



Semiárido: un desafío para la Ciencia del Suelo

13 al 16 de mayo de 2008

Potrero de los Funes (SL), Argentina



AACS
ASOCIACION ARGENTINA
CIENCIA DEL SUELO

DENSIDAD DE SUELO CRÍTICA PARA LA PRODUCTIVIDAD DE UN MOLISOL Y UN VERTISOL

Wilson M. G.^{1y2}, M. C. Sasal¹ y O. Caviglia^{1y 2}

(1) INTA EEA Paraná. Ruta 11, Km. 12.5 (3100), Paraná, Entre Ríos, Argentina

E-mail: mwilson@parana.inta.gov.ar

(2) Facultad de Ciencias Agropecuarias UNER, Paraná, Entre Ríos, Argentina

RESUMEN: La obtención de niveles críticos de densidad de suelo (δ_{sc}) se considera de gran utilidad para el monitoreo de la condición estructural del suelo y de su capacidad productiva. Se tomó al intervalo hídrico óptimo (IHO) para definir niveles críticos de densidad de suelo. El objetivo fue determinar la variación del IHO de un Molisol y un Vertisol en función del aumento de la densidad del suelo, establecer la δ_{sc} y conocer el efecto sobre las raíces de trigo. Se prepararon 60 cilindros con un Argiudol ácuico y un Cromuderte árgico, ambos con una historia de 10 años en SD, con 5 grados de compactación: 1,1, 1,2, 1,3, 1,4 y 1,5 g cm⁻³. La mitad de las muestras se sembraron con trigo, se mantuvieron a capacidad de campo durante todo el ciclo y a los dos meses se midió la materia seca aérea y radical, obteniéndose la relación raíz/ canopia del cultivo. El IHO se determinó en el otro grupo de cilindros, donde se midió la variación de la resistencia mecánica a la penetración en función del contenido hídrico (θ_{rmp}). El IHO fue mayor en el Molisol respecto al Vertisol en todas las δ_s evaluadas, siendo IHO = 0 para δ_s 1,5 g cm⁻³. El límite superior del intervalo estuvo constituido por θ_a (límite de aeración) a densidades de suelo altas y θ_{cc} (capacidad de campo) a bajas densidades. El límite inferior siempre fue θ_{rmp} en ambos suelos. Para el Molisol la δ_{sc} fue de 1,44 g cm⁻³, mientras que para el Vertisol fue sensiblemente menor, $\delta_{sc} = 1,37$ g cm⁻³. La relación raíz/ canopia de trigo en el Molisol disminuyó en función de la disminución del IHO, afectada por la pérdida de aeración a las δ_s superiores. En el Vertisol no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos. A δ_s altas se registraron nacimientos de plántulas y el cultivo prosperó hasta el final del ensayo. El cambio volumétrico experimentado en el Vertisol provocó disminuciones significativas en la δ_s final que podría explicar el crecimiento de plantas de trigo, aún a densidades de suelo altas.

Palabras clave: densidad de suelo crítica – intervalo hídrico óptimo – Vertisol - raíces - trigo.

INTRODUCCIÓN

Una buena calidad física de suelo se refiere a la capacidad del suelo para proveer condiciones físicas adecuadas para el crecimiento y el desarrollo de las plantas (Tormena *et al.*, 1998). Dichas condiciones pueden afectar el crecimiento de la planta, desde la germinación hasta la madurez.

Letey (1985), Pilatti y Orellana (1993), da Silva *et al.* (1994) y otros autores han tratado de expresar el efecto de las condiciones físicas, a través de la influencia del agua del suelo, sobre el crecimiento y el desarrollo de los cultivos. Así, la disponibilidad de agua, la aeración, la temperatura y la resistencia mecánica que ofrece el suelo a la penetración de raíces (RMP) son las variables del suelo que cobran significancia. da Silva *et al.* (1994) y Orellana *et al.* (1997) propusieron el Intervalo Hídrico Óptimo (IHO), como un indicador compuesto que integra las variables mencionadas.

La compactación es causal del deterioro del suelo. Actúa provocando la pérdida de porosidad, especialmente por disminución en la cantidad de macroporos y por endurecimiento de las capas del suelo. Una porosidad de aeración mínima de 10% requerida para la difusión del oxígeno y valores de RMP menores a 2 MPa son límites aceptados para un óptimo crecimiento del sistema radical. El contenido hídrico del suelo (θ) a su vez le otorga dinámica a dichas variables, provocando inconvenientes cuando está en exceso (ocupa el espacio poroso), como así también cuando disminuyen sus niveles provocando el aumento de la RMP.

