gov.ar

<sup>3</sup> Estación Experimental Agropecuaria, INTA Uruguay. Concepción del Uruguay, Entre Ríos, República Argentina.

**RESUMEN.** La resistencia mecánica a la penetración (RMP), ha sido ampliamente utilizada para la identificación y caracterización de capas densificadas por efectos del laboreo. Sus resultados han sido correlacionados con el crecimiento de las raíces y la productividad de los cultivos. La medición de la RMP de un suelo a través del penetrómetro de cono (ASAE, 1988), tiene la ventaja de ser fácil, rápida y económica, al tiempo que provee datos que pueden ser sencillamente analizados. Por otra parte, el avance tecnológico operado en los últimos años, con la aparición de microprocesadores, permitió desarrollar equipos de campaña, de gran precisión y versatilidad, que hacen posible obtener un número elevado de repeticiones a campo con poco esfuerzo, en la profundidad de enraizamiento de la mayoría de los cultivos. En los Vertisoles, a la variabilidad espacial se le debe sumar la variabilidad temporal relacionada a las propiedades físicas impuestas por el tipo de arcillas dominantes (esmeclitas) y el régimen hídrico, que provocan ciclos de contracción – dilatación. El objetivo del presente trabajo fue obtener relaciones matemáticas entre la RMP y el contenido hídrico del suelo ( $\theta$ ) por horizontes, en un Vertisol de Entre Ríos, Argentina, para ser utilizadas en la corrección de datos de campo. Durante el ciclo de un cultivo de soja se obtuvieron registros de RMP con penetrómetro digital, por cada cm de suelo hasta la profundidad de 80 cm, totalizando 1600 registros por fecha. A su vez, hasta la misma profundidad y cada 10 cm, se midió el  $\theta$  utilizando una sonda de neutrones. Se observó mayor amplitud de los registros de RMP en condiciones de suelo seco, que disminuyó conforme aumentó el  $\theta$ . En los registros con alto  $\theta$ , no se manifestaron sectores de altas RMP, resultando perfiles muy poco diferenciados en profundidad. El grado de saturación del suelo ( $\theta/\theta_s$ ) y la RMP respondió en general a una ecuación potencial para las diferentes profundidades en el perfil. Sólo en la capa de 00-05 cm, presentó un mejor ajuste la ecuación exponencial, aunque con los datos más dispersos a causa de la metodología empleada para la determinación del contenido hídrico.

**ABSTRACT.** The penetration resistance (RP) has been broadly used for the identification and characterization of

layers soil strength by effects of the traffic and tillage. Their results have been correlated with the growth of the roots and the crop productivity. The measures of RP with cone penetrometer (ASAE, 1988), have the advantage of being easy, quick and economic, at the time that provide data that can be easily analyzed. On the other hand, the technological advance operated in the last years, with the appearance of microprocessors, allowed to develop equipment of great precision and versatility that allow to obtain a high number of measurements, to field with little effort. In Vertisols, to the spatial variability the temporary variability should be added, related to the physical properties imposed by the dominant clay minerals (smectites) and the hydric regime that cause shrinking and swelling of the soil mass. The objective of the present work was to obtain mathematical relationships between the RP and the water content ( $\theta$ ) for layers, in a Vertisol of Entre Ríos, Argentina, to be used in the correction of field data. During the soybean crop cycle registrations of RP were obtained with electronic penetrometer, for each soil cm until the depth of 80 cm, accounting for 1600 registrations each date. In turn, until the same depth and each 10 cm, the  $\theta$  was measured using a neutrons probe. The widest range or amplitude of RP values was observed under dry soil conditions, and decreased as  $\theta$  increased. When  $\theta$  was high, low RP values were found, and the profiles showed small differences with depth. The degree of soil saturation ( $\theta/\theta_s$ ) and the RP, respond in general to a potential equation for the most part. Only in the layer of 00-05 cm, the exponential equation provided a the best fit.

---

### 1. Introducción

Las restricciones físicas de los Vertisoles están relacionadas al tipo de arcillas dominantes (esmeclitas) y al régimen hídrico, acompañado de ciclos de expansión – contracción. Es decir que en los Vertisoles, a la variabilidad espacial se le debe sumar la variabilidad temporal

relacionada a sus propiedades físicas, que dificultan la aplicación de métodos y estimaciones para su evaluación.