La obtención de niveles críticos de densidad de suelo (δ_s) se considera de gran utilidad para el monitoreo de la condición estructural del suelo y de su capacidad productiva. Existen diferentes metodologías de determinación de la densidad de suelo crítica (δ_{sc}). Venanzi *et al.* (2002),



Semiárido: un desafío para la Ciencia del Suelo

13 al 16 de mayo de 2008

Potrero de los Funes (SL), Argentina



AACS
ASOCIACION ARGENTINA
CIENCIA DEL SUELO

consideran que incrementos de δs por encima de $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ produjeron una reducción lineal en el crecimiento del cultivo de trigo y fijaron como δs_c a aquella que produce una reducción del 50% en la biomasa radical. Estos autores citan a Griffith *et al.* (1977), quienes determinaron valores críticos de $1,7 \text{ g cm}^{-3}$ para suelos arenosos, y de $1,4$ a $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ para suelos franco-arcillo-limosos. Por otra parte, Imhoff *et al.* (2001), definieron a la δs_c como aquella δs en que IHO = 0. Esta propuesta resulta interesante ya que el IHO resume diferentes aspectos del suelo involucrados en la productividad.

El objetivo del presente trabajo fue determinar la variación del intervalo hídrico óptimo de un Molisol y un Vertisol (según lo propuesto por da Silva *et al.*, 1994) en función del aumento de la densidad del suelo, establecer la densidad de suelo crítica y conocer el efecto sobre las raíces de plantas de trigo.

MATERIALES Y MÉTODOS

En noviembre de 2007 se inició un ensayo con cilindros de suelo en laboratorio con diseño completamente aleatorizado y 3 repeticiones. Se prepararon 60 cilindros de pvc de 8,5 cm de alto y 15 cm de diámetro con la base inferior cerrada y perforada. En dichos cilindros se colocaron muestras del espesor 0-15 cm de dos suelos: un Molisol (Argiudol ácuico) y un Vertisol (Cromuderte árgico), ambos con una historia de 10 años bajo agricultura en SD, formando una columna de 7 cm (Tabla 1).

Tabla1: Propiedades físicas y químicas de los suelos estudiados.

Suelo	pH (1:2.5)	CO	Arcilla	Arena	Limo %	Is	CC	PMP
Molisol	6.3	2.65	27.4	6.3	66.3	0.83	31.5	16.5
Vertisol	7.6	2.74	31.7	8.2	60.1	0.37	36.0	23.0

donde: CO es carbono orgánico; Is es índice de inestabilidad estructural por Hénin (adimensional); CC es capacidad de campo; PMP es punto de marchitez permanente.

En cada cilindro se realizó la compresión de las muestras (secas y tamizadas a 2 mm) con una prensa, por capas, para asegurar la homogeneidad de la densidad de suelo (δs) lograda. Se obtuvieron 5 grados de compactación: 1,1, 1,2, 1,3, 1,4 y $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ variando el peso seco de suelo por unidad de volumen. Luego se secaron las muestras durante 3 días a 60° C . Posteriormente se realizó el humedecimiento de las muestras con un aspersor a una velocidad muy lenta hasta lograr el contenido hídrico correspondiente a θ_{cc} (capacidad de campo), manteniéndolo por pesada hasta el final del ensayo.

La mitad de las muestras se sembraron con 4 semillas de trigo por cilindro a 1 cm de profundidad. Los riegos se realizaron con solución Hoagland para asegurar la nutrición mineral. Después de la emergencia se equipararon las plantas de todos los cilindros a un número de 2 plantas de trigo/cilindro. Luego de dos meses se interrumpió el ciclo del cultivo cortando las plantas desde la base. La parte aérea se secó en estufa a 60° hasta peso seco constante. Las raíces fueron lavadas con agua destilada y hexametáfosfato de sodio (100 g l^{-1}), luego se secaron en estufa a 60° hasta peso seco constante y se determinó la relación raíz/ canopia del cultivo.

Mediciones:

Al inicio, luego del primer humedecimiento y finalizado el ensayo, se midió la altura de las columnas de suelo para estimar el cambio volumétrico y en consecuencia cambios en la δs , tomando la densidad de suelo final (δs_f). Con equipo de Richards se determinaron las constantes hídricas CC y PMP, a -33 kPa y -1500 kPa . Se tomó δs_f para expresar los datos volumétricamente (θ_{cc} y θ_{pmp}).

En los cilindros sin cultivo (se mantuvieron a temperatura ambiente dentro del laboratorio) desde θ_{cc} y en siete diferentes contenidos hídricos (θ) y hasta aproximadamente $\theta = 15\%$, se midió la RMP (3 repeticiones por fecha de medición por maceta) con un penetrómetro de laboratorio marca Marconi. La aguja de penetración fue de 8 cm de altura, 3 mm de diámetro, punta cónica con ángulo de 30° y un área de cono de $0,1256 \text{ cm}^2$.



Semiárido: un desafío para la Ciencia del Suelo

13 al 16 de mayo de 2008

Potrero de los Funes (SL), Argentina



AACCS
ASOCIACION ARGENTINA
CIENCIA DEL SUELO

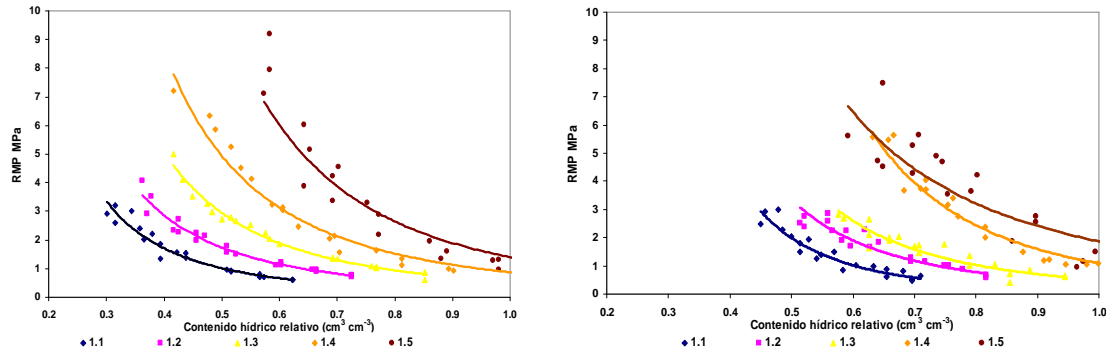
Con el dato de δ_{real} de cada suelo y la δ_s de cada tratamiento, se calculó la porosidad total, considerada igual al contenido hídrico a saturación (θ_s), para determinar el contenido hídrico relativo (θ_r) de cada medición de RMP, y así los coeficientes de la ecuación potencial - $RMP = a (\theta/\theta_s)^b$ - (Wilson *et al.*, 2006). Se determinó el IHO para cada tratamiento de acuerdo a da Silva *et al.*, (1994), a partir de los siguientes límites del intervalo, expresados en forma volumétrica: $\theta_a = 10\% \theta_s$, $\theta_{rmp} = \theta$ cuando la RMP = 2 MPa, θ_{cc} y $\theta_{pmp} = \theta$ a CC y PMP.

Para cada δ_s el límite superior del IHO se considera al menor valor entre θ_a o θ_{cc} , mientras que el límite inferior está determinado por el mayor valor entre θ_{rmp} y θ_{pmp} .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resistencia mecánica a la penetración y su relación con el contenido hídrico

En la Fig. 1 se presenta la relación potencial existente entre RMP- θ_r para los dos suelos y los grados de compactación evaluados, mientras que en la Tabla 2 se muestran los coeficientes de la ecuación.



a. RMP- θ_r Molisol

b. RMP- θ_r Vertisol

Figura 1. Variación de la resistencia mecánica a la penetración en función del θ_r en dos suelos.

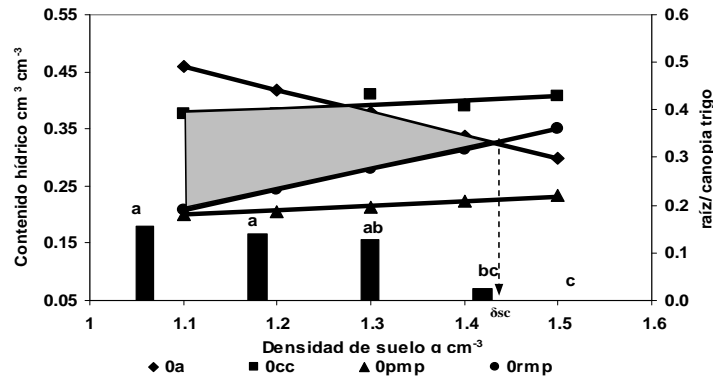
Tabla 2: Ecuaciones de la regresión potencial de RMP en relación al contenido hídrico relativo para las distintas densidades de suelo.