Si bien pueden almacenar cantidades importantes de agua, el rango aprovechable es muy corto, debido a los problemas de aeración, resistencia a la penetración y la escasa profundidad efectiva de enraizamiento que pueden alcanzar los cultivos. Son susceptibles además a la compactación, en particular cuando las operaciones de campo son realizadas con altos contenidos hídricos.

Las modificaciones que pueden alterar la condición del suelo superficial, o del perfil completo, deben ser expresadas en términos cuantitativos y numéricos, comparables con otras regiones o con las situaciones pre-existentes a la introducción de los usos y manejos actuales. Asimismo, las propiedades físicas y mecánicas como la consistencia, la densidad aparente del suelo ( $D_{ap}$ ), la capacidad soporte para sostener el peso de máquinas y herramientas agrícolas, están relacionadas con la aparición de procesos indeseables, como la compactación inducida o el encostramiento, que se acentúan en la medida en que los requerimientos de producción sean más intensivos, y que resultan muchas veces irreversibles.

### 1.1. Características estructurales de los Vertisoles

Los Vertisoles entre sus características particulares muestran la alternancia de sus estados estructurales modificando la relación de poros debido a razones naturales o climáticas, como las precipitaciones, o antrópicas como es el riego. Gobernado por el estado de humedad se encuentra una  $D_{ap}$  que reconoce valores extremos en función del contenido hídrico del suelo ( $\theta$ ), comparados con otros suelos (Greacen y Gardner, 1982; Wilson y Cerana, 2004). Los valores de  $D_{ap}$  determinados en estado saturado, son bajos y en general menores de  $1 \text{ Mg m}^{-3}$ , pero en la condición de suelo seco llegan a  $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$  si se considera el volumen de las grietas o densidades de campo y mayores a  $1,7 \text{ Mg m}^{-3}$  si sólo está siendo considerado el volumen del terrón o ped. En esta condición, el volumen de poros se considera mínimo, igual a la porosidad textural. Cuando la humedad tiende a su máximo valor  $H$  (max), la  $D_{ap}$  se aproxima a su valor mínimo ( $D_{ap \text{ min}}$ ), (Yule y Ritchie, 1980). Esto supone un gran cambio de las propiedades físicas e hidrológicas durante los ciclos de secado-contracción y mojado-expansión.

La determinación que resulta apropiada para caracterizar la naturaleza expansiva de los Vertisoles ha sido el COLE Coeficiente de Extensibilidad Lineal (Brasher et al. 1966). Ensayos efectuados en Vertisoles de Entre Ríos, mostraron valores superiores a 0,16 para el horizonte subsuperficial (Cerana et al. 1983). Las características físicas de estos suelos están dominadas por amplios procesos de hinchamiento y contracción, reflejados por su COLE. Wilson y Cerana (2004), indican la importancia que toma este coeficiente en un Argiudol vértico a una profundidad de 65 cm (horizonte B), alcanzando valores similares a un Peluderte argiacuólico, mientras que en este último se supera el valor de 0,10 desde la superficie.

Estos cambios volumétricos provocan problemas en la estimación del contenido hídrico en el suelo cuando

comienzan a secarse por contracción y agrietamiento (Greacen y Gardner, 1982), no respondiendo adecuadamente a los modelos de balance hídrico comúnmente conocidos (Heredia, 2000) y son responsables de los cambios abruptos en la Resistencia mecánica a la penetración (RMP).

Durante el secado del suelo se pueden distinguir dos momentos, el primero donde la pérdida de un volumen de agua esta acompañada de una reducción equivalente del volumen aparente de suelo y el segundo donde no habría modificación del volumen total pero donde los pedos reducen la porosidad interna, aumentando la densidad de agregados, apareciendo grietas que se van haciendo más amplias y profundas a medida que se reduce el contenido hídrico (Ritchie et al. 1972; Favre et al. 1997; Castiglione et al. 2004).

El sistema estructural de grietas crea patrones espaciales de mayor heterogeneidad que los encontrados habitualmente en otros suelos, aumentando los rangos de variación de las medidas de humedad y otras propiedades relacionadas. Este particular comportamiento debe ser tenido en cuenta para la realización de las determinaciones de RMP e interpretación de sus resultados. Una, en el conocimiento del comportamiento a una escala macro del orden del metro y otra a escala del milímetro. Las determinaciones expresadas en forma gravimétrica o volumétrica tienen una significación distinta para estos suelos, y no presentan una relación lineal.