densidad (g cm ⁻³)	Coeficiente ecuación		R ²
	a	b	
Molisol			
1.1	0.18	-2.32	0.95
1.2	0.35	-2.30	0.95
1.3	0.54	-2.44	0.98
1.4	0.88	-2.53	0.96
1.5	1.40	-2.85	0.92
Vertisol			
1.1	0.16	-3.62	0.92
1.2	0.49	-2.64	0.88
1.3	0.50	-3.21	0.88
1.4	1.04	-3.80	0.96
1.5	2.02	-2.31	0.78

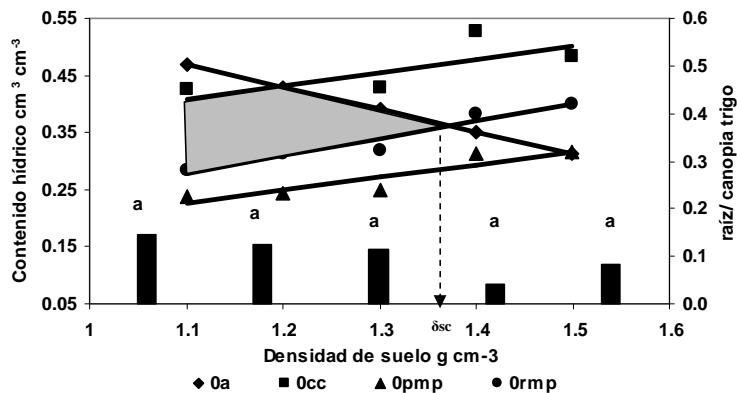
Se observó en ambos suelos un incremento en los valores de los coeficientes de la ecuación conforme aumentó la δ_s , salvo en el Vertisol, donde el mayor valor en el coeficiente **b** se dio para una $\delta_s = 1,4 \text{ g cm}^{-3}$.

Intervalo hídrico óptimo

El área conformada por los IHO determinados a diferentes densidades fue notoriamente superior en el Molisol, respecto al Vertisol (Fig. 2).



a. IHO Molisol



b. IHO Vertisol

Figura 2. Representación gráfica del intervalo hídrico óptimo dos suelos agrícolas en siembra directa y la relación raíz/ canopia para el cultivo de trigo.

En la Tabla 3 puede observarse que el IHO fue mayor en el Molisol respecto al Vertisol para δ_s de 1,1 a 1,4 g cm⁻³, mientras que en el Vertisol, para esta última δ_s , el IHO = 0. Además, en ambos suelos, el IHO = 0 para δ_s 1,5 g cm⁻³. El límite superior del intervalo estuvo marcado por θ_{cc} en δ_s de 1,1 y 1,2 g cm⁻³ para los dos suelos, constituyéndose θ_a como límite superior a mayores densidades. Por otra parte el límite inferior siempre fue θ_{rmp} , tanto en el Molisol como en el Vertisol. La δ_{sc} ocurre la intersección entre los límites superior e inferior del IHO, donde IHO = 0 (Imhoff *et al.*, 2001). De esta manera, para el Molisol la δ_{sc} = 1,44 g cm⁻³, mientras que para el Vertisol fue sensiblemente menor, δ_{sc} = 1,37 g cm⁻³. Venanzi *et al.* (2002), citan a Daddow y Warrington (1983), quienes sostienen que la δ_{sc} disminuye al aumentar el contenido de limo + arcilla del suelo (L+A). En nuestro trabajo los suelos presentaron valores similares de L+A, el Molisol (93,7%) y el Vertisol (91,8%). Sin embargo, el tipo de arcilla predominante en estos suelos es diferente y debería considerarse.

Tabla 3: Determinación del Intervalo hídrico óptimo en dos suelos en siembra directa.