La RMP ha sido ampliamente utilizada para la identificación y caracterización de capas densificadas por efectos del laboreo. Sus resultados han sido correlacionados con el crecimiento de las raíces y la productividad de los cultivos. La medición de la RMP de un suelo a través del penetrómetro de cono (ASAE, 1988), tiene la ventaja de ser fácil, rápida y económica, al tiempo que provee datos que pueden ser sencillamente analizados, que hacen posible obtener un número elevado de repeticiones a campo con poco esfuerzo, en la profundidad de enraizamiento de la mayoría de los cultivos. Particularmente en Vertisoles cobra mayor significación, ya que las mediciones deben reflejar las condiciones cambiantes de  $\theta$  en el entorno donde se desarrollan los cultivos (Wilson et al. 2000). Las determinaciones obtenidas con el penetrómetro, han reflejado el estado de compactación y resultan de utilidad cuando se trata de inferirlos (Ayers y Bowen, 1987; Cass et al. 1994).

El objetivo del presente trabajo fue obtener relaciones matemáticas entre la resistencia mecánica a la penetración y el contenido hídrico del suelo por horizontes, en un Vertisol de Entre Ríos, Argentina, para ser utilizadas en la corrección de datos de RMP obtenidos a campo.

## 2. Materiales y métodos

Los suelos ubicados en el área arroceras de la provincia de Entre Ríos corresponden al Orden de los Vertisoles, que presentan textura fina con un contenido entre el 40-50% de arcilla, con predominio de las esmectitas (más del 50% sobre el total de arcillas). El material es muy expansible, se

contrae cuando está seco, formando grandes grietas que se cierran en húmedo (De Petre y Stephan, 1998). Son suelos muy plásticos y adhesivos en condiciones de humedad elevada, presentando alta adhesividad suelo-metal, siendo en seco muy duros lo que explica las limitaciones de estos suelos para las tareas agropecuarias.

Se instaló un ensayo en el Campo Experimental de la Fundación ProArroz, situado en la localidad de San Salvador, que presentó como cultivo antecedente el arroz. Durante el ciclo de un cultivo de soja se obtuvieron registros de RMP con penetrómetro digital, por cada cm de suelo hasta la profundidad de 80 cm, con un número de 5 repeticiones por parcelas, por lo que en cada fecha de muestreo se totalizaron 1600 registros. El ensayo consistió de cuatro (4) parcelas donde se instalaron tubos de PVC y en los cuales se realizaron determinaciones de  $\theta$  utilizando una sonda de neutrones, hasta los 80 cm de profundidad, cada 10 cm. Cada perfil de RMP fue compuesto por el promedio de las 5 penetraciones; para cada cm de profundidad se apareó el valor de  $\theta$  obtenido cada 10 cm. Las capas de suelo se analizaron cada 10 cm y hasta los 80 cm, tomando los primeros 5 cm superficiales por separado. Se realizó la relación entre el grado de saturación del suelo ( $\theta/\theta_s$ ) y la RMP para diferentes profundidades, evaluándose diferentes ecuaciones de ajuste (Ehlers et al. 1983; Orellana, 1989; Cass et al. 1994), con un programa matemático analizador de curvas.

Las muestras de Dap (Forsythe, 1975), se obtuvieron a razón de cuatro repeticiones por profundidad, en condiciones de campo con contenidos hídricos cercanos a capacidad de campo ( $\theta_{cc}$ ). Los contenidos hídricos a saturación (-0 kPa), a capacidad de campo (-33 kPa) y a punto de marchitez permanente (-1500 kPa) se obtuvieron con equipo de olla y plato de presión de Richards (1941).

Para la determinación de la RMP se utilizó un penetrómetro *Eijkelkamp penetrolgger 2000*, que permite efectuar mediciones del perfil de RMP, hasta una profundidad de 80 cm con resolución de 1 cm. Posee una celda de carga que registra fuerzas de hasta 200 kg, con transductor, decodificador, datalogger y software para el registro y procesamiento de datos. El software permite programar los ensayos, número de parcelas y número de penetraciones por parcela, ángulo y sección del cono, entregando información numérica en archivos compatibles y gráficas de penetración individuales, promedios de cada parcela y desvíos. Los conos utilizados son de 30° con una superficie de 1 pulgada cuadrada (6,45 cm<sup>2</sup>) para suelos húmedos (diámetro = 3cm) y de ½ pulgada cuadrada (3,30 cm<sup>2</sup>) en suelos más secos (diámetro = 2 cm)

Para los ensayos de evolución a campo del perfil de RMP se realizaron las determinaciones de humedad volumétrica, utilizando una sonda de neutrones CPN 501 DR Depthprobe, con fuente de neutrones 50 mCi de Americio 241/Be, con la instalación de pares de tubos de acceso. Los mismos fueron instalados de acuerdo con las recomendaciones de Greacen (1981).

### 3. Resultados y discusión

En la Tabla 1 se presentan los contenidos hídricos relevantes correspondientes al perfil de suelo estudiado. La Dap fue de 1,103 Mg m<sup>-3</sup> para la profundidad de 05-10 cm, mientras que para la capa de 10 a 30 cm y 30 a 50 cm fue de 1,292 Mg m<sup>-3</sup> y 1,310 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente. El resto del perfil presentó valores similares a estos últimos.

**Tabla 1.** Contenidos hídricos relevantes para diferentes profundidades en un Peluderte árgico de la Serie Don Guillermo, Entre Ríos – Argentina.

Profundidad (cm)	$\theta_s$ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	$\theta_{cc}$ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	$\theta_{RMP}$ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
05-10	0,513	0,417	0,281
10-20	0,511	0,410	0,280
20-30	0,509	0,398	0,276
30-40	0,513	0,420	0,303

Respecto a los registros de RMP, se observó mayor amplitud de los valores en condiciones de suelo seco, los que disminuyeron conforme aumentó el  $\theta$ . En los registros con alto  $\theta$ , no se manifestaron sectores de altas RMP, resultando perfiles muy poco diferenciados en profundidad. En la Fig. 1 se presentan los perfiles de RMP, para las condiciones de  $\theta$  de mayor contraste durante el ensayo. La evolución de los perfiles de RMP mostró que durante las condiciones hídricas óptimas, cercanas a  $\theta_{cc}$ , los valores de RMP obtenidos se ubicaron por debajo del valor crítico de 2 MPa, sugerido por Letey (1985), como valor límite para el crecimiento de las raíces (Fig. 1a). Sin embargo, en cuanto el suelo comenzó a desecarse, los valores de RMP rápidamente se acercaron y superaron dicho valor crítico, ocupando un espesor considerable del perfil del suelo (Fig. 1b).

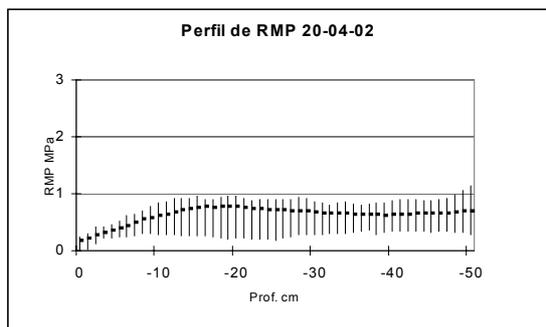
El  $\theta$  en los primeros 5 cm de suelo presentó gran variabilidad entre fechas de muestreo y entre repeticiones, desde 0,65 a 0,25 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Ello, a su vez, provocó una fuerte dispersión de los datos de RMP. Es de destacar que las mediciones de  $\theta$  se realizaron con la sonda de neutrones y lo aconsejado por la abundante bibliografía es utilizar un método gravimétrico a nivel superficial.

Por otra parte, se observó que debajo de los 50 cm el  $\theta$  no mostró gran variación durante el ciclo del cultivo, oscilando entre 0,3 y 0,4 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Sin embargo los valores de RMP indicaron valores extremos de 0,7 y 2,5 MPa. Asimismo, los datos de RMP no mostraron una tendencia firme en función del cambio en  $\theta$ , y ello puede deberse al escaso rango de  $\theta$  analizado en condiciones de campo y el intervalo de profundidad utilizado (10 cm), ya que la esfera de medida de la sonda de neutrones es de 20 cm.