Suelo	θ_s	θ_a	θ_{cc}	θ_{pmp}	θ_{rmp}	IHO
densidad	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
g cm^{-3}						
Molisol						
1.1	0.558	0.458	0.377	0.201	0.209	0.169
1.2	0.518	0.418	0.377	0.206	0.243	0.134
1.3	0.478	0.378	0.411	0.213	0.280	0.098
1.4	0.438	0.338	0.390	0.223	0.314	0.024
1.5	0.398	0.298	0.406	0.234	0.351	0
Vertisol						
1.1	0.569	0.469	0.425	0.239	0.284	0.141
1.2	0.529	0.429	0.413	0.244	0.312	0.101
1.3	0.490	0.390	0.429	0.248	0.319	0.071
1.4	0.451	0.351	0.526	0.313	0.381	0
1.5	0.412	0.312	0.485	0.315	0.400	0

Relación raíz/ canopia

La relación raíz/ canopia de trigo en el Molisol disminuyó conforme el IHO fue menor, llegando a valor de 0 (no hubo nacimiento de plantas), cuando el IHO = 0 (Fig. 3). Debido a que el suelo se mantuvo a θ_{cc} durante todo el ensayo, el problema de nacimiento de plantas puede ser explicado por la falta de aeración en las δs superiores (θ_{cc} superior a θ_a), que se agudizó en $\delta s = 1,5 \text{ g cm}^{-3}$. No se observaron diferencias significativas entre $\delta s = 1,1 \text{ g cm}^{-3}$, $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ y $1,3 \text{ g cm}^{-3}$, y sí las dos primeras con las δs más elevadas. Las raíces disponen de mecanismos hormonales que pueden detectar condiciones físicas adversas, controlando el crecimiento y la expansión foliar (Andrade *et al.*, 1993).

En trabajos anteriores hemos registrado a campo y en Molisoles en SD, valores inferiores al límite de macroporosidad mínima de 10%. El concepto de IHO también es importante considerar cuando se hacen cálculos para riego con mantenimiento del suelo próximos a θ_{cc} , ya que debe considerarse la limitante por aeración a $\delta s > 1,3 \text{ g cm}^{-3}$.

En el Vertisol no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos. A $\delta s = 1,5 \text{ g cm}^{-3}$ la relación raíz/ canopia de trigo fue menor al resto (0,08). Se registraron nacimientos y el cultivo prosperó hasta el final del ensayo.

Cambio volumétrico

El cambio volumétrico experimentado en el Vertisol podría explicar lo ocurrido con el crecimiento de plantas de trigo en dicho suelo. En la Fig. 3 puede observarse que en el Molisol, se registró una disminución del volumen en las primeras δs . Esta condición física a campo se produce luego de las primeras lluvias después del laboreo del suelo, cuando ocurre el arreglo de las partículas de suelo y el aumento de la densidad. A partir de $\delta s = 1,3 \text{ g cm}^{-3}$ se produjo un aumento de volumen con máximos cambios volumétricos en $\delta s = 1,4 \text{ g cm}^{-3}$ (7,5% respecto a la δs inicial en el Molisol).

Por otra parte, estos cambios fueron muy notorios en el Vertisol, ya desde $\delta s = 1,1 \text{ g cm}^{-3}$, con valores máximos en $\delta s = 1,3 \text{ g cm}^{-3}$ (19,2%). En Vertisoles de Entre Ríos, en condiciones de campo se han registrado cambios hasta 16% (Cerana, com. pers.). No obstante, con el suelo más denso el cambio volumétrico fue menor, pero manteniendo valores elevados. La comparación entre los dos suelos indicó que las mayores diferencias de cambio de volumen se presentaron a bajas δs , siendo mayor a $\delta s = 1,2 \text{ g cm}^{-3}$, con 16,8% y menor a $\delta s = 1,4 \text{ g cm}^{-3} = 2,0\%$. Este cambio volumétrico entre el comienzo y el final del ensayo, provocó un cambio significativo en la densidad de suelo final (δsf), manteniéndose en el Vertisol aproximadamente en $\delta sf = 1,05 \text{ g cm}^{-3}$ (para $\delta s = 1,1$ a $1,3 \text{ g cm}^{-3}$) y de $\delta sf = 1,37 \text{ g cm}^{-3}$ ($\delta s = 1,5 \text{ g cm}^{-3}$). Resta profundizar en el aporte del cambio volumétrico para la generación de macroporos de Vertisoles en SD y además analizar la influencia de dichos cambios



Semiárido: un desafío para la Ciencia del Suelo

13 al 16 de mayo de 2008

Potrero de los Funes (SL), Argentina



AACCS
ASOCIACION ARGENTINA
CIENCIA DEL SUELO

sobre otras variables físicas de suelo y la dinámica que adquieren ante los cambios en los contenidos hídricos del suelo.