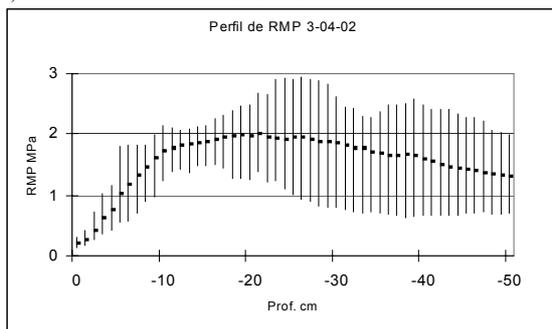
En la Tabla 2 se presentan las ecuaciones de la relación RMP y  $\theta/\theta_s$ , destacando que la función potencial negativa fue la que presentó mayor ajuste para las profundidades analizadas, seguida de la función exponencial y luego la logarítmica.

Ehlers et al. (1983) establecieron un sistema de ecuaciones que relacionaron la RMP con el contenido hídrico del suelo en forma lineal negativa, mientras que Orellana (1989) y Wilson et al. (2000) obtuvieron experimentalmente ecuaciones exponencial negativa entre

dichas variables y para diferentes capas de suelo. Por otro lado, Cass et al. (1994) proponen para evaluar efectos de diferentes manejos en suelos bajo producción del cultivo de arroz, una ecuación potencial negativa.



a) Perfil de RMP con alto contenido hídrico.



b) Perfil de RMP con bajo contenido hídrico.

**Fig. 1.** Perfil de RMP en dos condiciones hídricas de suelo diferente. Se presentan valores promedios y su desviación standard, en profundidad.

**Tabla 2.** Relación entre el grado de saturación del suelo ( $\theta/\theta_s$ ) y la resistencia a la penetración, usando una ecuación potencial  $P = P_o (\theta/\theta_s)^b$ , para diferentes profundidades en un Peluderte árgico. n = 150 para 00-04 y n = 300 para el resto de las profundidades.

Prof. (cm)	Coeficientes de la función potencial		R <sup>2</sup>	
	P <sub>o</sub> (Mpa)	b	Ec. Potencial	Ec. Exponencial
00-04	0,1243	-1,63	0,38	0,39
05-14	0,2897	-2,29	0,61	0,61
15-24	0,2952	-2,85	0,63	0,61
25-34	0,2818	-2,89	0,63	0,60
35-44	0,2587	-2,88	0,45	0,41

Como se observa en la Tabla 2, la pendiente de las ecuaciones de ajuste aumenta notoriamente desde los 15 cm de profundidad. Ello se debe a la presencia del horizonte B desde los 18 cm, arcillo limoso, con más de 37% de arcilla.

A partir de la obtención de ecuaciones de este tipo, es posible corregir los valores de RMP en función del contenido hídrico del suelo. De este modo, se logra evaluar la dinámica de la RMP a partir del valor de  $\theta$  durante el ciclo de un cultivo, distinguiendo el momento a partir del cual existen restricciones para el crecimiento del sistema radical (Wilson et al. 2000). Asimismo, el concepto de rango de agua no limitante o “non limiting water range (NLWR)” (Letey, 1985) y discutido luego por Silva et al. (1994), describe la influencia del agua del suelo sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos, referido a la RMP

y a los problemas de aeración. Orellana et al. (1997) amplian la potencialidad de dicho parámetro integrador, incorporando aspectos de disponibilidad hídrica para los cultivos.

La utilización de variables que integren varios aspectos referidos a la condición física del suelo, resulta adecuado para describir el estado y la tendencia del recurso y por otra parte, pueden ser relacionados con el comportamiento de los cultivos.

#### 4. Conclusiones

En la determinación de las condiciones limitantes del suelo para el crecimiento de las plantas, dentro del entorno de agua útil de los Vertisoles, el penetrómetro de campo permite realizar perfiles seriados para determinar los momentos de humedad donde aparecen restricciones.

El grado de saturación del suelo ( $\theta/\theta_s$ ) y la RMP respondieron en general a una ecuación potencial negativa para las diferentes profundidades en el perfil. Sólo en la capa de 00-05 cm, presentó un mejor ajuste la ecuación exponencial, aunque con los datos más dispersos a causa de la metodología empleada para la determinación del contenido hídrico. Las pendientes de las curvas reflejaron además las condiciones físicas impuestas por el contenido de arcillas en las diferentes capas del suelo.