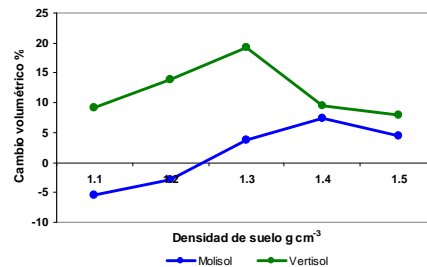


Figura 3. Cambio volumétrico en los dos suelos desde el comienzo al final del ensayo.

CONCLUSIONES

En ambos suelos se observó un incremento en los valores de los coeficientes de la ecuación de regresión de RMP con θ_r , conforme aumentó la δs . El IHO fue mayor en el Molisol respecto al Vertisol en todas las δs evaluadas, siendo IHO = 0 para δs 1,5 g cm⁻³. El límite superior del intervalo estuvo marcado por θ_{cc} en δs de 1,1 y 1,2 g cm⁻³ para los dos suelos, constituyéndose θ_a como límite superior a mayores densidades. El límite inferior siempre fue θ_{rmp} en los dos suelos.

La definición de valores de densidad de suelo críticos (δ_{sc}) es importante, ya que representan condiciones restrictivas para el crecimiento de las plantas. Para el Molisol la δ_{sc} fue de 1,44 g cm⁻³, mientras que para el Vertisol fue sensiblemente menor, $\delta_{sc} = 1,37$ g cm⁻³.

La relación raíz/ canopia de trigo en el Molisol disminuyó en función de la disminución del IHO, afectada por la falta de aeración en las δs superiores. En el Vertisol no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos. A δs altas se registraron nacimientos de plántulas y el cultivo prosperó hasta el final del ensayo. El cambio volumétrico experimentado en el Vertisol podría explicar lo ocurrido con el crecimiento de plantas de trigo. Este cambio volumétrico entre el comienzo y el final del ensayo, provocó un cambio significativo en la densidad final del suelo.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo se realizó en el marco del Proyecto Regional INTA *Agricultura Sustentable en Entre Ríos* y del Proyecto INTA PNECO *Desarrollo de indicadores de calidad/salud edáfica para las Ecorregiones*. Agradecemos asimismo al Ing. Agr. Diego Santos y a los Sres. Carlos Acosta, Lucas Scandolo y Emanuel Gabioud por la valiosa colaboración dispensada.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade A., Wolfe D.W., and E. Fereres. 1993. Leaf expansion, photosynthesis and water relations of sunflower plants grown on compacted soil. *Plant and Soil*, 149: 175-184.
- da Silva A.P., Kay B.D. and E. Perfect. 1994. Characterization of the Least Limiting Water Range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1775-1781.
- Imhoff S., da Silva A.P., Dias Junior, M. y C.A. Tormena. 2001. Quantificacao de pressoes críticas o crecimiento das plantas. *R. Bras. Ci. Solo*, 25: 11-18.
- 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.
- Orellana de J., Pilatti M.A. and D. Grenón. 1997. Soil quality: An approach to physical state assessment. *Journal of sustainable agriculture*. The Haworth Press, Inc. 9: 91-108.
- Pilatti M.A. y J. de Orellana. 1993. Posibles indicadores edáficos de sostenibilidad. II: El intervalo hídrico óptimo. *Actas XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, Mendoza: 21-22.
- Tormena C.A., da Silva A.P. y P.L. Libardi. 1998. Caracterizacáo do intervalo hídrico ótimo de un latossolo roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 22: 573-581.



**Semiárido: un desafío para la Ciencia
del Suelo**

13 al 16 de mayo de 2008

Potrero de los Funes (SL), Argentina



AACCS
ASOCIACION ARGENTINA
CIENCIA DEL SUELO

Venanzi S., Vallati A. y H. Kruger. 2002. Crecimiento temprano del trigo en función de la densidad aparente del suelo. Actas del XVIII CACS. Puerto Madryn. Trabajo en CD. 6 pp.

Wilson M., Papparotti O., Paz Gonzalez A. y E. Díaz Ucha. 2006. Ecuaciones de ajuste entre la Resistencia Mecánica a la Penetración y el contenido hídrico en un lote en siembra directa. Actas del XX CACS. Salta y Jujuy, p 108. Trabajo CD. 5 pp.