*Agradecimientos.* Trabajo Financiado por la Agencia de Promoción Científica y Tecnológica de la Nación Argentina, a través del Proyecto FONCYT “Sustentabilidad del cultivo de arroz en la provincia de Entre Ríos”. Este trabajo en parte contó con el financiamiento de la Consellería de la Presidencia de la Xunta de Galicia (España), a través del Proyecto “Conservación de suelos y aguas en la cuenca del Río Paraná” referencia PR803C2005/160.

#### Referencias

ASAE Standars. 1988. S313.2 Soil cone penetrometer. 35th Ed St Joseph MI: ASAE.

Ayers, P.D. y Bowen, H.D. 1987. Predicting soil density using cone penetration resistance and moisture profile. ASAE Trans. 30: 1331-1336 pp.

Brasher, B. R., D. P. Franzmeier, Valassis, V. y Davidson, S.E. 1966. Use of Saran Resin to Coat Natural Soil Clods for Bulk-Density and Water-Retention Measurements. *Soil Science*, 101. 108 pp.

Cass, A., Gusli, S. y Mac Leod, D.A. 1994. Sustainability of soil structure quality in rice paddy – soya-bean cropping system in South Sulawesi, Indonesia. *Soil and Tillage Research* 31: 339-352 pp.

Castiglioni, M.G.; Morrás, H., Santanatoglia, O.J. y Altinier, M.V. 2004. Análisis de la contracción de agregados de distintos horizontes de Argiudoles de la Pampa ondulada. XIX Congreso Argentino Ciencias del Suelo. Paraná, Entre Ríos (Trabajo en CD 10 pp).

Cerana, J.A., Rivarola, S.E. y De Petre, A. 1983 Evaluación de la extensibilidad en suelos de destacada actividad físico química. Actas X Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Mar del Plata Octubre 1983. 129 pp.

De Petre, A. y Stephan, S. 1998. Características pedológicas y agronómicas de los Vertisoles de Entre Ríos, Argentina. Ed. UNER. 65 pp.

Ehlers, W., Köpke, U., Hesse, F. y Bohm, W. 1983. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil & Tillage Research*, 3: 261-275 pp.

Favre, F., Boivin, P. y Wopereis, M.C.S. 1997. Water movement and soil swelling in a dry, cracked Vertisol. *Geoderma* 78: 113-123 pp.

- Forsythe, W. 1975. Física de suelos. IICA, San José, Costa Rica. 212 pp.
- Greacen, E. L. 1981. Soil Water assessment by the neutron method. CSIRO ISBN 0 643 00414 9 138 pp.
- Greacen, E.L. y Gardner, E.A. 1982. Crop behaviour on clay soils. *Trop. Agric. (Trinidad)*. 59 (2): 123-132 pp.
- Heredia, O.S. 2000. Aptitud de algunos suelos vérticos para uso bajo riego complementario. *Rev. Facultad de Agronomía*. 20 (1): 91-97 pp.
- Letey, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. In: *Advances in Soil science. Volume I*. Edited by B.A. Stewart. Springer-Verlag New York, Inc. 277-294 pp.
- Orellana, J. A. de. 1989. Expansibilidad y penetrabilidad de un horizonte B2t con enmiendas cálcicas. *Ciencia del suelo* 7(12): 107-111 pp.
- Orellana, de J.A., Pilatti, M.A. y Grenón, D. 1997. Soil quality: An approach to physical state assessment. *Journal of sustainable agriculture*. 9: 91-108 pp.
- Richards, L.A. 1941. A pressure-membrana extraction apparatus for soil solution. *Soil Sci.* 51: 377-386 pp.
- Ritchie, J.T., Kissel, D.E. y Burnett, E. 1972. Water movement in undisturbed swelling clay soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36:874-879 pp.
- Silva da, A.P., Kay, B.D. y Perfect, E. 1994. Characterization of the Least Limiting Water Range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1775-1781 pp.
- Wilson, M., Valenzuela, O., Pilatti, M.A. y Felli, O. 2000. Relación entre el contenido hídrico y la resistencia a la penetración en un suelo con características vérticas. *Rev. Facultad de Agronomía UBA*. 20 (1): 69-73 pp.
- Wilson, M. y Cerana, J. 2004. Mediciones físicas en suelos con características vérticas. *Rev. Científica Agropecuaria* 8(1): 11-22 pp.
- Yule, D.F. y Ritchie, J.T. 1980. Soil shrinkage relationships of Texas Vertisols. I. Small cores. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 44(6):1285-1291 pp.